

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

12

2024

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

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

№ 12, 2024 год

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

Vol. 12. 2024

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)
- 2.1.14. – Управление жизненным циклом объектов строительства (технические науки)
- 2.6.14. – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)
- 2.5.4. – Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки)
- 2.5.5. – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 2.5.6. – Технология машиностроения (технические науки)
- 2.5.21. – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)

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

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 522 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	10.12.2024
Выход в свет	18.12.2024

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,39. Уч.-изд. л. 17,63. Тираж 40 экз. Заказ № 170

© ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 2024

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)
- 2.1.14. – Life-cycle management of construction projects (technical sciences)
- 2.6.14. – Technology of silicate and refractory nonmetallic materials (technical sciences)
- 2.5.4. – Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences)
- 2.5.5. – Technology and equipment of mechanical and physical-technical processing (technical sciences)
- 2.5.6. – Engineering technology (technical sciences)
- 2.5.21. – Machines, aggregates and technological processes (technical sciences)

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

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

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 522
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: http://www.akc.ru/itm/2558104627/
Signed for printing:	10.12.2024

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ерофеев Владимир Трофимович, академик РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ Московского государственного строительного университета (РФ, г. Москва).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Севрюгина Надежда Савельевна, д-р техн. наук, проф. кафедры технического сервиса машин и оборудования, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева (РФ, г. Москва).

Семенов Сергей Владимирович, д-р арх., проф. кафедры градостроительства Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (РФ, г. Санкт-Петербург).

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

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

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

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

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

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

Тодорович Гордана, PhD, проф. технологии и информационных систем Шумадийской академии профессионального образования (Республика Сербия, г. Крагуевац).

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

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Vladimir T. Erofeev, Academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of civil engineering (National research university) (Russian Federation, Moscow).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Nadezhda S. Sevryugina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Russian Federation, Moscow).

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

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

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

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

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

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

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

Gordana Todorovic, PhD, Professor of Technology and Information Systems at the Sumadija Academy of Vocational Education (Republic of Serbia, Kragujevac).

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

Лукутцова Н.П., Карпиков Е.Г., Пыкин А.А., Панов Д.М. ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЦЦОЛАНОВОЙ АКТИВНОСТИ ДОБАВКИ	8
Сивальнева М.Н. РЕОЛОГИЯ ВЯЖУЩИХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО ТИПА ТВЕРДЕНИЯ ПРИ ДИСПЕРСНОМ АРМИРОВАНИИ	18
Агеева М.С., Фомина Е.В., Кикалишвили Д.Г., Шаповалова А.В. РАЗРАБОТКА ЩЕЛОЧЕАКТИВИРОВАННЫХ ВЯЖУЩИХ НА ОСНОВЕ БАЗАЛЬТОВОЛОКНИСТЫХ ОТХОДОВ	28
Меркулов С.И., Сулейманова Л.А., Есипов С.М., Кашуба С.О., Лесовик Г.А. ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ	37
Ильин Е.А. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АКТИВИРОВАННОЙ СТРУИ И ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ГРАНУЛЯТОРА	47
Дребезгова М.Ю., Перькова М.В., Чернышева Н.В., Ладик Е.И. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА БЕЛГОРОДА: ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ	58
Супранович В.М., Сафронова А.Д. ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПЛАНИРОВОЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТЕХНОПАРКОВ	71

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Бондаренко Н.И., Басов В.О., Бондаренко Д.О., Дороганов В.А., Лукин Е.С., Пивинский А.Э. ВЛИЯНИЕ ДЕФЛОКУЛЯНТОВ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТХОДОВ КЕРАМОГРАНИТА	82
---	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Качаев А.Е., Севостьянов В.С. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ДЕЗИНТЕГРАТОРОМ НА ТРЕНИЕ, ПРИ ДВИЖЕНИИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО СЛОЯ МАТЕРИАЛА В ПОМОЛЬНОЙ КАМЕРЕ МЕЛЬНИЦЫ	93
Чуев К.В. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ	106
Бестужева О.В., Бондаренко Ю.А., Баранов Д.С., Романович А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕМОНТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА	116
Капырин К.И., Катунин А.А., Трясцин А.П. ВАЛКОВАЯ ШТАМПОВКА КАК МЕТОД ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ	125

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Lukuttsova N.P., Karpikov E.G., Pykin A.A., Panov D.M. INVESTIGATION OF THE POZZOLAN ACTIVITY OF A HIGHLY DISPERSED WOLLASTONITE ADDITIVE	8
Sivalneva M.N. RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF BINDING SYSTEMS OF DIFFERENT TYPES OF CURING DURING REINFORCEMENT	18
Ageeva M.S., Fomina E.V., Kikalishvili D.G., Shapovalova A.V. DEVELOPMENT OF ALKALI-ACTIVATED BINDERS BASED ON BASALT FIBER WASTE	28
Merkulov S.I., Suleymanova L.A., Esipov S.M., Kashuba S.O., Lesovik G.A. VERIFICATION OF THE TEST PROCEDURE FOR A REINFORCED CONCRETE ELEMENT DURING BENDING WITH TORSION IN LONG-TERM OPERATION	37
Ilin E.A. INVESTIGATION OF THE VELOCITY OF THE ACTIVATED JET AT THE SURFACE OF THE PHARMACEUTICAL GRANULATOR	47
Drebezgova M.Yu., Perkova M.V., Chernysheva N.V., Ladik E.I. INDUSTRIAL TERRITORIES OF THE CITY OF BELGOROD: URBAN PLANNING ANALYSIS AND DEVELOPMENT PROSPECTS	58
Supranovich V.M., Safronova A.D. THE FUNCTIONS OF THE FUNCTIONAL-PLANNING ORGANIZATION OF VERTICAL TECHNOLOGY PARKS	71

CHEMICAL TECHNOLOGY

Bondarenko N.I., Basov V.O., Bondarenko D.O., Doroganov V.A., Lukin E.S., Pivinskiy A.E. INFLUENCE OF DEFLOCULANTS ON THE RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF CERAMOGRANITE WASTE	82
---	----

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Kachaev A.E., Sevostyanov V.S. CALCULATION OF THE POWER CONSUMED BY THE DISINTEGRATOR FOR FRICTION WHEN MOVEMENT OF THE RELATIVE LAYER OF MATERIAL IN THE GRINDING CHAMBER OF THE MILL	93
Chuev K.V. TECHNOLOGICAL ASPECTS OF EXTRACTING METAL COMPONENTS FROM RUBBER PRODUCTS	106
Bestuzheva O.V., Bondarenko Yu.A., Baranov D.S., Romanovich A.A. STUDY OF REPAIR RESTORATION OF SURFACES OF REVOLUTION OF VARIOUS CONFIGURATIONS OF LARGE DIAMETER	116
Kapryrin K.I., Katunin A.A., Tryashtsin A.P. ROLL STAMPING AS AN SEVERE PLASTIC DEFORMATION METHOD	125

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-8-17

^{1,*}Лукутцова Н.П., ¹Карпиков Е.Г., ¹Пыкин А.А., ²Панов Д.М.
¹Брянский государственный инженерно-технологический университет
²Детский технопарк «Кванториум»
*E-mail: natluk58@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЦЦОЛАНОВОЙ АКТИВНОСТИ ДОБАВКИ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО ВОЛЛАСТОНИТА МЕТОДОМ ФРАТТИНИ

Аннотация. Установлена пуццолановая активность добавки высокодисперсного волластонита, полученной методом ультразвукового диспергирования исходного сырья с модальным диаметром частиц 2,17 мкм при частоте 35 кГц в течение 5 минут в водной среде стабилизатора на основе эфира поликарбоксилата. Методами комплексонометрического и кислотно-основного титрования стандартизированы рабочие растворы титрантов динатриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты с коэффициентом поправки 0,98 и соляной кислоты концентрацией 0,099 моль/дм³, используемые для определения концентрации ионов Ca^{2+} и OH^- в соответствии с представленным методом анализа пуццолановой активности, предусмотренным стандартом EN 196-5. В сравнении с отечественными способами анализа обоснован выбор метода Фраттини, как наиболее универсального и непродолжительного по времени исполнения, отличительная особенность которого заключается в применении портландцемента в качестве источника оксида кальция. Показан график сравнения концентрации CaO и OH^- в исследуемых растворах с кривой растворимости CaO в щелочной среде при заданных условиях, указывающий на высокую активность исследуемой добавки. Доказано, что добавка высокодисперсного волластонита способствует связыванию, в среднем по результатам серии испытаний, 76 % свободного CaO , при этом его количество на 10,5 % больше, чем у параллельно исследованной добавки микрокремнезема.

Ключевые слова: пуццолановая активность, метод Фраттини, волластонит, высокодисперсная добавка, мелкозернистый бетон.

Введение. В соответствии с изменениями, внесенными в государственную программу Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» от 22 октября 2021 года № 1814 [1], определены магистральные направления развития мировой научно-технологической и инновационной сферы с необходимостью ответа на связанные с ними вызовы, установленные «Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации», утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 года № 145 [2]. К числу таких направлений относятся технологии производства и использования новых материалов. В рамках направлений, определенных в Программе, предусматривается достижение целевого развития в форме обеспечения продвижения российских технологий и продуктов на ранее невосребованные рынки посредством разработки инновационных материалов и технологий. В качестве конкурентного направления при реализации Программы в области строительных материалов важно выделить производство и применение высокоэффективных бетонов нового поколения, которое невозможно без использования современных химических и минеральных модификаторов.

Модификаторы – компоненты, вводимые в бетонные и растворные смеси в незначительных

количествах, которые способствуют изменению технологических свойств смесей и строительно-технических характеристик бетонов (растворов), с возможностью проявления в них качественно новых свойств [3]. К модификаторам относятся минеральные и химические добавки.

Минеральные добавки изготавливаются из техногенного или природного сырья и характеризуются в отличие от химических способностью не растворяться в воде, оставаясь тонкодисперсной частью твердой фазы бетона. В зависимости от механизма действия минеральные добавки подразделяются на неактивные (инертные) добавки-наполнители и активные минеральные добавки, различия между которыми связаны с отсутствием или наличием пуццолановой активности (ПА).

Пуццолан – это минеральная добавка (тип I – активная минеральная) на основе кремнеземистого или глиноземистого компонента, способствующая повышенному образованию гидросиликатов кальция в результате химического взаимодействия с портландитом и свободной известью, образующимися в ходе реакции гидратации цементного клинкера. Свободный CaO , вызывает неравномерность изменения объема и понижение прочности цементного камня, что обу-

славливается его способностью к медленному гашению и образованию внутренних напряжений в затвердевших бетонах. Портландит, как известно, снижает коррозионную стойкость и увеличивает пористость при вымывании из бетона мягкими проточными водами (коррозия выщелачивания). Таким образом, применение минеральных добавок, обладающих ПА, положительно сказывается на структуре и свойствах цементных материалов, изделий и конструкций [4–6].

В настоящее время высокую актуальность имеет модификация цементных систем высокодисперсными добавками, встраивающимися в структуру, получаемых на основе цемента, композитов. Наиболее распространенным способом увеличения удельной поверхности таких модификаторов, обеспечивающим их устойчивость, является метод ультразвукового диспергирования (УЗД) частиц твердой фазы в водной среде химических стабилизаторов. Данный метод позволяет получать водные суспензии равномерно распределенных в объеме жидкости твердых частиц с химически активной поверхностью, способствующей их естественному связыванию в структуре цементной системы.

Целью работы является исследование методом Фраттини пуццолановой активности мине-

ральной добавки высокодисперсного волластонита, предназначенной для модификации структуры мелкозернистого бетона, обеспечивающей повышение его физико-механических характеристик.

Волластонит относится к группе минералов, называемой метасиликаты кальция ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), с кристаллохимической формулой $\text{Ca}_3[\text{Si}_3\text{O}_9]$. Среди прочих достоинств минерала, таких как экологическая безопасность, стойкость к щелочам, низкая стоимость, цвет и прочее, ученые четко выделяют микроармирующую способность, связанную с игольчатой формой его кристаллов, что вызывает особый интерес в области исследования его влияния на свойства строительных материалов [7–9].

Материалы и методы. В качестве исходного компонента высокодисперсной добавки в работе использовался волластонит Миволл 05-97 (Калужская область, п. Полотняный завод, Российская Федерация) с модальным диаметром частиц 2,17 мкм и удельной поверхностью 45786 $\text{см}^2/\text{см}^3$ (рис.1). Гранулометрический анализ и удельная площадь поверхности минерального порошка определялись методом лазерной дифракции при помощи лазерного измерителя размеров частиц ANALYSETTE 22 FRITSCH NanoTec (Германия).

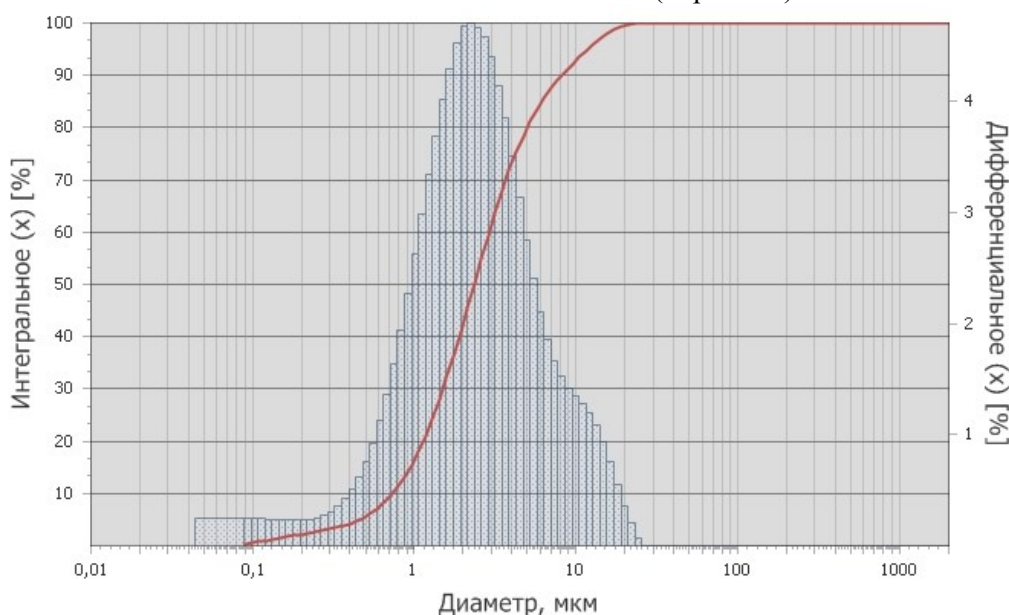


Рис. 1. Гранулометрический анализ образца исходного волластонита

Показатели свойств применяемого волластонита представлены в таблице 1.

Добавку получали методом ультразвукового диспергирования исходного волластонита в водной среде при помощи активатора ванного типа УЗВ-13/150-ТН-РИЭЛТЕК с частотой колебаний 35 кГц в течение 5 минут, выбор режима обработки которого обоснован ранее проведенными исследованиями [10]. Изменение размера частиц

твердой фазы водной суспензии в сторону уменьшения обуславливает проблему их сохранности во времени, что связано с увеличением энергии межмолекулярного взаимодействия высокодисперсной поверхности, которая, в свою очередь, приводит к процессам агрегации и седиментации, негативно сказывающимся на конечных свойствах модификаторов. Решением данной проблемы явля-

ется введение стабилизирующих поверхностно-активных веществ (ПАВ), препятствующих указанным процессам. В качестве стабилизатора в работе применялась суперпластифицирующая добавка на основе эфира поликарбоксилата «Модификатор М», объемной концентрацией в суспензии 2,1 мл/л (0,21 %). Свойства мелкозернистого бетона, модифицированного высокодисперсной добавкой волластонита представлены в работах авторов [10, 11].

Определение дисперсного состава суспензии добавки высокодисперсного волластонита проводилось методом лазерной Фурье-дифрактометрии анализатором размера частиц Zetatracs Microtrac (США). Установлено, что средний размер частиц составил 0,45 мкм (рис. 2) с плотностью 2,8 г/см³, при динамической вязкости суспензии 0,897 сПз.

Таблица 1

Показатели свойств волластонита Миволл 05-97

Наименование показателя	Норма по ТУ 5777-006-40705684-2003	Фактическое значение
Химический состав		
CaO, %	44–50	45,0
MgO, не более, %	0,5–1,5	0,8
SiO ₂ , %	48–52	51,0
Fe ₂ O ₃ , %	0,1–0,4	0,3
Al ₂ O ₃ , не более, %	0,3–1,0	0,35
Технологические параметры		
Массовая доля водорастворимых веществ, %	не более 0,6	0,4
Массовая доля влаги, %	не более 0,5	0,3
Показатель концентрации водородных ионов в 10 % водной суспензии (pH)	9,5–11	10,0
Потери при прокаливании, %, в пределах	0,5–5,0	1,2
Цветовые характеристики:		
– белизна по CIELab (C/2o), %	97 ± 1,5	96,5
– яркость по DIN 53163 (C/2o), %	91 ± 1,5	92,0
Массовая доля остатка на сите № 0045, %	не более 0,1	0,0

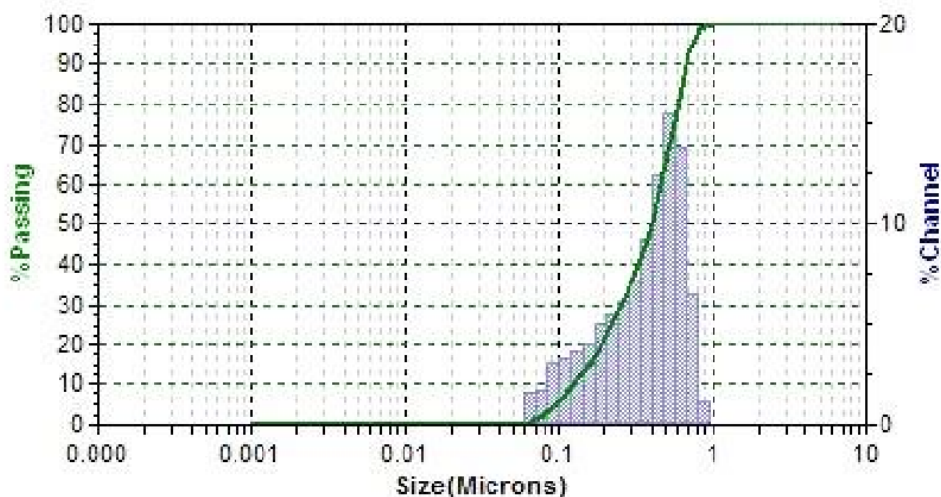


Рис. 2. Дисперсный состав суспензии добавки высокодисперсного волластонита

Исследование ПА добавки осуществлялось методом Фраттини – это широко распространенный в европейских странах в соответствии с EN 196-5 [12] прямой метод определения концентрации Ca²⁺ и OH⁻ в растворе, содержащем портландцемент совместно с пуццолановыми добавками. Выбор метода основан на его универсальности, точности и непродолжительном времени исполнения.

Стоит отметить существование отечественных методов оценки активности минеральных добавок [13–16]: стандартный метод, базирующийся на способности добавок поглощать известь из известкового раствора в течение 30 суток, метод Запорожца, основанный на определении количества поглощенной извести од-

ним граммом добавки в течение 5 часов, и обладающий, по мнению авторов, более низкой точностью. При этом в обоих случаях в качестве источника оксида кальция используется известь, в то время как отличительной особенностью метода Фраттини является применение портландцемента, представленного в работе маркой ЦЕМ I 42,5Н (г. Костюковичи, Республика Беларусь). Вместе с тем указанная особенность не отражается на результатах эксперимента, т.к. нивелируется кривой растворимости CaO в щелочной среде, а конечный результат выражается в виде разности между максимальной, теоретически возможной концентрацией катионов кальция в растворе при заданных условиях, устанавливаемых, в том числе, методом кислотно-основного титрования по содержа-

нию анионов OH^- , и концентрацией Ca^{2+} определяемой практически, методом комплексонометрии, в основе которого лежит реакция образования комплексных соединений ионов металлов с динатриевой солью этилендиаминтетрауксусной кислоты и другими аминополикарбоновыми кислотами.

Как известно из литературных источников [17–19], микрокремнезем обладает высокой ПА в зависимости от содержания в нем массовой доли SiO_2 [20], поэтому сравнение полученных результатов осуществлялось посредством параллельного исследования активности микрокремнезема марки МК-85 (г. Липецк, Российская Федерация), основные показатели свойств которого представлены в таблице 2.

Таблица 2

Показатели свойств микрокремнезема МК-85

Наименование показателя	Фактическое значение
Химический состав	
SiO_2 , %	90-92
Al_2O_3 , %	0,68
Fe_2O_3 , %	0,69
CaO , %	1,58
MgO , %	1,01
Na_2O , %	0,61
K_2O , %	1,23
C, %	0,98
S, %	0,26
Технологические параметры	
Внешний вид	серый
Массовая доля микрокремнезема в пересчете на сухое вещество, не менее, %	99,6
Массовая доля воды, не более, %	0,36
Массовая доля потерь при прокаливании (п.п.п.), не более, %	0,8
Насыпная плотность, кг/м^3	152,2

Подготовка к испытанию и стандартизация рабочих растворов проводилась методами химического анализа в соответствии с ГОСТ 25794.1-83 и ГОСТ 10398-2016.

Основная часть. С целью повышения точности и снижения погрешности результатов измерений перед началом анализа высокодисперсной добавки производилась стандартизация исходных растворов титрантов. В соответствии с методикой EN 196-5 установление концентрации аниона OH^- осуществляется посредством титрования исследуемого образца раствором 0,1М HCl , а концентрация Ca^{2+} – 0,03М раствором динатриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты (ди- Na -ЭДТА) $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8$.

Для определения коэффициента поправки раствора ди- Na -ЭДТА приготавливали раствор соли цинка $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ с точной концентрацией 0,05М.

Очищенный от оксидной пленки металлический цинк массой 3,2690 г растворяли в смеси 100 см^3 дистиллированной воды и 15 см^3 концентрированной HNO_3 на водяной бане при постепенном подогреве до 70 °С. Химический стакан из термостойкого стекла накрывали часовым стеклом и упаривали раствор до объема 3–4 см^3 , после чего количественно переносили в мерную колбу вместимостью 1000 см^3 и доводили объем раствора дистиллированной водой до метки.

Аммиачный буферный раствор I готовили в мерной колбе вместимостью 1000 см^3 из 70 г NH_4Cl , предварительно растворенного в 250 см^3 дистиллированной воды, и 250 см^3 25 % раствора NH_4OH . Объем мерной колбы доводили до метки дистиллированной водой.

Раствор ди- Na -ЭДТА заданной концентрации получали посредством растворения 11,1672

г реактива в 1000 см³ дистиллированной воды при тщательном перемешивании.

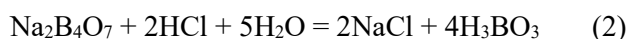
Коэффициент поправки ди-На-ЭДТА концентрацией 0,03М оценивали комплексонометрическим методом определения основного вещества в соответствии с ГОСТ 10398-2016. Для этого 25 см³ ранее приготовленной соли цинка переносили в коническую колбу, прибавляли 70 см³ воды, 5 см³ буферного раствора I и 0,1 г индикаторной смеси «Эриохром черный Т», изготовленной тщательным растиранием 0,5 г индикатора с 50 г NaCl. Перемешанный раствор с индикатором титровали до перехода фиолетово-красной окраски в синюю. В качестве конечного результата использовали среднее арифметическое значение из 3 титрований с погрешностью не более 0,1 см³.

Коэффициент поправки вычисляли по формуле (1), при этом полученное значение составило 0,98.

$$K = \frac{25}{V}, \quad (1)$$

где V – среднее арифметическое значение объема раствора ди-На-ЭДТА, потраченного на титрование раствора Zn(NO₃)₂, см³.

Стандартизацию раствора соляной кислоты концентрацией 0,1М осуществляли методом кислотно-основного титрования 0,1н раствора тетрабората натрия. Стоит отметить, что в соответствии с уравнением реакции (2) фактор эквивалентности Na₂B₄O₇ составляет 1/2, в то время как для HCl этот показатель имеет значение 1, следовательно, молярная и нормальная концентрация HCl численно равны, таким образом, рабочий раствор пригоден к стандартизации.



Раствор HCl готовили из концентрированной кислоты. С этой целью путем измерения ее плотности набором лабораторных ареометров АОН-1, с помощью электронного справочника, установили исходную концентрацию, которая составила 11,8019 моль/дм³. Объем концентрированной HCl необходимый для получения 100 см³ раствора заданной концентрации вычисляли, используя закон эквивалентов (3).

$$CV = C_1V_1. \quad (3)$$

Тетраборат натрия концентрацией 0,1н изготавливали посредством тщательного перемешивания реактива массой 0,1907 г в 100 см³ дистиллированной воды.

Стандартизацию выполняли в следующем порядке. В коническую колбу переносили 10 мл

раствора Na₂B₄O₇, добавляли 1-2 капли индикатора «Метиловый оранжевый». Колбу с тетраборатом натрия устанавливали под бюретку, предварительно промытую дистиллированной водой и рабочим раствором титранта, после чего по каплям приливали из нее HCl до перехода цвета от желтого к розовому, устойчивому в течение 30 секунд. Процедуру проводили до трех сходимых результатов, которые отличались друг от друга не более чем на 0,1 см³. Применив закон эквивалентов, установили точную концентрацию рабочего раствора HCl в размере 0,099 моль/дм³.

В соответствии с условиями метода Фраттини следует, что для анализа активности требуется смешивать 4 г сухой добавки и 16 г портландцемента в 250 см³ дистиллированной воды. Указанные критерии накладывают необходимость корректировки в случае применения жидких суспензий модификаторов, поэтому состав высокодисперсной добавки волластонита регулировался из соотношения содержания 4 г сухого вещества в 250 см³ воды. При этом перед введением в раствор портландцемента полученная суспензия проходила УЗД по установленному режиму. Затем колбы с образцами герметично закрывали пробкой и выдерживали 8 суток при температуре 40 °С. Таким образом, требования оригинальной методики были соблюдены.

Для сравнения полученных результатов в параллельном исследовании применялся микрокремнезем, обладающий известной ПА.

После 8 суток выдерживания растворы охлаждали до комнатной температуры, фильтровали и осуществляли титрование в два этапа.

Концентрацию аниона OH⁻ определяли посредством титрования ранее приготовленным и стандартизированным раствором соляной кислоты в присутствии индикатора «Метиловый оранжевый». Титрование производили при помощи бюретки вместимостью 25 см³, из которой по каплям приливали к исследуемому образцу раствор титранта до изменения окраски от желтого к розовому.

Концентрацию ионов кальция Ca²⁺ устанавливали аналогично, при этом в качестве титранта применяли ранее приготовленный и стандартизированный ди-На-ЭДТА, а pH исследуемого раствора доводили до 12,5. Индикатором служила смесь 50 г NaCl и 0,5 г «Эриохром черный Т». Титрование продолжали до перехода окраски от фиолетово-красной в синюю, устойчивую в течение 30 с. Расчет выполняли при помощи закона эквивалентов (3).

Эксперимент проводился с использованием серии образцов, при этом за конечную величину было принято среднее арифметическое значение результатов измерений.

На основе полученных данных были отмечены точки в системе координат зависимости концентраций CaO от OH⁻ (рис. 3), которые сопоставляли с кривой растворимости CaO в щелочной среде (4)

$$[CaO]_{\max} = \frac{350}{[OH^-] - 15} \tag{4}$$

Концентрация оксида кальция, связанного добавкой, выражается в процентах, как разность между 100 % и долей, составляющей CaO от [CaO]_{max} (табл. 3).

Таблица 3

Результаты исследования пуццолановой активности

Добавка	Концентрация, ммоль/л			Связанный [CaO] _{св} , %
	ОН ⁻	СаО	[CaO] _{max}	
Микрокремнезем	25	11,2	35	68
Волластонит	27	7	29	76

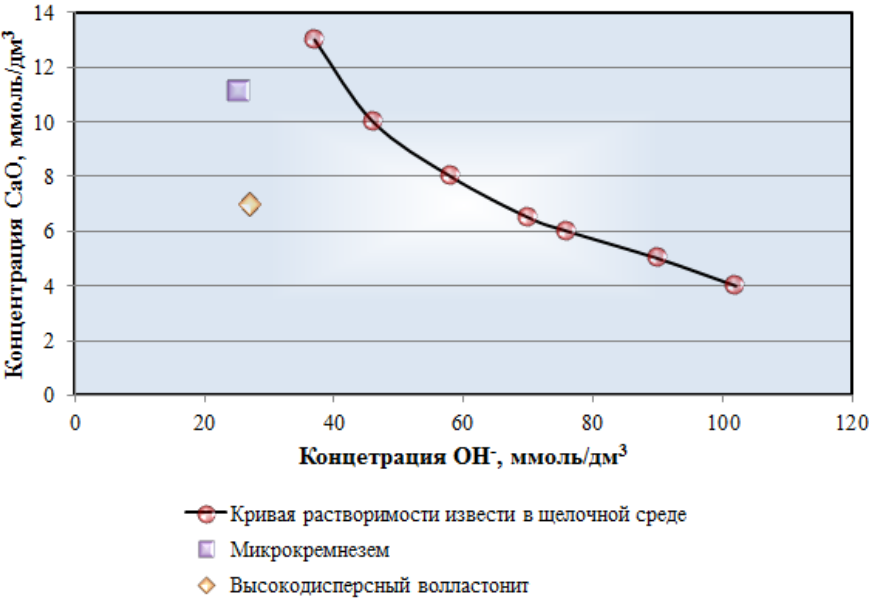


Рис. 3. График сравнения концентрации СаО и ОН⁻ в исследуемых растворах с кривой растворимости СаО в щелочной среде

В соответствии со стандартом EN 196-5 добавка считается пуццолановой, если зависимость концентрации оксида кальция от аниона ОН⁻ испытуемого раствора располагается ниже кривой растворимости, при этом, чем дальше находится значение от кривой, тем более высокой активностью обладает исследуемая добавка.

Таким образом, установлено, что высокодисперсная добавка волластонита обладает высокой ПА и способствует в среднем связыванию 76 % свободного СаО по результатам серии испытаний. При этом необходимо отметить, что количество СаО связываемого волластонитом на 10,5 % больше, чем у добавки микрокремнезема.

Выводы.

1. Методом Фраттини определена ПА высокодисперсной добавки волластонита со средним размером частиц 0,45 мкм, плотностью 2,8 г/см³, при динамической вязкости суспензии 0,897 сПз. Добавка получена путем ультразвукового диспергирования с частотой колебаний 35 кГц в течение 5 минут исходного волластонитового сырья

Миволл 05-97 с модальным диаметром частиц 2,17 мкм и удельной поверхностью 45786 см²/см³ в водной среде стабилизатора на основе эфира поликарбоксилата «Модификатор М».

2. Методами комплексонометрического и кислотно-основного титрования в результате проведенной стандартизации исходных растворов, необходимых для анализа концентрации катионов кальция и гидроксид-анионов, рассчитан коэффициент поправки титранта 0,03М ди-Na-ЭДТА, составляющий 0,98, а также установлена концентрация раствора соляной кислоты равная 0,099 моль/дм³.

3. В соответствии со стандартом EN 196-5 добавка высокодисперсного волластонита обладает высокой ПА. Выполненные расчеты концентрации оксида кальция в растворе с исследуемой добавкой указывают на ее способность к связыванию в среднем 76 % СаО, что на 10,5 % больше, чем у параллельно исследованной добавки микрокремнезема.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации»: постановление Правительства от 22 октября 2021 года № 1814 // Собрание законодательства Российской Федерации. М., 2021. № 44 (ч. III). Ст.7422.
2. О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: указ президента РФ от 28 февраля 2024 года № 145 // Собрание законодательства Российской Федерации. М., 2024. № 10. Ст.1373.
3. Терминологический словарь по бетону и железобетону. М.: ФГУП «НИЦ «Строительство» НИИЖБ им. А. А. Гвоздева, 2007. 110 с.
4. Ларсен О.А., Наруть В.В., Бахрах А.М. Пуццолановая активность минеральных добавок для гидротехнических бетонов // Техника и технология силикатов. 2022. Т. 29. № 3. С. 250–260.
5. Ларсен О.А., Александрова О.В., Наруть В.В., Полозов А.А., Бахрах А.М. Исследование свойств активных минеральных добавок для применения в гидротехническом строительстве // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 8. С. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-8-8-17.
6. Санчес де Рохас М.И., Асенсио Е., Фриас М., Куэвас И., Медина К. Низкоклинкерные цементы, содержащие строительные отходы и лом как пуццолановую добавку // Цемент и его применение. 2020. № 2. С. 84–89.
7. Козин А.В., Федюк Р.С., Ильинский Ю.Ю., Ярусова С.Б., Гордиенко П.С., Мохаммад Али Мосаберпанах Влияние волластонита на механические свойства бетона // Строительные материалы и изделия. 2020. Т.3. №5. С. 34–42. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-5-34-42.
8. Гордиенко П.С., Ярусова С.Б., Козин А.В., Ивин В.В., Силантьев В.Е., Лизунова П.Ю., Шорников К.О. Материал на основе синтетического волластонита и его влияние на функциональные свойства мелкозернистого бетона // Перспективные материалы. 2017. № 9. С. 40–48.
9. Божко Ю.А., Овдун Д.А., Партышев М.Ю. Синтетический волластонит - перспективная добавка при производстве лицевого керамического кирпича светлых оттенков // Строительные материалы. 2023. № 5. С. 25–29. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-813-5-25-29.
10. Лукутцова Н.П., Карпиков Е.Г., Горностаева Е.Ю., Соболева Г.Н. Оптимизация состава добавки стабилизированного высокодисперсного волластонита с использованием компьютерного алгоритма поиска экстремумов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №5. С. 9–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-9-18.
11. Karpikov E.G., Lukuttsova N.P., Blagoder T.P., Bondarenko E.A. Effective fine concrete modified with a highly dispersed wollastonite-based additive // Key Engineering Materials. 2021. Vol. 887 KEM. Pp. 422–427. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.887.422.
12. BSI Standards Publication Methods of testing cement // ACADEMIA: сайт. Сан-Франциско, США, 2024. URL: https://www.academia.edu/37685355/BSI_Standard_s_Publication_Methods_of_testing_cement (дата обращения 05.08.2024).
13. Дмитриев Н.С., Ларсен О.А., Александрова О.В. Исследование пуццолановой активности активных минеральных добавок различного происхождения // Сб. статей II Брянского Международного инновационного форума «Строительство-2016». Брянск: Изд-во БГИТА, 2016. С. 40–43.
14. Потапова Е.Н., Манушина А.С., Зырянов М.С., Урбанов А.В. Методы определения пуццолановой активности минеральных добавок // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2017. № 7-8. С. 29–33.
15. Соколова Ю.В., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Шинкарук А.А., Махова Т.А. Потенциометрический метод оценки пуццолановой активности высокодисперсных материалов // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2023. Т. 15. № 4. С. 349–358. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-4-349-358.
16. Шаманина А.В., Айзенштадт А.М. Оценка активности кварцсодержащих минеральных порошков как компонентов бетонных смесей потенциометрическим методом // В сборнике: Современные строительные материалы и технологии. Калининград, 2023. С. 33–38.
17. Морозова Н.Н., Кузнецова Г.В., Майсурдзе Н.В., Ахтариев Р.Р., Абдрашитова Л.Р., Низамутдинова Э.Р. Исследование активности пуццоланового компонента и суперпластификатора для гипсоцементно-пуццоланового вяжущего белого цвета // Строительные материалы. 2018. № 8. С. 26–30. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-26-30.
18. Горев Д.С., Потапов В.В., Ефименко Ю.В., Карабцов А.А., Куравый В.Г., Баланов М.И. Хемосорбция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ аморфным нанопорошком SiO_2 // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 3-2. С. 146–154.
19. Низина Т.А., Балыков А.С., Коровкин Д.И., Володин В.В., Володин С.В. Оценка физико-химической эффективности минеральных добавок различного состава в цементных системах // Эксперт: теория и практика. 2021. № 5 (14). С. 41–47. DOI: 10.51608/26867818_2021_5_41.

20. Танг В.Л., Нгуен З.Т.Л. Пуццоланическая активность тонкодисперсных минеральных ком-

понентов различной природы вьетнама // Техника и технология силикатов. 2021. Т. 28. № 1. С. 7–12

Информация об авторах

Лукутцова Наталья Петровна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Производство строительных конструкций». E-mail: natluk58@mail.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, проспект Станке Димитрова, д.3.

Карпиков Евгений Геннадиевич, старший преподаватель кафедры «Производство строительных конструкций». E-mail: johnjk@mail.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, проспект Станке Димитрова, д.3.

Пыкин Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Производство строительных конструкций». E-mail: johnjk@mail.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет». Россия, 241037, Брянск, проспект Станке Димитрова, д.3.

Панов Дмитрий Максимович, обучающийся направления «Наноквантум» E-mail: pantava82@gmail.com. ГАУ ДО «Детский технопарк «Кванториум». Россия, 241012, Брянск, ул. Димитрова, д. 114.

Поступила 09.09.2024 г.

© Лукутцова Н.П., Карпиков Е.Г., Пыкин А.А., Панов Д.М., 2024

^{1,*}*Lukutsova N.P., ¹Karpikov E.G., ¹Pykin A.A., ²Panov D.M.*

¹*Bryansk State University of Engineering and Technology*

²*Technopark "Quantorium"*

^{*}*E-mail: natluk58@mail.ru*

INVESTIGATION OF THE POZZOLAN ACTIVITY OF A HIGHLY DISPERSED WOLLASTONITE ADDITIVE

Abstract. The pozzolan activity of an additive of highly dispersed wollastonite obtained by ultrasonic dispersion of the feedstock with a modal particle diameter of 2.17 microns at a frequency of 35 kHz for 5 minutes in an aqueous medium of a stabilizer based on polycarboxylate ether has been established. By methods of complexometric and acid-base titration, working solutions of titrants of the disodium salt of ethylenediaminetetraacetic acid with a correction factor of 0.98 and hydrochloric acid with a concentration of 0.099 mol/dm³ were standardized, used to determine the concentration of Ca²⁺ and OH⁻ ions in accordance with the presented method of pozzolan activity analysis provided for by the EN 196-5 standard. In comparison with domestic methods of analysis, the choice of the Frattini method is justified as the most universal and short-lived in terms of execution, the distinctive feature of which is the use of portlandcement as a source of calcium oxide. A graph is shown comparing the concentration of CaO and OH⁻ in the studied solutions with the curve of the solubility of CaO in an alkaline medium under given conditions, indicating the high activity of the studied additive. It has been proven that the addition of highly dispersed wollastonite contributes to the binding, on average, according to the results of a series of tests, 76% of free CaO, while its amount is 10.5% more than that of the microsilicon additive studied in parallel.

Keywords: pozzolan activity, the Frattini method, wollastonite, highly dispersed additive, fine-grained concrete.

REFERENCES

1. On Amendments to the State program of the Russian Federation "Scientific and Technological Development of the Russian Federation": Government Decree No. 1814 of October 22, 2021 [O vneshenii izmenenij v gosudarstvennyy programmu Rossijskoj Federacii «Nauchno-tekhnologicheskoe razvitiye Rossijskoj Federacii»: postanovlenie Pravitel'stva ot 22 oktyabrya 2021 goda № 1814]. Collection of Legislation of the Russian Federation. M., 2021. No. 44 (Part III). Article 7422. (rus)

2. On the Strategy of scientific and technological development of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation No. 145 dated February 28, 2024 [O Strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii: ukaz prezidenta RF ot 28 fevralya 2024 goda № 145]. Collection of Legislation of the Russian Federation. M., 2024. No. 10. Art. 1373. (rus)

3. Terminological dictionary of concrete and reinforced concrete [Terminologicheskij slovar' po betonu i zhelezobetonu]. Moscow: FSUE "SIC

"Stroitelstvo" NII ZHB named after A. A. Gvozdev, 2007. 110 p. (rus)

4. Larsen O.A., Narut V.V., Bakhrakh A.M. Pozzolan activity of mineral additives for hydraulic engineering concretes [Puczczolanovaya aktivnost' mineral'ny'x dobavok dlya gidrotexnicheskix betonov]. Technique and technology of silicates. 2022. Vol. 29. No. 3. Pp. 250–260. (rus)

5. Larsen O.A., Alexandrova O.V., Narut V.V., Polozov A.A., Bakhrakh A.M. Investigation of the properties of active mineral additives for use in hydraulic engineering construction [Issledovanie svoystv aktivny'x mineral'ny'x dobavok dlya primeneniya v gidrotexnicheskom stroitel'stve]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 8. Pp. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-8-8-17. (rus)

6. Sanchez de Rojas M.I., Asensio E., Frias M., Cuevas I., Medina K. Low-clinker cements containing construction waste and scrap as a pozzolan additive [Nizkoklinkerny'e cementy', sodержashhie stroitel'ny'e otdoxy' i lom kak puczczolanovuyu dobavku]. Cement and its application. 2020. No. 2. Pp. 84–89. (rus)

7. Kozin A.V., Fedyuk R.S., Ilyinsky Yu.Yu., Yarusova S.B., Gordienko P.S., Mohammad Ali Mosaberpanakh The influence of wollastonite on the mechanical properties of concrete [Vliyanie vollastonita na mexanicheskie svoystva betona]. Building materials and products. 2020. Vol. 3. No.5. Pp. 34–42. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-5-34-42. (rus)

8. Gordienko P.S., Yarusova S.B., Kozin A.V., Ivin V.V., Silantsev V.E., Lizunova P.Yu., Shornikov K.O. Material based on synthetic wollastonite and its effect on the functional properties of fine-grained concrete [Material na osnove sinteticheskogo vollastonita i ego vliyanie na funktsional'ny'e svoystva melkozernistogo betona]. Promising materials. 2017. No. 9. Pp. 40–48. (rus)

9. Bozhko Yu.A., Ovdun D.A., Partyshev M.Yu. Synthetic wollastonite is a promising additive in the production of face ceramic bricks of light shades [Sinteticheskij vollastonit – perspektivnaya dobavka pri proizvodstve licevogo keramicheskogo kirpicha svetly'x ottenkov]. Building materials. 2023. No. 5. Pp. 25–29. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-813-5-25-29. (rus)

10. Lukutsova N.P., Karpikov E.G., Gornostayeva E.Yu., Soboleva G.N. Optimization of the composition of an additive of stabilized highly dispersed wollastonite using a computer algorithm for searching for extremes [Optimizatsiya sostava dobavki stabilizirovannogo vy'sokodispersnogo vollastonita s ispol'zovaniem komp'yuternogo algoritma poiska e'kstremumov]. Bulletin of BSTU named after V.G.

Shukhov. 2023. No. 5. Pp. 9–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-9-18. (rus)

11. Karpikov E.G., Lukutsova N.P., Blagoder T.P., Bondarenko E.A. Effective fine concrete modified with a highly dispersed wollastonite-based additive. Key Engineering Materials. 2021. Vol. 887 KEM. Pp. 422–427. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.887.422.

12. BSI Standards Publication Methods of testing cement. ACADEMIA: website. San Francisco, USA, 2024. URL: https://www.academia.edu/37685355/BSI_Standards_Publication_Methods_of_testing_cement (date of application 05.08.2024).

13. Dmitriev N.S., Larsen O.A., Alexandrova O.V. Investigation of the pozzolanic activity of active mineral additives of various origins [Issledovanie puczczolanovoy aktivnosti aktivny'x mineral'ny'x dobavok razlichnogo proisxozhdeniya]. Collection of articles of the II Bryansk International Innovation Forum "Construction-2016". Bryansk: Publishing House of BGITA, 2016. Pp. 40–43. (rus)

14. Potapova E.N., Manushina A.S., Zyryanov M.S., Urbanov A.V. Methods for determining the pozzolan activity of mineral additives [Metody' opredeleniya puczczolanovoy aktivnosti mineral'ny'x dobavok]. Building materials, equipment, technologies of the XXI century. 2017. No. 7–8. Pp. 29–33. (rus)

15. Sokolova Yu.V., Aisenstadt A.M., Frolova M.A., Shinkaruk A.A., Makhova T.A. A potentiometric method for evaluating the pozzolan activity of highly dispersed materials [Potenciometricheskij metod ocenki puczczolanovoy aktivnosti vy'sokodispersny'x materialov]. Nanotechnology in construction: scientific online journal. 2023. Vol. 15. No. 4. Pp. 349–358. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-4-349-358. (rus)

16. Shamanina A.V., Eisenstadt A.M. Assessment of the activity of quartz-containing mineral powders as components of concrete mixtures by the potentiometric method [Ocenka aktivnosti kvarczsoderzhashhix mineral'ny'x poroshkov kak komponentov betonny'x smesey potenciometricheskim metodom]. In the collection: Modern building materials and technologies. Kaliningrad, 2023. Pp. 33–38. (rus)

17. Morozova N.N., Kuznetsova G.V., Maisuradze N.V., Akhtariyev R.R., Abdrashitova L.R., Nizamutdinova E.R. Investigation of the activity of the pozzolan component and superplasticizer for gypsum cement-pozzolan binder of white color [Issledovanie aktivnosti puczczolanovogo komponenta i superplastifikatora dlya gipsocementno-puczczolanovogo vyazhushhego belogo czveta]. Building materials. 2018. No. 8. Pp. 26–30. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-26-30. (rus)

18. Gorev D.S., Potapov V.V., Efimenko Yu.V., Karabtsov A.A., Kuryavy V.G., Balanov M.I. Chemisorption of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ by amorphous SiO_2 nanopowder [Хемосорбция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ аморфным нанопорошком SiO_2]. Modern high-tech technologies. 2019. No. 3-2. Pp. 146–154.

19. Nizina T.A., Balykov A.S., Korovkin D.I., Volodin V.V., Volodin S.V. Evaluation of the physico-chemical effectiveness of mineral additives of various compositions in cement systems [Оценка

fiziko-ximicheskoy e'ffektivnosti mineral'ny'x dobavok razlichnogo sostava v cementny'x sistemax]. Expert: theory and practice. 2021. No. 5 (14). Pp. 41–47. DOI: 10.51608/26867818_2021_5_41. (rus)

20. Tang V.L., Nguyen Z.T.L. Pozzolanic activity of finely dispersed mineral components of various nature of Vietnam [Пуццоланическая активность тонкодисперсных минеральных компонентов различной природы Вьетнама]. Technique and technology of silicates. 2021. Vol. 28. No. 1. Pp. 7–12. (rus)

Information about the authors

Lukuttsova, Natalia P. Grand PhD. E-mail: natluk58@mail.ru. Bryansk State University of Engineering and Technology". Russia, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrov Avenue, 3.

Karpikov, Evgeny G. Senior lecturer. E-mail: johnjk@mail.ru. Bryansk State University of Engineering and Technology". Russia, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrov Avenue, 3.

Pykin, Aleksey A. PhD, Assistant professor, E-mail: alexem87@yandex.ru. Bryansk State University of Engineering and Technology". Russia, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrov Avenue, 3.

Panov, Dmitrij M. Student of the Nanokvantum direction. E-mail: pantava82@gmail.com. Technopark "Quantorium". Russia, 241012, Bryansk, st. Dimitrova, 114.

Received 09.09.2024

Для цитирования:

Лукутцова Н.П., Карпиков Е.Г., Пыкин А.А., Панов Д.М. Исследование пуццолановой активности добавки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 12. С. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-8-17

For citation:

Lukuttsova N.P., Karpikov E.G., Pykin A.A., Panov D.M. Investigation of the pozzolan activity of a highly dispersed wollastonite additive. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-8-17

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-18-27

Сивальнева М.Н.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: 549041@mail.ru

РЕОЛОГИЯ ВЯЖУЩИХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО ТИПА ТВЕРДЕНИЯ ПРИ ДИСПЕРСНОМ АРМИРОВАНИИ

Аннотация. Рассмотрено влияние дисперсно-армирующих добавок на реологию модельных систем вяжущих веществ различного типа твердения, а именно портландцемента и бесцементной высококонцентрированной вяжущей суспензии (ВВС) на основе кварцевого песка. Применялись базальтовая, стеклянная, целлюлозно-полимерная и поливинилспиртовая фибры. Получение и транспортирование пенобетонных смесей для обеспечения стабильности свойств целесообразно проводить в регулируемом структурном состоянии, поэтому реологические исследования являются эффективным инструментом оптимизации и контроля технологических процессов. Основные реологические зависимости определены на ротационном вискозиметре. Установлено, что применение фибры различных видов не изменяет тип течения смесей. Отличительные черты реологии различных вяжущих систем обусловлены особенностями структурообразования. Значения начальной вязкости цементных смесей связаны со сроками твердения и протеканием гидратационных процессов. Введение дисперсно-армирующих добавок в бесцементное вяжущее способствует образованию зернисто-волоконистых агрегатов, что и объясняет повышение первоначальной вязкости.

Определено, что использование фибры с более короткими волокнами способствует повышению подвижности смесей. Определены прочностные характеристики вяжущих, которые увеличиваются с введением фибры. Полученные результаты изучения реологических характеристик микроармированных вяжущих систем являются базой для регулирования подвижности фибропенобетонных смесей.

Ключевые слова: реология, бесцементное вяжущее, высококонцентрированная вяжущая суспензия, фибра, пенобетон.

Введение. Постоянно растущие требования к теплоизоляции зданий и сооружений определяют необходимость в современных строительных композитах соответствующей области назначения. На рынке теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных материалов лидирующие позиции занимают ячеистые бетоны. Основная особенность материалов данного вида – закрытая пористая структура, которая как раз и определяет теплотехнические показатели композита. Актуальность их использования и, в частности пенобетона, обоснована широким распространением и увеличивающейся областью применения за счет высокой экономической эффективности, вызванной сочетанием повышенной комфортности и минимальных строительных затрат. Несмотря на перспективность и ряд положительных сторон, пенобетон требует улучшения физико-механических свойств, которые связаны с его высокой пористостью и развитой системой связанных пор. В результате чего пенобетон не применяется для изготовления основных несущих элементов конструкций зданий, исключение может составлять индивидуальное и малоэтажное строительство [1].

Решением может являться применение дисперсного армирования [2–5], которое позволяет повысить прочностные характеристики, преимущественно

прочность на растяжение, трещиностойкость, ударную вязкость, усадку [6, 7], а также интенсифицировать процессы структурообразования и твердения бетона.

Как правило, в литературных источниках под дисперсно-армированными композитами понимают моноармированные материалы на классическом, т.е. цементном вяжущем, создающие произвольно направленную каркасную структуру упрочненных связей, влияние которых направлено на повышение физико-механических характеристик. В данном случае, основным показателем контроля выступает прочность на растяжение при изгибе, которая может увеличиваться более чем в 2 раза. Отмечается также повышение прочности на сжатие, но в значительно меньшей степени. При этом интенсивность роста физико-механических свойств зависит от вида фиброволокна, конкретного состава ячеистобетонной смеси с определенным значением водотвердого отношения [8], технологических режимов производства.

На рынке представлено большое количество видов фибр, отличающихся химическим составом, физико-механическими характеристиками, размерами и морфоструктурными особенностями поверхности волокон. Армирование бетонов выполняется металлическими, минеральными, органическими волокнами фибр [1, 9].

Наиболее востребованными в технологии дисперсно-армированных бетонов являются базальтовая, полипропиленовая, полиамидная, стеклянная фибры. Меньшее распространение получили хризотилевое, целлюлозно-полимерное, целлюлозное, углеродное, поливиниловое, капроновое и другие волокна.

В литературе зарубежных авторов часто встречаются упоминания об использовании в качестве армирующих компонентов натуральных волокон. Армирование данными волокнами позволяет получать материалы с высокими механическими свойствами, низкой плотностью и стоимостью. Кроме того, данные волокна являются биоразлагаемыми, возобновляемыми и экологичными [10, 11]. Их примером являются древесные и льняные волокна, волокна сизаля, кокосовой пальмы, джута, бамбука, крафт-целлюлозы и др., использование которых обеспечивает повышение прочности на изгиб, удар, растяжение, сжатие и вязкости разрушения [12, 13].

Однако применение натуральных волокон в строительных материалах на цементной основе ограничено в виду низкой стойкости к щелочной среде цементной матрицы, что приводит к деградации волокон, снижению гибкости и деформирующей способности из-за повышенной хрупкости, связанной с минерализацией волокон, что в совокупности вызывает снижение прочности и долговечности композита [14]. Способами борьбы с данным негативным фактором является предварительное нанесение полимерных покрытий, химическая и термическая обработка волокон [15].

Также возможно применение комплексного дисперсного армирования (полиармирования), заключающегося в сочетании волокон не только различных видов, но и геометрических параметров (преимущественно разной длины), обеспечивающих оптимальную комбинацию низко- и высокомодульных армирующих волокон, что позволяет достичь уменьшения усадочных деформаций при одновременном росте прочности на изгиб [8, 16, 17]. Данное направление дисперсного армирования нашло отражение во многих работах зарубежных авторов, сочетающих натуральные волокна с другими типами фибр. Так комплексное влияние различных синтетических и натуральных волокон сводится к росту физико-механических свойств пенобетона на цементном вяжущем, а именно незначительно увеличивает его прочность на сжатие, одновременно повышая прочность на растяжение до 3 раз, прочность на изгиб до 4 раз и ударную вязкость до 6 раз [8]. Также отмечается повышение прочности, функциональных характеристик и долговечности пенобетона за счет введения

фибры из поливинилового спирта и кокосового волокна [18].

Следует отметить, что дисперсно-армирующие компоненты оказывают влияние не только на качественные характеристики готового изделия, но и на растворные смеси, которые отличаются повышенной стабильностью, агрегативной и седиментационной устойчивостью [19, 20]. Применение фибры в процессе приготовления пенобетонной смеси воздействует на реологические свойства в ранний период твердения. Фибра является фактором, влияющим на процессы массопереноса, управляя качеством и периодом фазового перехода от вязкого состояния к твердому, несколько снижая среднюю плотность при условии ограничения трещиностойкости [6].

Материалы и методы. Основными сырьевыми компонентами при выполнении исследования являлись:

1) портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 Н (ЗАО «Белгородский цемент»), химического состава: $\text{CaO} - 66,43 \%$, $\text{SiO}_2 - 22,05 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 5,11 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 4,38 \%$, $\text{MgO} - 0,48 \%$, $\text{SO}_3 - 0,23 \%$, прочее – $1,32 \%$ и минералогического состава: $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 61,9 \%$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - \beta - 17,2 \%$, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 6,8 \%$, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - 13,5 \%$, прочее – $0,6 \%$;

2) бесцементная высококонцентрированная вяжущая суспензия силикатного состава, получаемая при постадийном помоле кварцевого песка (Корочанского месторождения Белгородской области) по мокрому способу в шаровой мельнице. Наличие нанодисперсной составляющей (менее $0,1 \text{ мкм}$) в количестве $10-14 \%$ обуславливает принадлежность к наноструктурированным вяжущим (НВ). Твердение ВВС осуществляется по негидратационному типу, а именно поликонденсационно-кристаллизационному механизму, заключающемуся в протекании на первом этапе процесса поликонденсации с участием водной составляющей в сшивке силоксановых связей и автоэпитаксиальной кристаллизацией аморфной составляющей на кристаллических частицах α -кварца на втором этапе. При этом исходный кремнезем является кварцем первой генерации, а новообразованный в процессе твердения – кварцем второй генерации [21]. Характеристики ВВС в естественном суспендированном состоянии: остаток на сите № 0063 – $0,7 \%$, вязкость – $12-14 \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\text{pH} - 7,7$, влажность 17% и характеристики камня: предел прочности при сжатии – $3,4 \text{ МПа}$, предел прочности при изгибе – $1,5 \text{ МПа}$, средняя плотность – $1800-2000 \text{ кг/м}^3$;

3) дисперсно-армирующие добавки для пенобетона представлены базальтовой фиброй (ООО «Каменный век», Россия, Московская область, г. Дубна), стекловолокном (ООО «Альянс

– Строительные технологии», Россия, Московская область, г. Дзержинский), целлюлозно-полимерной фиброй Buskeye UltraFiber 500 (компания «Buskeye Technologies Inc», США), фиброй на основе поливинилового спирта (ПВС-фиброй)

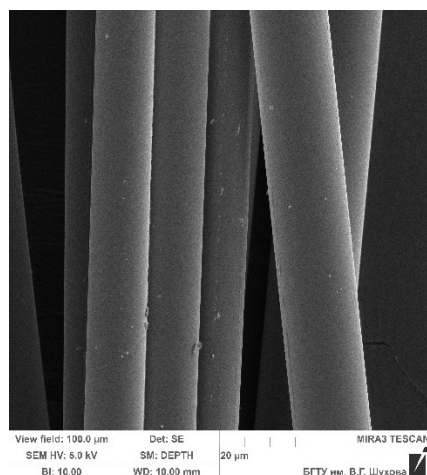
(«Курарай», Япония, г. Осака). Данные по размерным параметрам волокон предоставлены производителями (таблица 1).

Поверхность волокон была изучена с помощью сканирующего электронного микроскопа Mira 3 FesSem (рис. 1).

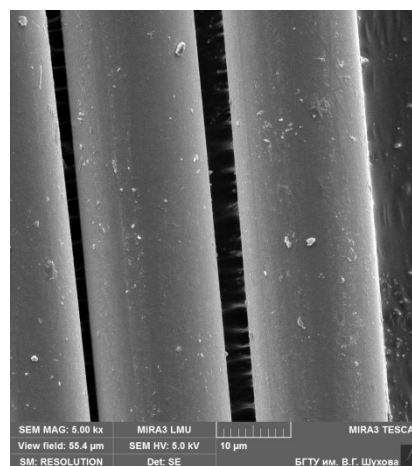
Таблица 1

Основные характеристики применяемой фибры

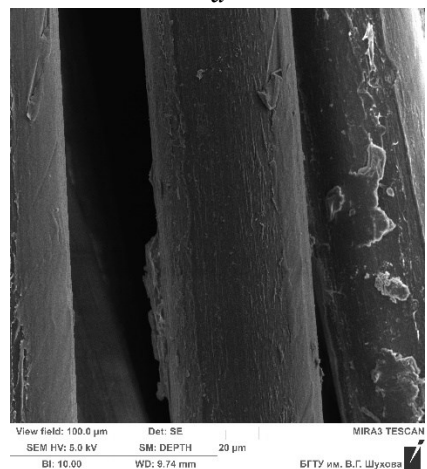
Фибра	Базальтовая	Стеклоанная	Целлюлозно-полимерная	ПВС-фибра
Длина волокна, мм	12,7	12	2,1	12
Диаметр волокна, мкм	10–22	6–21	18	38



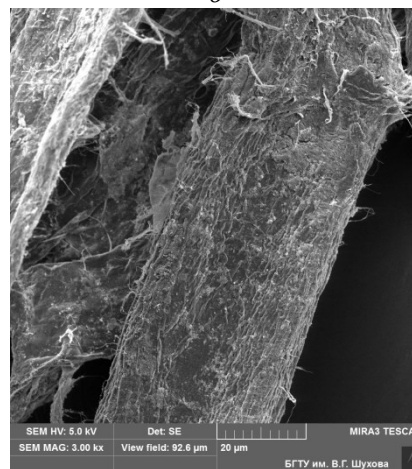
а



б



в



г

Рис. 1. Микроструктура поверхности волокон следующих фибр:
а – базальтовой; б – стеклянной; в – ПВС; г – целлюлозно-полимерной

Для изучения реологических характеристик были приготовлены смеси модельных систем на основе вяжущих различного типа твердения (портландцемента и ВВС), моно- и полиармированных разными волокнами. Следует отметить, что обычно пенобетон выступает многокомпонентной системой. В данном случае, с целью переноса полученных результатов изучалось влияние армирующих компонентов только на вяжущее, на основе которого будут получены ячеистые композиты. Поэтому исследуемые системы

именуются модельными. Водоцементное отношение (В/Ц) цементных смесей – 0,45. Дозировка фиброволокон составила 0,2 % от массы вяжущего, которая ориентирована на ранее выполненные исследования [22]. Полиармирование осуществлялось в соотношении 1:1. Съемка производилась на ротационном вискозиметре Rheotest RN4.1 при использовании измерительной системы «цилиндр–цилиндр». Суть измерений заключается в том, что свежеприготовленная смесь, помещенная в измерительный стакан, подвергается сдвиговым воздействиям в зазоре от

вращающейся внутренней насадки (шпинделя) и неподвижного цилиндра. Съемка осуществлялась при скорости вращения 120 мин^{-1} в течение 2 минут. Исследована реология вяжущих систем с той позиции, что результаты влияния фибры являются более наглядными и проецируются на пенобетонные смеси, полученные на основе двух различных вяжущих систем – портландцементе и бесцементной ВВС.

Прочностные характеристики армированных вяжущих определялись в соответствии с методикой ГОСТ 30744–2001.

Основная часть. Как известно, фибробетоны характеризуются сложной морфологией и полиструктурностью, обусловленными их гетерогенностью. Использование дисперсно-армирующих добавок способствует повышению структурной стойкости на различных этапах формирования, улучшению основных физико-механических (прочностных и деформативных) и теплофизических характеристик [2–4, 23]. При этом влияние оказывает не только состав, но и геометрические параметры волокон.

Полиармирование, т.е. одновременное армирование несколькими видами волокон, позволяет комплексно регулировать структурообразующие процессы и итоговые характеристики композита в широких пределах, исключая недостатки моноармирования. Особенность комбинированного армирования заключается в формировании пространственных ячеек на разных уровнях структуры композита, границы которых определяются параметрами армирования. При данном условии ограничивается формирование и распространение микродефектов на стадии трещинообразования. К тому же фиброволокна, с учетом высокой адгезии, эффективно работают в контактной зоне и приводят к снижению концентрации напряжений, воздействуя на весь композит в целом. Происходит рост прочностных характеристик [16, 17, 24].

При разработке фибробетонов следует руководствоваться рациональным выбором армирующих добавок, на который, в свою очередь, оказывают влияние следующие факторы: размер, вид и назначение готового изделия, предел прочности на растяжение при изгибе, предел прочности при сжатии, вязкость разрушения, удобоукладываемость смеси, в определенных случаях – морозостойкость, водонепроницаемость, истираемость и другие свойства.

Важным является представление о дисперсной арматуре как о части своеобразного заполнителя, который обладает развитой боковой поверхностью и оказывает серьезное влияние на реологические и технологические характери-

стики [17]. В свою очередь, получение и транспортирование бетонных смесей различного состава целесообразно проводить в структурном режиме, что обеспечивает стабильность свойств. Именно поэтому реологические исследования могут являться важным и эффективным инструментом оптимизации и контроля технологии материалов.

В работе были получены реограммы, которые указывают, что применение фибры не изменяет тиксотропный тип течения контрольных составов различных вяжущих систем, характеризующийся плавным снижением вязкости при одновременном росте градиента скорости сдвига до 25 с^{-1} (рис. 2 и 3).

Цементные системы показывают поведение реологически сложного тела с достаточно небольшим напряжением сдвига и эффективной вязкостью, значение которой последовательно снижается (рис. 2). Максимальный эффект наблюдается у образцов с комбинированным армированием целлюлозно-полимерной и ПВС-фибрами, при этом на начальном участке вязкость уменьшается на 80 % относительно исходной системы, на конечном – на 90 %. Исключение составляет цементная суспензия с базальтовой фиброй, начальная вязкость которой увеличивается на 14 % и при градиенте скорости сдвига 18 с^{-1} приближается к значениям контрольного состава. Течение систем с практически постоянной наименьшей вязкостью указывает на полное разрушение структуры суспензии. Преимущественно криволинейные зависимости напряжения сдвига от градиента скорости указывают на проявление псевдопластических свойств.

ВВС проявляют вязкопластичное поведение. Анализ кривых армированного бесцементного вяжущего показал, что большая часть образцов характеризуются повышением вязкости в пределах 29 % (рис. 3). Прямолинейные участки реологических кривых указывают на структурный режим, сопровождающийся вязким течением суспензии (рис. 3, б). Максимальные значения аналогично с цементными образцами достигаются у смеси с базальтовой фиброй. Понижением вязкости при нарастающей сдвиговой нагрузки характеризуются смеси с целлюлозно-полимерной фиброй и полиармированные поливинилспиртовыми и целлюлозно-полимерными волокнами. Таким образом, прослеживается зависимость реологических характеристик от геометрических параметров дисперсно-армирующих компонентов. Использование фибры с более короткими волокнами способствует повышению подвижности смесей, что указывает на целесообразность полиармирования волокнами разной длины.

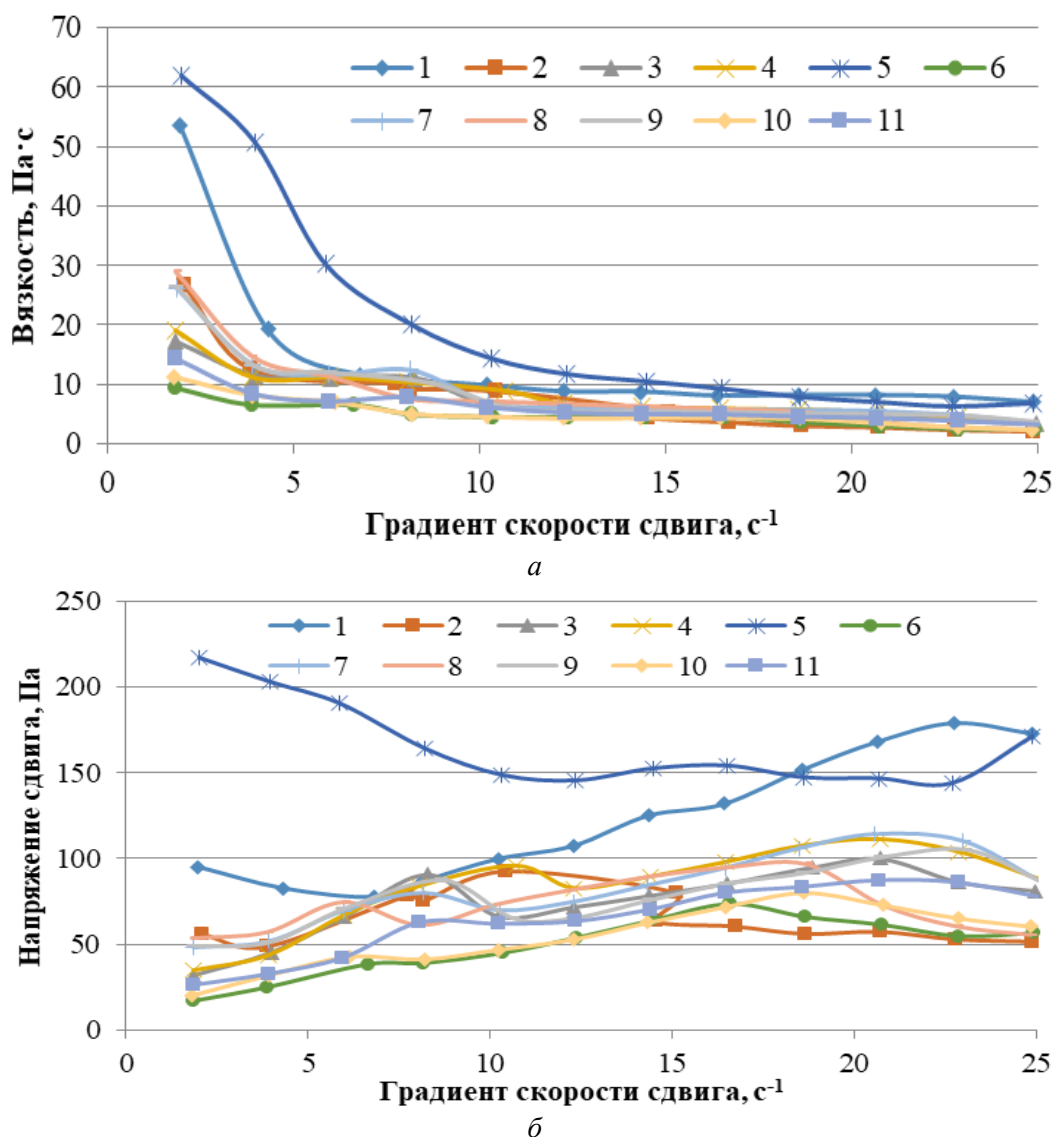


Рис. 2. Реограмма цементного теста, армированного различными фиброволокнами:

а – зависимость вязкости от градиента скорости сдвига;

б – зависимость напряжения сдвига от градиента скорости сдвига;

1 – контрольный состав, 2 – с целлюлозно-полимерной, 3 – с ПВС-фиброй, 4 – со стеклянной, 5 – с базальтовой, 6 – с целлюлозно-полимерной и ПВС-фиброй, 7 – со стеклянной и ПВС-фиброй, 8 – с базальтовой и ПВС-фиброй, 9 – со стеклянной и целлюлозно-полимерной, 10 – с базальтовой и целлюлозно-полимерной, 11 – с базальтовой и стеклянной

Можно предположить, что отличительные черты реологии вяжущих систем на основе цемента и ВВС обусловлены особенностями структурообразования. Повышенные значения начальной вязкости цементных смесей связаны со сроками твердения и протеканием структурообразующих процессов на начальном этапе за счет распределения твердой фазы в объеме дисперсионной среды и развития первичной гидратации портландцемента. Системы бесцементного вяжущего проявляют меньшую активность при формировании структурных элементов. Введение дисперсно-армирующих добавок способствует образованию зернисто-волокнистых агрегатов, что и объясняет повышение первоначальной вязкости. Следует отметить, что данное обстоятельство

может являться инструментом при повышении пластической прочности получаемых изделий и материалов.

Изучение основных физико-механических характеристик указывает на целесообразность применения дисперсно-армирующих добавок. Моноармирование бесцементных модельных систем повышает предел прочности при сжатии на 18–24 %, полиармирование – до 30 % (рис. 4). Данный результат находит объяснение в совместном действии использованных волокон, создавая многоуровневую структуру и сочетая преимущества каждой фибры. По сравнению с бездобавочным образцом ВВС, средняя плотность в зависимости от состава незначительно снижается.

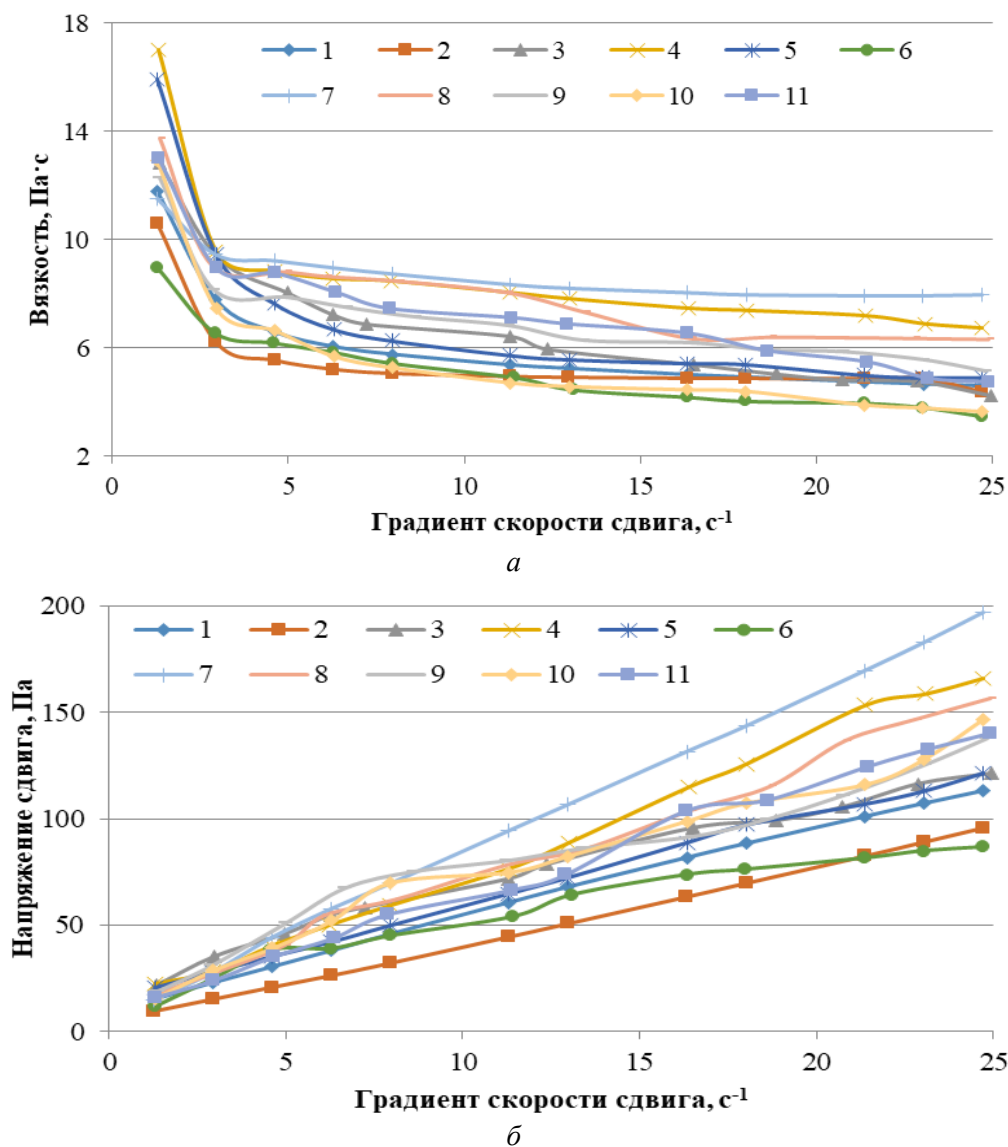


Рис. 3. Реограмма ВВС, армированной различными фиброволокнами:

а – зависимость вязкости от градиента скорости сдвига;

б – зависимость напряжения сдвига от градиента скорости сдвига;

1 – контрольный состав, 2 – с целлюлозно-полимерной, 3 – с ПВС-фиброй, 4 – со стеклянной, 5 – с базальтовой, 6 – с целлюлозно-полимерной и ПВС-фиброй, 7 – со стеклянной и ПВС-фиброй, 8 – с базальтовой и ПВС-фиброй, 9 – со стеклянной и целлюлозно-полимерной, 10 – с базальтовой и целлюлозно-полимерной, 11 – с базальтовой и стеклянной

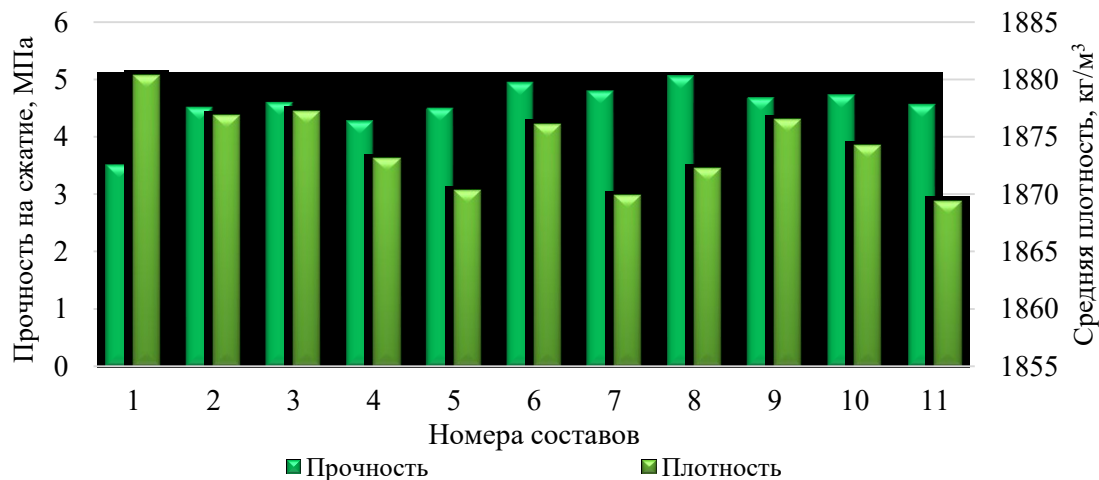


Рис. 4. Влияние фибры на основные физико-механические характеристики бесцементной системы ВВС (расшифровка составов указана на рис. 3)

Выводы

1. Установлено, что применение волокон фибры различных видов не изменяет тип течения растворных смесей на основе портландцемента и бесцементной высококонцентрированной вяжущей суспензии силикатного состава. Преимущественно низкие концентрации дисперсно-армирующей добавки в системах увеличивают подвижность.

2. Определена зависимость реологических характеристик от геометрических параметров волокон. Использование фибры с более короткими волокнами способствует снижению вязкости смесей, что указывает на целесообразность полиармирования волокнами разной длины.

3. Результаты изучения реологических характеристик армированных вяжущих систем различного типа твердения являются базой для регулирования подвижности фибропенобетонных смесей, получаемых на их основе.

4. Дисперсное армирование бесцементных модельных систем повышает прочностные характеристики, максимальный эффект достигается при комбинированном армировании (до 30 %).

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2023-0006 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gencel O., Nodehi M., Bayraktar O.Y., Kaplan G., Benli A., Gholampourf A., Ozbakkaloglu T. Basalt fiber-reinforced foam concrete containing silica fume: An experimental study // *Construction and Building Materials*. 2022. № 326. Article 126861. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126861.
2. Моргун В.Н. О динамике улучшения технологических и эксплуатационных свойств пенобетонов при их дисперсном армировании полипропиленовыми волокнами // *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023. Т. 2. № 4. С. 69–76. DOI: 10.23947/2949-1835-2023-2-4-69-76.
3. Голова Т.А., Магерамова И.А., Андреева Н.В. Технология производства неавтоклавных пенобетонов, дисперсно армированных модифицированными волокнами // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 1 (78). С. 126–135.
4. Баранова А.А., Боброва А.А. Дисперсное армирование ячеистого и мелкозернистого бетонов на основе микрокремнезема // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2019. № 9(4). С. 694–703. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-4-694-703.
5. Попов А.Л., Строкова В.В. Фибропенобетон автоклавного твердения с использованием композиционного вяжущего // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 38–44. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-770-5-38-44.
6. Моргун В.Н. Научное обоснование структурной модификации свойств пенобетонов // *Строительные материалы*. 2023. № 7. С. 29–35. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-815-7-29-35.
7. Рудкова А.С., Весова Л.М. Использование дисперсного армирования в малоэтажном строительстве из ячеистого бетона // *Инженерный вестник Дона*. 2019. № 2 (53). С. 43.
8. Строчкин В.Н., Крохин А.М., Савин В.И., Зимин С.Г. Дисперсное армирование ячеистого бетона как фактор улучшения его физико-механических свойств // *Вестник НИЦ Строительство*. 2020. № 1 (24). С. 132–147. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-1(24)-132-147.
9. Khan M., Shakeel M., Khan K., Akbar S., Khan A. A Review on Fiber-Reinforced Foam Concrete // *Engineering Proceedings*. 2022. Vol. 22. № 1. Article 13. DOI: 10.3390/engproc 2022022013.
10. Hoyos C.G., Zuluaga R., Gañán P., Pique T.M., Vazquez A. Cellulose nanofibrils extracted from fique fibers as bio-based cement additive // *Journal of Cleaner Production*. 2019. № 235. Pp. 1540–1548. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.292.
11. Frydrych M., Hýsek Š., Fridrichová L., Le Van S., Herclík M., Pechořciaková M., Le Chi H., Louda P. Impact of Flax and Basalt Fibre Reinforcement on Selected Properties of Geopolymer Composites // *Sustainability*. 2020. № 12. Article 118. DOI: 10.3390/su12010118.
12. Ahmad W., Farooq S.H., Usman M., Khan M., Ahmad A., Aslam F., Yousef R.A., Abduljabbar H.A., Sufian M. Effect of Coconut Fiber Length and Content on Properties of High Strength Concrete // *Materials*. 2020. № 13. Article 1075. DOI: 10.3390/ma13051075.
13. Okeola A.A., Abuodha S.O., Mwero J. Experimental Investigation of the Physical and Mechanical Properties of Sisal Fiber-Reinforced Concrete // *Fibers*. 2018. № 6. Article 53. DOI: 10.3390/fib6030053.
14. Tolêdo Filho R.D., Scrivener K., England G.L., Ghavami K. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites // *Cement and Concrete Composites*. 2000. № 22. Pp. 127–143. DOI: 10.1016/S0958-9465(99)00039-6.
15. Castillo-Lara J.F., Flores-Johnson E.A., Valadez-Gonzalez A., Herrera-Franco P.J., Carrillo J.G., Gonzalez-Chi P.I., Li Q.M. Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Foamed Concrete //

Materials. 2020. № 13. Article 3060. DOI: 10.3390/ma13143060.

16. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Khezhev T.A., Pukhareno Y.V. High-strength fine-grained fiber concrete with combined reinforcement by fiber // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13. № S8. Pp. 6407–6412. DOI: 10.3923/jeasci.2018.6407.6412.

17. Пухаренко Ю.В., Инчик В.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Проектирование составов полиармированных фибробетонов // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 3 (68). С. 118–122. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-118-122.

18. Raj B., Sathyan D., Madhavan M. K., Raj A. Mechanical and durability properties of hybrid fiber reinforced foam concrete // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 245. Article 118373. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118373.

19. Моргун Л.В., Вотрин Д.А. Управление скоростью фазового перехода в фибропенобетонных смесях с помощью длины армирующей фибры // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 5 (83). С. 47–52.

20. Аубакирова И.У., Пухаренко Ю.В. Формирование структуры фибропенобетона на макроуровне // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 4 (99). С. 77–82. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-4-77-82.

21. Строкова В.В., Сивальнева М.Н., Жерновский И.В., Кобзев В.А., Нелюбова В.В. Особенности механизма твердения наноструктурированного вяжущего // Строительные материалы. 2016. № 1–2. С. 62–69.

22. Kharkhardin A.N., Sivalneva M.N., Strokov V.V. Topological calculation of key parameters of fibre for production of foam concrete based on cement-free nanostructured binder // Nanotechnologies in construction-a scientific internet-journal. 2016. Vol. 8. № 4. Pp. 73–88. DOI: 10.15828/2075-8545-2016-8-4-73-88.

23. Строчкин В.Н., Крохин А.М., Савин В.И., Зимин С.Г. Дисперсное армирование ячеистого бетона как фактор улучшения его физико-механических свойств // Вестник НИЦ Строительство. 2020. № 1 (24). С. 132–147. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-1(24)-132-147.

24. Суворов И.О. Влияние дисперсного полиармирования на усадочные деформации фибропенобетона неавтоклавного твердения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 1. С. 32–35.

Информация об авторах

Сивальнева Мариана Николаевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: 549041@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 17.07.2024 г.

© Сивальнева М.Н., 2024

Sivalneva M.N.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: 549041@mail.ru

RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF BINDING SYSTEMS OF DIFFERENT TYPES OF CURING DURING REINFORCEMENT

Abstract. The influence of dispersed reinforcing additives on the rheology of model systems of binders of various types of hardening, specifically Portland cement and a cementless highly concentrated binding suspension (HCBS) based on quartz sand, is considered. Basalt, glass, cellulose-polymer and polyvinyl alcohol fibers were used. To ensure stable properties, it is advisable to produce and transport foam concrete mixtures in a controlled structural state, therefore rheological studies are an effective tool for optimizing and controlling technological processes. The main rheological dependencies were determined on a rotational viscometer. It has been established that the use of various types of fiber does not change the type of flow of the mixtures. The distinctive features of the rheology of various binder systems are due to the peculiarities of structure formation. The values of the initial viscosity of cement mixtures are related to the hardening time and the course of hydration processes. The introduction of dispersed reinforcing additives into cementless binder promotes the formation of granular-fibrous aggregates, which explains the increase in initial viscosity.

It has been determined that the use of shorter fibers improves the mobility of mixtures. The strength characteristics of binders have been determined, which increase with the introduction of fiber. The obtained

results of studying the rheological characteristics of micro-reinforced binder systems are the basis for regulating the mobility of fiber foam concrete mixtures.

Keywords: *rheology, cementless binder, highly concentrated binding suspension, fiber, foam concrete.*

REFERENCES

1. Gencel O., Nodehi M., Bayraktar O.Y., Kaplan G., Benli A., Gholampourf A., Ozbakkaloglu T. Basalt fiber-reinforced foam concrete containing silica fume: An experimental study. *Construction and Building Materials*. 2022. No. 326. Article 126861. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126861.
2. Morgun V.N. About Dynamics of Improving the Foam Concrete Technological and Operational Properties upon Disperse Reinforcement with Polypropylene Fibers [O dinamike uluchsheniya tekhnologicheskix i e'kspluatacionny'x svoystv penobetonov pri ix dispersnom armirovanii polipropilenovy'mi voloknami]. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2023. Vol. 2. No. 4. Pp. 69–76. DOI: 10.23947/2949-1835-2023-2-4-69-76. (rus)
3. Golova T.A., Magerramova I.A., Andreeva N.V. Production technology of non-autoclaved foam concrete, dispersed reinforced with modified fibers [Tekhnologiya proizvodstva neavtoklavny'kh penobetonov, dispersno armirovanny'kh modifizirovanny'mi voloknami]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturostroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture]*. 2020. No. 1. Pp. 126–135. (rus)
4. Baranova A.A., Bobrova A.A. Dispersed reinforcement of cellular and fine-grained concrete based on silica fume [Dispersnoe armirovanie yacheistogo i melkozernistogo betonov na osnove mikrokremnezema]. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate [Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost']*. 2019. Vol. 9. No. 4. Pp. 694–703. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-4-694-703. (rus)
5. Popov A.L., Stokova V.V. Fiber foam concrete of autoclave hardening with the use of composite binder [Fibropenobeton avtoklavnogo tverdeniya s ispol'zovaniem kompozitsionnogo vyazhushhego]. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2019. No. 5. Pp. 38–44. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-770-5-38-44. (rus)
6. Morgun V.N. Scientific justification for structural modification of foam concrete properties [Nauchnoe obosnovanie strukturnoj modifikatsii svoystv penobetonov]. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2023. No. 7. Pp. 29–35. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-815-7-29-35. (rus)
7. Rudkova A.S., Vesova L.M. The use of dispersed reinforcement in low-rise construction of cellular concrete [Ispol'zovanie dispersnogo armirovaniya v maloe'tazhnom stroitel'stve iz yacheistogo betona]. *Engineering journal of Don*. 2019. Vol. 2. No. 53. P. 43. (rus)
8. Strotskiy V.N., Krokhin A.M., Savin V.I., Zimin S.G. Dispersed reinforcement of cellular concrete as a factor of improvement of its physical and mechanical properties [Dispersnoe armirovanie yacheistogo betona kak faktor uluchsheniya ego fiziko-mekhanicheskikh svoystv]. *Bulletin of the Scientific Research Center "Construction"*. 2020. No. 1 (24). Pp. 132–147. DOI:10.37538/2224-9494-2020-1(24)-132-147. (rus)
9. Khan M., Shakeel M., Khan K., Akbar S., Khan A. A Review on Fiber-Reinforced Foam Concrete. *Engineering Proceedings*. 2022. Vol. 22. No. 1. Article 13. DOI: 10.3390/engproc.2022022013.
10. Hoyos C.G., Zuluaga R., Gañán P., Pique T.M., Vazquez A. Cellulose nanofibrils extracted from fique fibers as bio-based cement additive. *Journal of Cleaner Production*. 2019. No. 235. Pp. 1540–1548. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.292.
11. Frydrych M., Hýsek Š., Fridrichová L., Le Van S., Herclík M., Pechočiaková M., Le Chi H., Louda P. Impact of Flax and Basalt Fibre Reinforcement on Selected Properties of Geopolymer Composites. *Sustainability*. 2020. No. 12. Article 118. DOI: 10.3390/su12010118.
12. Ahmad W., Farooq S.H., Usman M., Khan M., Ahmad A., Aslam F., Yousef R.A., Abduljabbar H.A., Sufian M. Effect of Coconut Fiber Length and Content on Properties of High Strength Concrete. *Materials*. 2020. No. 13. Article 1075. DOI: 10.3390/ma13051075.
13. Okeola A.A., Abuodha S.O., Mwero J. Experimental Investigation of the Physical and Mechanical Properties of Sisal Fiber-Reinforced Concrete. *Fibers*. 2018. No. 6. Article 53. DOI: 10.3390/fib6030053.
14. Tolêdo Filho R.D., Scrivener K., England G.L., Ghavami K. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*. 2000. No. 22. Pp. 127–143. DOI: 10.1016/S0958-9465(99)00039-6.
15. Castillo-Lara J.F., Flores-Johnson E.A., Valadez-Gonzalez A., Herrera-Franco P.J., Carrillo J.G., Gonzalez-Chi P.I., Li Q.M. Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Foamed Concrete. *Materials*. 2020. No. 13. Article 3060. DOI: 10.3390/ma13143060.
16. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Khezhev T.A., Pukharenko Y.V. High-strength fine-grained fiber concrete with combined reinforcement by fiber. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13. No. S8. Pp. 6407–6412. DOI: 10.3923/jeasci.2018.6407.6412.

17. Pukharenko Yu.V., Inchik V.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Designing of poly-fiber-reinforced concrete compositions [Proektirovanie sostavov poliarmirovanny'kh fibrobetonov]. Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. 2018. Vol. 3. No. 68. Pp. 118–122. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-118-122. (rus)

18. Raj B., Sathyan D., Madhavan M. K., Raj A. Mechanical and durability properties of hybrid fiber reinforced foam concrete. Construction and Building Materials. 2020. Vol. 245. Article 118373. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118373.

19. Morgun L.V., Varyrin D.A. Controlling the rate of phase transition in fibro-concrete mixtures using the length of reinforcing fiber [Upravlenie skorost'yu fazovogo perekhoda v fibropenobetonny'kh smesyakh s pomoshh'yu dliny' armiruyushhej fibry']. Science and business: development ways. 2018. Vol. 5. No. 83. Pp. 47–52. (rus)

20. Aubakirova I.U., Pukharenko Yu.V. Fiber foam concrete structure formation at the macrolevel [Formirovanie struktury' fibropenobetona na makrourovne]. Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. 2023. Vol. 4. No. 99. Pp. 77–82. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-4-77-82. (rus)

21. Strokova V.V., Sivalneva M.N., Zhernovsky I.V., Kobzev V.A., Nelubova V.V. Features of hardening mechanism of nanostructured

binder [Osobennosti mekhanizma tverdeniya nanos-trukturirovannogo vyazhushchego]. Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2016. No. 1–2. Pp. 62–69. (rus)

22. Kharkhardin A.N., Sivalneva M.N., Strokova V.V. Topological calculation of key parameters of fibre for production of foam concrete based on cement-free nanostructured binder. Nanotechnologies in construction-a scientific internet-journal. 2016. Vol. 8. No 4. Pp. 73–88. DOI: 10.15828/2075-8545-2016-8-4-73-88.

23. Strotskiy V., Krokhnin A., Savin V., Zimin S. Dispersed reinforcement of cellular concrete as a factor of improvement of its physical and mechanical properties [Dispersnoe armirovanie yacheistogo betona kak faktor uluchsheniya ego fiziko-mekhanicheskikh svoystv]. Bulletin of the Scientific Research Center “Construction”. 2020. Vol. 1. No. 24. Pp. 132–147. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-1(24)-132-147. (rus)

24. Suvorov I.O. Influence of disperse polyreinforcement on shrinkage deformations of non-autoclave curing fibrofoam concrete [Vliyanie dispersnogo poliarmirovaniya na usadochny'e deformaczii fibropenobetona neavtoklavnogo tverdeniya]. Bulletin of Belgorod state technological University named after V.G. Shukhov. 2015. No. 1. Pp. 32–35. (rus)

Information about the authors

Sivalneva, Mariana N. PhD. E-mail: 549041@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 17.07.2024

Для цитирования:

Сивальнева М.Н. Реология вяжущих систем различного типа твердения при дисперсном армировании // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 12. С. 18–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-18-27

For citation:

Sivalneva M.N. Rheological behavior of binding systems of different types of curing during reinforcement. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 18–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-18-27

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-28-36

Агеева М.С., Фомина Е.В., Кикалишвили Д.Г., Шаповалова А.В.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: ageevams@yandex.ru*

РАЗРАБОТКА ЩЕЛОЧЕАКТИВИРОВАННЫХ ВЯЖУЩИХ НА ОСНОВЕ БАЗАЛЬТОВОЛОКНИСТЫХ ОТХОДОВ

Аннотация. Представленные в работе исследования направлены на решение вопросов утилизации техногенных отходов, как одного из наиболее важных в последнее время направлений, а именно, при производстве и эксплуатации утеплителя на основе каменной ваты. Возрастание отходов минеральной ваты связано с ее высокой востребованностью в строительной отрасли, как тепло- и звукоизолирующего материала. Причем доля отходов пропорционально возрастает и от ее производства, и от эксплуатации. Степень утилизации от производства остается высокой, путем повторного использования в качестве сырья, а от эксплуатации – низкой. В связи с этим применение отходов производства строительных материалов, образующихся от сноса зданий и сооружений стало одной из важнейших задач современного общества.

Важным свойством техногенных отходов от минерального утеплителя, влияющим на эффективность его вторичного использования, является химический состав, определяемый типом исходного минерального сырья, а, особенно, наличие аморфных силикатных фаз в этом материале. В исследовании была изучена возможность использования тонкомолотых отходов базальтоволокнистого утеплителя ($S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$) при получении щелочеактивированного вяжущего, а также проведена оптимизация концентрации активатора твердения. Рекомендовано использовать отходы в количестве не менее 58 %. При этом доля NaOH должна составить 0,2–0,3, а отношение вода/отход должно быть в пределах 0,35–0,4. Пересыщение раствора щелочью не приводит к значительному повышению прочностных характеристик материала, поэтому является нецелесообразным с экономической точки зрения.

Ключевые слова: щелочеактивированные вяжущие, техногенные отходы, базальтовый утеплитель, энергоэффективность строительства.

Введение. Повышение требований к энергоэффективности зданий и сооружений способствовало расширению использования теплоизоляционных материалов в строительстве и, следовательно, увеличению их отходов [1, 2]. Среди них можно выделить группу минераловатных утеплителей, куда относятся каменная вата, минеральная вата, стекловата и др., основными источниками отработанного волокнистого материала в которой являются, в меньшей степени, отходы, образующиеся при производстве, и в большей – в результате сноса зданий и сооружений. Ежегодно миллионы тонн отходов минераловатных утеплителей накапливаются на свалках и отрицательно влияют на окружающую среду. Так, по прогнозам некоторых ученых [3], их количество к 2030 году может увеличиться до 2,82 миллионов тонн.

Попадая на свалки, утеплитель, имея пористую структуру, накапливает большое количество загрязнителей, что в целом осложняет его дальнейшую переработку [4]. Однако существуют различные способы предварительной и повторной обработки подобных отходов, позволяющие решить данную проблему. Например, нагревание, промывка и измельчение. Последний

способ представляет особый интерес, так как позволяет получить гомогенную смесь частиц, которую возможно использовать при производстве различных строительных композитов. В этом случае положительным фактором будет являться получаемая развитая удельная поверхность механически активированного продукта.

Важным свойством техногенных отходов минерального утеплителя, влияющим на эффективность его вторичного использования, является химический состав, определяемый типом исходного минерального сырья, и, особенно, наличие аморфных силикатных фаз в этом материале. Известно, что параметры и условия процесса получения волокон влияют и на их размер – образуются волокна различной длины и ширины, а также на образование большего или меньшего количества сферических частиц – «корольков». При тонкофракционном измельчении таких материалов и в условиях щелочной активации они обладают вяжущими свойствами и могут быть использованы для получения щелочеактивированного вяжущего [3, 5–6]. Такие вяжущие образуются в ходе реакций растворения и дальнейшего химического взаимодействия алюмосиликатных соединений в сильнощелочной среде.

Материалы на основе щелочеактивированных вяжущих при оптимизации состава могут сочетать в себе высокие прочностные, защитные и экологические свойства [7–9], а также быть технологичными, экономичными и являться эффективными для многих отраслей современной строительной промышленности [10], обеспечивающих их эксплуатацию в экстремальных условиях. При этом решается проблема выбросов CO_2 , которые образуются при производстве цемента. По оценкам ученых, геополимерный бетон с минеральной ватой производит примерно на 80% меньше выбросов углекислого газа по сравнению с обычным бетоном, а конечный продукт может быть в два раза прочнее традиционного цементобетона. При этом обеспечивается экологически безопасная утилизация отходов производства и эксплуатации минераловатных утеплителей [11–14].

В работе была изучена возможность использования тонкомолотых отходов базальтоволокнистого утеплителя (БУ) для получения щелочеактивированных материалов.

Материалы и методы. Отходы производства базальтового утеплителя предварительно были высушены до постоянной массы, а затем измельчены в течение 1 минуты на планетарной мельнице до удельной поверхности $300 \text{ м}^2/\text{кг}$. Удельную поверхность вяжущих материалов определяли на приборе ПСХ-12.

С помощью 3-х факторного метода математического планирования эксперимента была осуществлена оптимизация концентрации щелочного активатора. Обработка результатов осуществлялась с помощью программ EXEL и SigmaPlot. В качестве щелочного активатора использовались гранулы гидроксида натрия (NaOH), которые предварительно перемешивали с водой для приготовления раствора щелочи. После перемешивания раствор нагревался, поэтому осуществляли его выдержку в течение минуты для остывания.

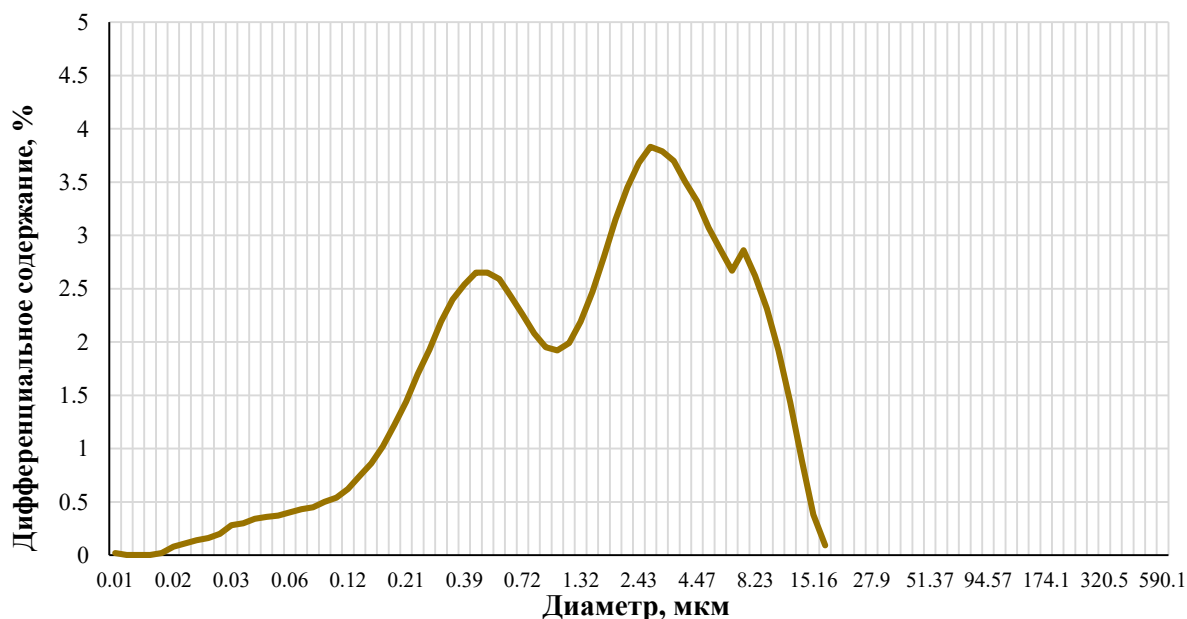
Далее осуществляли перемешивание тонкомолотых отходов производства минерального утеплителя (ТМУ) и раствора щелочи в течение 5 минут. Были заформованы образцы-кубики размером $2 \times 2 \times 2 \text{ см}$, при необходимости уплотняемые штыковой. Образцы предварительно выдерживались в течение суток в камере нормального твердения, а затем осуществлялась их сушка при температуре 65°C в течение 6 ч. Далее образцы остывали в закрытом сушильном шкафу в течение 12 часов. Затем хранились в естественных условиях в течение 7 суток. Далее определяли их прочность при сжатии.

Химический состав и график распределения частиц по размерам молотых отходов ТМУ приведен в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1

Химический состав отходов производства базальтоволокнистого утеплителя

Оксиды	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$	Другое
Базальтовое волокно	44,11	12,26	9,44	16,00	13,19	2,971	2,27

Рис. 1. Распределение частиц отхода ТМУ по размерам $S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$

На графике отчетливо видно, что кривая распределений частиц по размерам находится в диапазоне 0,02–16 мкм, т.е. смещена в область мелких значений. Имеет два явных пика в диапазоне 0,21–0,72 мкм и 1,32–8,23 мкм (рис. 1). Наличие тонкодисперсных частиц обеспечивает возрастание поверхности их контакта, что значительно активизирует процессы взаимодействия компонентов при твердении.

Основная часть. Рассматриваемая щелочеактивированная вяжущая система по своему компонентному составу способна реализовать процесс структурообразования по геополимерному принципу. В работе Дж. Давидовича [15] отмечается, что для синтеза прочных геополимерных материалов необходимо соблюдать условия, при которых соотношения в сырье $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ колеблются в пределах 3,5–4,5. В этом случае образуется достаточное количество активного оксида Si и Al в щелочной среде вяжущего. В отходе ТМУ соотношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3,59$.

Однако в исследованиях [16] говорится, что прочность при сжатии образцов геополимеров из отходов производства минеральной ваты увеличивается в 2,5–3 раза с увеличением модуля кис-

лотности отхода с 1 до 1,4. Дальнейшее увеличение модуля кислотности до 2 приводит к падению прочности при сжатии почти на 40 %. Расчетный модуль кислотности отхода тонкомолотого минерального утеплителя (Мк) составил 1,93.

Для проведения оптимизации концентрации активатора твердения для щелочеактивированного вяжущего в качестве варьируемых факторов были выбраны:

- массовая доля тонкомолотых отходов минерального утеплителя в составе вяжущего, (x1);
- массовая доля гидроксида натрия NaOH, (x2).
- отношение воды (В) к ТМУ, (x3).

В качестве функции отклика была выбрана прочность на сжатие в возрасте 7 суток, $R_{сж}$, МПа.

По результатам поисковых экспериментальных исследований были определены диапазоны варьирования факторов (табл. 2).

Матрица планирования, на основании которой проводились экспериментальные исследования, представлена в таблице 3.

Таблица 2

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Уровни варьирования			Интервал варьирования
	-1	0	1	
x1 – доля ТМУ	0,6	0,9	1,2	0,3
x2 – доля NaOH	0,2	0,3	0,4	0,1
x3 – В/ТМУ	0,35	0,45	0,55	0,1

Таблица 3

Матрица планирования и результаты эксперимента

№ состава	Кодированное значение переменных			Значение переменных в натуральном выражении			Состав смеси, %			Концентрация раствора щелочи, %	$R_{сж}$, МПа
	x1	x2	x3	ТМУ	NaOH	В/ТМУ	ТМУ	NaOH	В		
1	1	1	1	1,2	0,4	0,55	53	18	29	37,7	4,24
2	-1	1	1	0,6	0,4	0,55	45	30	25	54,8	1,3
3	1	-1	1	1,2	0,2	0,55	58	10	32	19	11
4	-1	-1	1	0,6	0,2	0,55	53	18	29	37,7	3,98
5	1	1	-1	1,2	0,4	0,35	59	20	21	48,7	10
6	-1	1	-1	0,6	0,4	0,35	50	33	17	65,6	2,08
7	1	-1	-1	1,2	0,2	0,35	66	11	23	24,4	9,74
8	-1	-1	-1	0,6	0,2	0,35	59	20	21	48,7	9,5
9	1	0	0	1,2	0,3	0,45	58,9	15,1	26	35,7	7,2
10	-1	0	0	0,6	0,3	0,45	51	26	23	52,6	3,1
11	0	1	0	0,9	0,4	0,45	53	23	24	49,7	3,5
12	0	-1	0	0,9	0,2	0,45	60	13	27	33	7,8
13	0	0	1	0,9	0,3	0,55	53	18	29	37,7	4,9
14	0	0	-1	0,9	0,3	0,35	58,8	20	21,2	48,8	9,6
15	0	0	0	0,9	0,3	0,45	56	19	25	42,6	6,8

Составы 1–4, 10, 11, 13, 15 обладали более жидкой консистенцией. У состава 2 после формирования образцов наблюдалось отслаивание воды, что объясняется ее перерасходом. В составе 6 смесь была рыхлой, мало жидкой фазы.

На образцах 2, 6 и 10 после высушивания в сушильном шкафу формировался белый слой на поверхности (рис. 2). Это связано с высокой кон-

центрацией раствора щелочи и, соответственно, пересыщением состава, что приводит к выделению не вступившего в реакцию активатора в виде высолов на поверхности. У образцов 1, 4, 11 отмечена мелкопористая структура, а у составов 11, 15 – наличие более крупных пор, что связано с повышенным содержанием воды. Образцы 5, 7, 8, 10, 12, 14 не имели каких-либо дефектов.

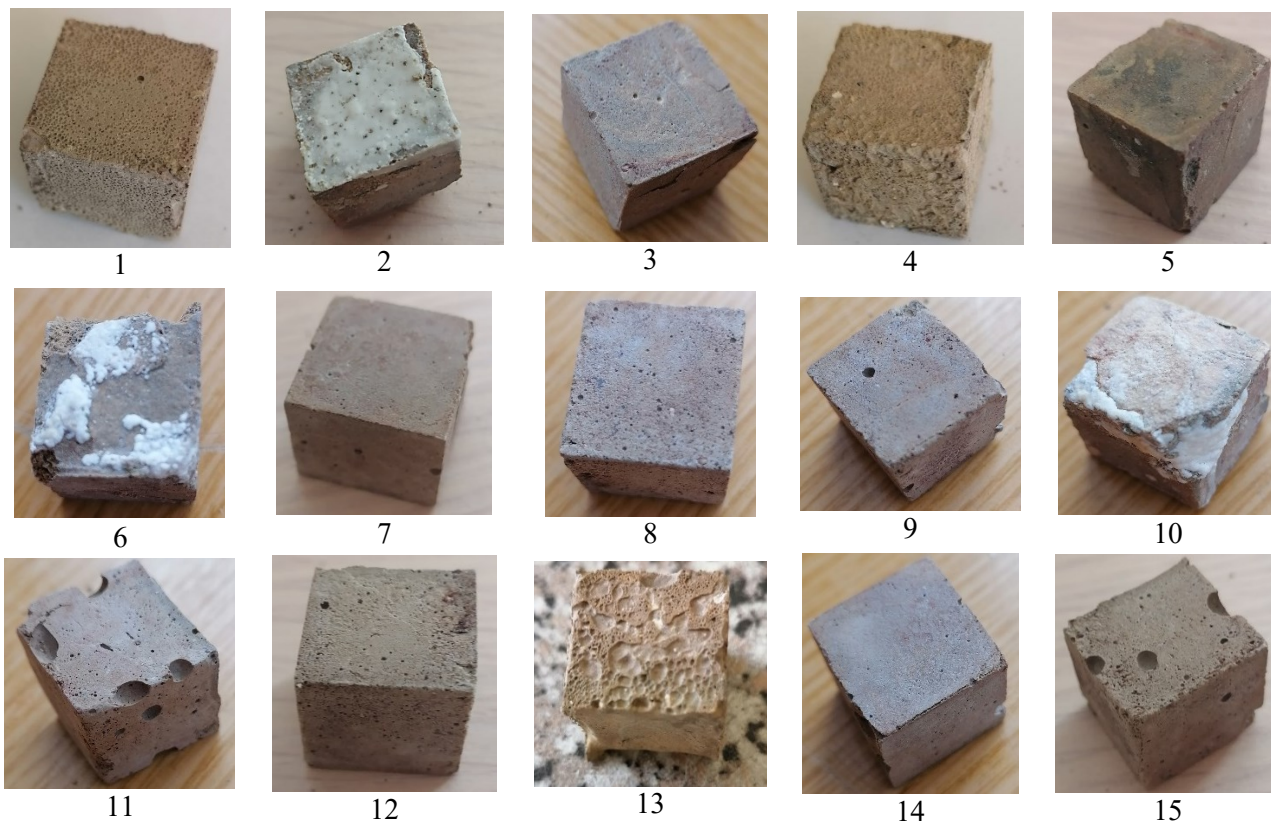


Рис. 2. Общий вид образцов щелочеактивированного вяжущего

После обработки полученных экспериментальных данных методом математического планирования были получено уравнение регрессии и

$$R_{сж} = 6,08 + 2,12X_1 - 2,19X_2 - 1,55X_3 - 0,75X_1^2 - 0,25X_2^2 + 1,35X_3^2 + 0,45X_1X_2 + 0,35X_2X_3 - 0,16X_1X_3 - 1,49X_1X_2X_3 \quad (1)$$

Адекватность модели составила 0,983.

Анализ полученного уравнения регрессии, показал, что наиболее значимыми факторами в уравнении будут являться расходы тонкомолотого ТМУ и щелочи, так как коэффициенты по абсолютному значению у них практически равны. Однако при увеличении x_1 прочность будет повышаться, а x_2 – снижаться. При возрастании отношения В/ТМУ прочность значительно снижается при всех расходах NaOH и уменьшении количества ТМУ. Положительные коэффициенты при произведении x_1 и x_2 , x_2 и x_3 говорят о возрастании прочности материала при увеличении произведения этих параметров, но снижении при одновременном увеличении всех трех (рис. 3).

его графическая интерпретация (рис. 3).

Максимальные прочности (8–11 МПа) получены у образцов 3, 5, 7, 8, 14. Проанализировав составы этих образцов, можно отметить, что расход отходов БУ во всех вариантах был выше 58% (58, 59, 66%). Сокращение количества отхода базальтоволоконного утеплителя ниже 58% приводит к падению прочности по результатам, полученным в рамках проведенного эксперимента. Пересыщение раствора щелочью также нецелесообразно с экономической точки зрения, так как не приводит к повышению прочностных характеристик материала. Таким образом, максимальные прочностные показатели достигается при расходе ТМУ 1–1,2; NaOH=0,2–0,3; В/ТМУ=0,35–0,4.

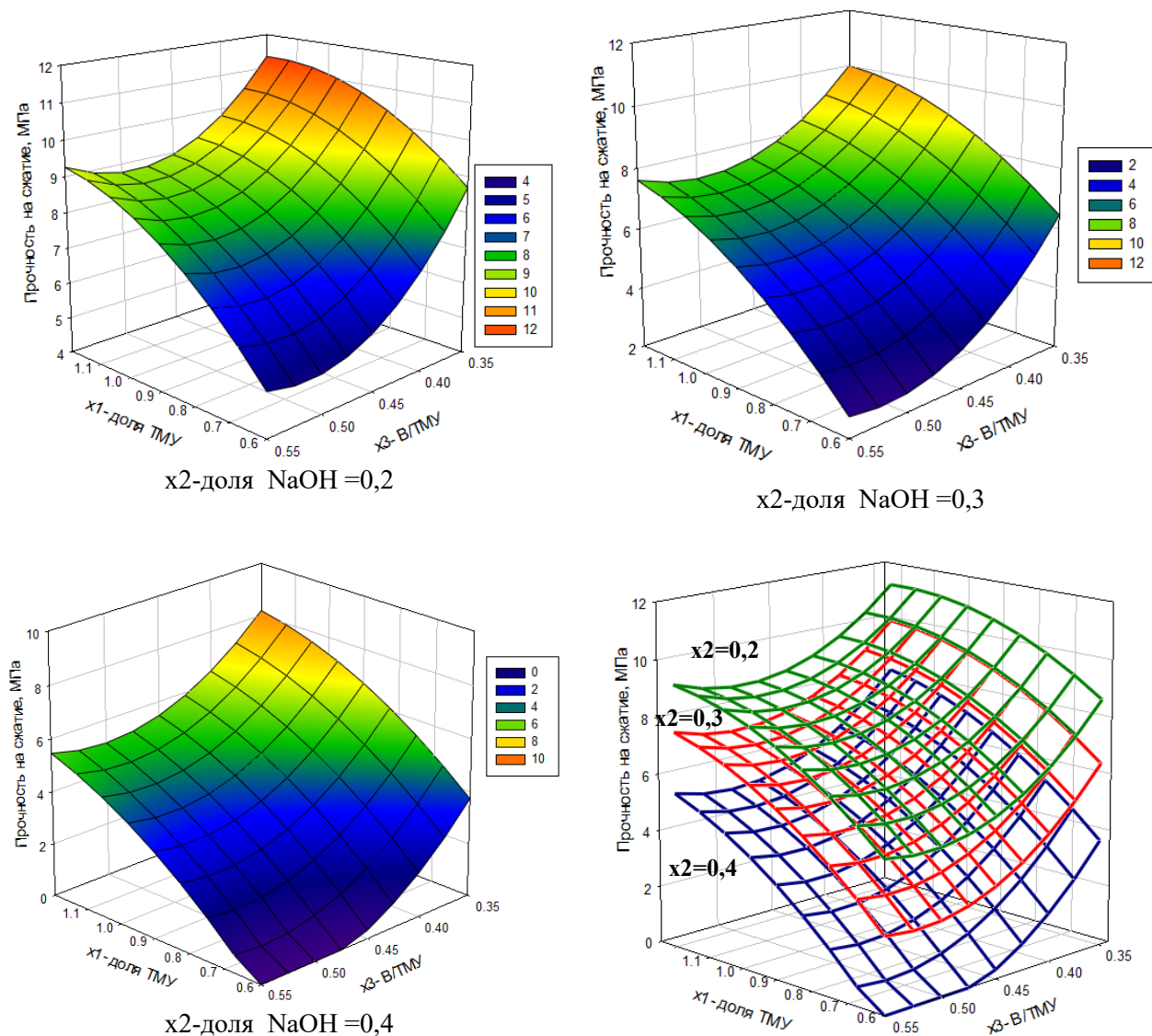


Рис. 3. Зависимость прочности щелочеактивированного вяжущего от концентрации щелочного активатора и В/ТМУ отношения

Далее была изучена микроструктура образцов 3, 5, 7, поскольку у составов 5, 8, 14 концентрация активатора практически совпадает (колеблется в пределах 48,4–48,7 %) (рис. 4).

Согласно традиционным представлениям о геополимеризации, на первой стадии кинетика процесса определяется растворением алюмосиликатных соединений и переходом в раствор ионов Na^+ , что обеспечивает повышение pH-показателя на начальном этапе полимеризации. Соединения Si-O-Si и Al-O-Si разрушаются в высококонцентрированном щелочном растворе и переходят в коллоидное состояние. Затем количество коллоидных частиц возрастает, и в результате наблюдается их уплотнение в существующем объеме, в результате структура уплотняется. Анализ микрофотографий выявил схожую структуру материалов, в которой отчетливо

прослеживаются волокна ТМУ по всей исследуемой поверхности. Наблюдается хорошее обрастание последних новообразованиями пластинчатой формы, предположительно натриевыми и кальциевыми гидроалюмосиликатами, а также присутствие значительной доли аморфной составляющей, что свидетельствует о процессе твердения вяжущего по геополимеризационному механизму. При этом у образца 3 можно заметить наличие более плотной матрицы (концентрация щелочи 19 %) с менее различимыми волокнами в общей структуре, по сравнению с составами с большей концентрацией щелочи. Тогда как у образца 5 с концентрацией раствора щелочи 48,8 % заметно увеличение толщины волокон по сравнению с другими образцами, за счет обрастания как новообразованиями, так и не вступившим в реакцию гидроксидом натрия.

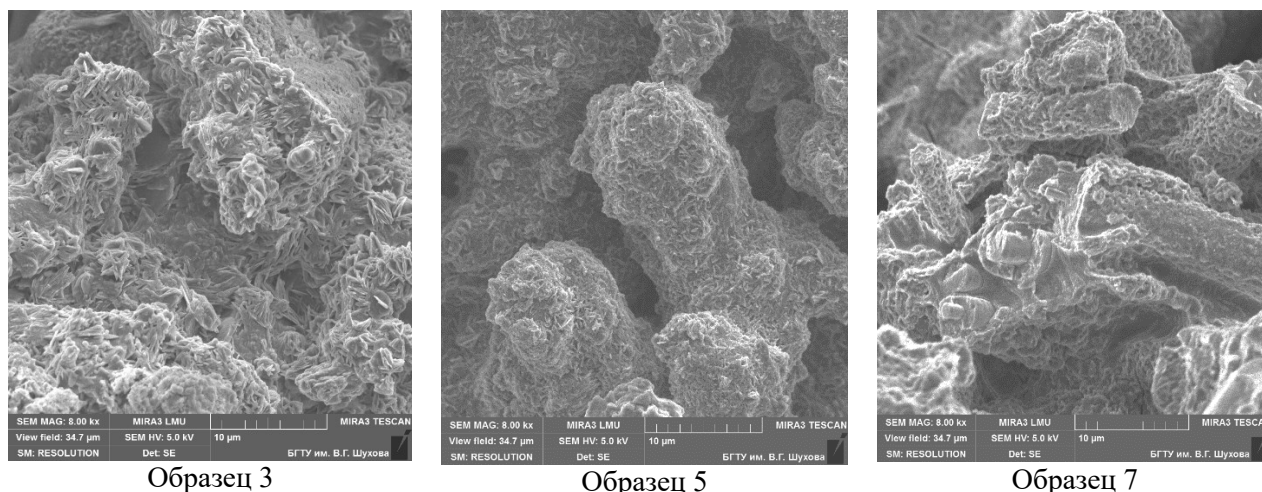


Рис. 4. Микроструктура образцов щелочеактивированного вяжущего на основе ТМУ

Выводы. Таким образом, подтверждена возможность использования тонкомолотых отходов базальтоволокнистого утеплителя ($S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$) при получении щелочеактивированного вяжущего. Рекомендовано использовать отходы в количестве не менее 58 %. При этом доля NaOH должна составить 0,2–0,3, а отношение В/ТМУ должно быть в пределах 0,35–0,4. Пересыщение раствора щелочью не приводит к значительному повышению прочностных характеристик материала, поэтому является нецелесообразным с экономической точки зрения.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках национального проекта «Наука и университет» по созданию новой лаборатории «Разработка, исследования и опытно-промышленная апробация наукоемких технологий и технических средств для производства полимерсодержащих композиционных смесей и изделий из техногенных органоминеральных компонентов» (проект FZWN-2024-0002) с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении. Белгород, 2016. 206 с.
2. Сулейманова Л.А. Высококачественные энергосберегающие и конкурентоспособные строительные материалы, изделия и конструкции // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. №1. С. 9–16.
3. Yliniemi J., Kinnunen P., Karinkanta P., Illikainen M. Utilization of Mineral Wools as Alkali-Activated Material Precursor // Materials. 2016. Vol. 9(5). 312. DOI: 10.3390/ma9050312
4. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Бочкин В.С., Якунин В.В., Ермаков А.А. Легкие геополимеры

из отходов производства минеральной ваты // Инженерно-строительный журнал. 2020. №1(93). С. 3–12. DOI: 10.18720/MCE.93.1

5. Ding Z., Zhu M., Tam V.W.Y., Yi G., Tran C.N. A system dynamics-based environmental benefit assessment model of construction waste reduction management at the design and construction stages // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 176. Pp. 676–692. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.101

6. Tam V.W.Y., Lu W. Construction waste management profiles, practices, and performance: A cross-jurisdictional analysis in four countries // Sustainability. 2016. Vol. 8(2). 190. DOI: 10.3390/su8020190

7. Kozhukhova N.I., Lebedev M.S., Vasilenko M.I., Goncharova E.N. Ecology-toxicology study of low-calcium solid wastes from power plants // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Vol. 8, No. 3. Pp. 15349–15360.

8. Kozhukhova N.I. Zhernovsky I.V., Strokova V.V. Evaluation of geopolymer binders biopositivity based on low-calcium fly // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10, No. 15. Pp. 35618–35620.

9. Разуева Е.А., Парфенова Л.М. Кинетика твердения золошлакощелочного вяжущего // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. 2019. № 16. С. 35–40.

10. Kozhukhova N., Kadyshchev N., Cherevatova A., Voitovich E., Lushin K. Reasonability of Application of Slags from Metallurgy Industry in Road Construction // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. Vol. 692. Pp. 776–782. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_82

11. Yliniemi J., Ramaswamy R., Luukkonen T., Laitinen O., de Sousa Á.N., Huuhtanen M., Illikainen M. Characterization of mineral wool waste chemical composition, organic resin content and fiber dimensions: Aspects for valorization // Waste Manag. 2021

Vol. 131. Pp 323–330. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.06.022

12.Yliniemi J., Laitinen O., Kinnunen P., Illikainen M. Pulverization of fibrous mineral wool waste // Journal of Material Cycles and Waste Management 2018 Vol. 20. Pp. 1248–1256. DOI: 10.1007/s10163-017-0692-3

13.Nielsen E., Nørhede P., Ladefoged O., Tobiassen L., Evaluation of health hazards by exposure to Mineral wools (glass, stone/slag, HT) and proposal of a health-based quality criterion for ambient, Denmark. 2013 30 p.

14.Kinnunen P., Yliniemi J., Talling B., Illikainen M. Rockwool waste in fly ash geopolymer composites // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2016. Vol. 19. No. 3. Pp. 1220–1227. DOI: 10.1007/s10163-016-0514-z

15.Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications, 5th Ed. Publisher: Geopolymer Institute. 2020. 698 p.

16.Ерофеев В.Т., Родин А.И., Якунин В.В., Тувин М.Н. Структура, состав и свойства геополимеров из отходов минеральной ваты // Инженерно-строительный журнал. 2019. № 6(90). С. 3–14. DOI: 10.18720/MCE.90.1

Информация об авторах

Агеева Марина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: ageevams@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Фомина Екатерина Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: fomina.katerina@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кикалишвили Диана Геловна, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: di_ki93@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шаповалова Анастасия Валерьевна, аспирант кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: asasarov97@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 06.11.2024 г.

© Агеева М.С., Фомина Е.В., Кикалишвили Д.Г., Шаповалова А.В., 2024

**Ageeva M.S., Fomina E.V., Kikalishvili D.G., Shapovalova A.V.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

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

DEVELOPMENT OF ALKALI-ACTIVATED BINDERS BASED ON BASALT FIBER WASTE

Abstract. The research presented in the work is aimed at solving the issues of man-made waste disposal, namely in the production and operation of insulation based on stone wool, as one of the most important areas in recent times. The increase in waste of mineral wool is due to its high demand in the construction industry as a heat and sound insulation material. Moreover, the share of waste increases proportionally from both its production and operation. At the same time, utilization from production remains high, through reuse as raw materials, and from operation – low. In this regard, the use of waste from the production of building materials generated from the demolition of buildings and structures has become one of the most important tasks of modern society.

An important property of man-made waste of mineral insulation, affecting the efficiency of its secondary use, is the chemical composition determined by the type of initial mineral raw materials, and especially the presence of amorphous silicate phases in this material. In the study, the possibility of using finely ground waste of basalt fiber insulation (Sud. = 300 m²/kg) in the production of an alkali-activated binders was studied, and the concentration of the hardening activator was optimized. It is recommended to use waste in an amount of at least 58%. At the same time, the proportion of NaOH should be 0.2–0.3, and the water/waste ratio should be within 0.35–0.4. Supersaturation of the solution with alkali does not lead to a significant increase in the strength characteristics of the material, therefore it is inexpedient from an economic point of view.

Keywords: alkali-activated binders, man-made waste, basalt insulation, energy efficiency of construction.

REFERENCES

1. Lesovik V.S. Geonics (geomimetics). Examples of implementation in construction materials science [Geonika (geomimetika). Primery realizatsii v stroitel'nom materialovedenii] Belgorod: BSTU 2016, 206 p. (rus)
2. Suleimanova L.A. High-quality energy-saving and competitive building materials, products and structures [Vysokokachestvennyye energosberegayushchiye i konkurentosposobnyye stroitel'nyye materialy, izdeliya i konstruksii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 1. Pp. 9–16. (rus)
3. Yliniemi J., Kinnunen P., Karinkanta P., Illikainen M. Utilization of Mineral Wools as Al-kali-Activated Material Precursor. Materials. 2016. Vol. 9(5). 312. DOI:10.3390/ma9050312(rus)
4. Erofeev V.T., Rodin A.I., Bochkov V.S., Yakunin V.V., Ermakov A.A. Lightweight geopolymers from mineral wool production waste [Legkiye geopolimery iz otkhodov proizvodstva mineral'noy vaty] Engineering and Construction Journal. 2020. No. 1(93). Pp. 3–12. DOI: 10.18720/MCE.93.1
5. Ding Z., Zhu M., Tam V.W.Y., Yi G., Tran C.N. A system dynamics-based environmental benefit assessment model of construction waste reduction management at the design and construction stages. Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 176. Pp. 676–692. DOI:10.1016/j.jclepro.2017.12.101
6. Tam V.W.Y., Lu W. Construction waste management profiles, practices, and performance: A cross-jurisdictional analysis in four countries. Sustainability. 2016. Vol. 8(2). 190. DOI:10.3390/su8020190
7. Kozhukhova N.I., Lebedev M.S., Vasilenko M.I., Goncharova E.N. Ecology-toxicology study of low-calcium solid wastes from power plants. International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Vol. 8, No. 3. Pp. 15349–15360.
8. Kozhukhova N.I. Zhernovsky I.V., Strokova V.V. Evaluation of geopolymer binders biopositivity based on low-calcium fly. International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10, No. 15. Pp. 35618–35620.
9. Razueva E.A., Parfenova L.M. Kinetics of hardening of ash-alkali binder [Kinetika tverdeniya zoloshlakoshchelochnoy vyazhushchego]. Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences. 2019. No. 16. Pp. 35–40. (rus)
10. Kozhukhova N., Kadyshchev N., Cherevatova A., Voitovich E., Lushin K. Reasonability of Application of Slags from Metallurgy Industry in Road Construction. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. Vol. 692. Pp. 776–782. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_82
11. Yliniemi J., Ramaswamy R., Luukkainen T., Laitinen O., de Sousa Á.N., Huuhtanen M., Illikainen M. Characterization of mineral wool waste chemical composition, organic resin content and fiber dimensions: Aspects for valorization. Waste Manag. 2021 Vol. 131. Pp. 323–330. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.06.022
12. Yliniemi J., Laitinen O., Kinnunen P., Illikainen M. Pulverization of fibrous mineral wool waste. Journal of Material Cycles and Waste Management 2018 Vol. 20. Pp. 1248–1256. DOI: 10.1007/s10163-017-0692-3
13. Nielsen E., Nørhede P., Ladefoged O., Tobiasen L., Evaluation of health hazards by exposure to Mineral wools (glass, stone/slag, HT) and proposal of a health-based quality criterion for ambient, Denmark, 2013. 30 p.
14. Kinnunen P., Yliniemi J., Talling B., Illikainen M. Rockwool waste in fly ash geopolymer composites. Journal of Material Cycles and Waste Management. 2016. Vol. 19. No. 3. Pp. 1220–1227. DOI: 10.1007/s10163-016-0514-z
15. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications, 5th Ed. Publisher: Geopolymer Institute. 2020. 698 p.
17. Erofeev V.T., Rodin A.I., Yakunin V.V., Tuvvin M.N. Structure, composition and properties of geopolymers from mineral wool science [Struktura, sostav i svoystva geopolimeroz iz otkhodov mineral'noy vaty] waste Engineering and construction journal. 2019. No. 6. Pp. 3–14. DOI: 10.18720/MCE.90.1 (rus)

Information about the author

Ageeva, Marina S., PhD, Assistant professor. E-mail: ageevams@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Fomina, Ecatherine V., PhD, Assistant professor. E-mail: fomina.katerina@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kikalishvili Diana G., Postgraduate student. E-mail: di_ki93@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Shapovalova, Anastasya V., Postgraduate student. E-mail: asasapov97@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 06.11.2024

Для цитирования:

Агеева М.С., Фомина Е.В., Кикалишвили Д.Г., Шаповалова А.В. Разработка щелочеактивированных вяжущих на основе базальтоволокнистых отходов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 12. С. 28–36. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-28-36

For citation:

Ageeva M.S., Fomina E.V., Kikalishvili D.G., Shapovalova A.V. Development of alkali-activated binders based on basalt fiber waste. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 28–36. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-28-36

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-37-46

¹Меркулов С.И., ²Сулейманова Л.А., ²Есипов С.М., ²Кашиба С.О., ²Лесовик Г.А.¹Курский государственный университет²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. В статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований железобетонных элементов, подвергнутых изгибу с кручением при различных соотношениях крутящего и изгибающего моментов. Целью исследования было сопоставление и оценка сходимости результатов практического испытания элементов с прогнозируемыми параметрами, разработанными на этапе создания новой методики экспериментальных исследований. Было установлено, что работа узлов и приборов испытательного стенда в высокой степени соответствует ожидаемым параметрам. Были изучены технологические особенности проведения испытания, измерены и проанализированы величины отклонений показаний измерительных приборов, фиксирующих как напряженно-деформированное состояние образцов, так и линейных и угловых перемещений точек испытательного стенда. Это позволяет более полно оценить действительную работу образца и выполнить поправку на потенциальную энергию деформирования испытательной машины. Также в статье рассмотрены результаты не только кратковременных, но и длительных испытаний с использованием деталей стенда-оголовников, фиксирующих положение элемента после деформации. Можно сделать вывод о том, что предложенная методика и конструкция испытательного стенда позволяет наиболее полно реализовать условия идеализации работы железобетонного элемента при изгибе с кручением для экспериментального исследования, что позволяет выполнять оценку несущей способности и деформативности элементов на любых этапах жизненного цикла с высокой степенью точности.

Ключевые слова: длительные испытания, железобетонный элемент, изгиб с кручением, верификация испытаний.

Введение. Одновременное воздействие на элемент внешних нагрузок, вызывающих изгиб и кручение относительно продольной оси, является весьма сложным для описания напряженно-деформированным состоянием, над корректным описанием которого трудятся многие ученые. Для создания единой теории работы железобетонных элементов требуются многочисленные экспериментальные исследования, позволяющие собрать базу данных результатов для апробирования и верификации разрабатываемых методов расчета. Одним из направлений данной работы является создание многофункциональных испытательных установок [1–2]. Однако, разработчики подобного оборудования зачастую игнорируют некоторые факторы действительной работы самой испытательной рамы (стенда), что приводит к искажению результатов. К таким факторам относятся: изгибная жесткость балочных элементов, крутильная жесткость узлов опирания, высокая деформативность точек приложения нагрузки и весьма условная реализация способов фиксации образцов в деформированном состоянии. Чтобы корректно производить учет данных факторов необходимо провести верификацию испытательного стенда в близких к реальным условиям и зафиксировать перемещения (линейные и угловые) точек основных узлов, при необходимости дополнить это регистрацией деформаций

длительных испытаний и рассчитать зависимости деформаций стенда от деформаций образца, чтобы использовать их в качестве поправочных коэффициентов при будущих испытаниях. Данным вопросом занимался сравнительно небольшой круг авторов [2–5], т.к. поправки на деформирование испытательных машин стандартных серий при классическом поперечном изгибе широко известны и не требуют дополнительных исследований. Но при внедрении в работу кручения, на первый план выходят уже не линейные, а угловые деформации [6–8], что усложняет работу. Дополнительным фактором является длительность испытаний: установлено, что вследствие перераспределения усилий и проявления текучести стали отдельных участков сечения [9], а также обмятия кромок болтовых соединений [10] действительное значение зафиксированных в момент окончания роста нагрузки усилий может не совпадать со значением, действующим спустя отрезок времени, т.е. стенд «релаксирует». Следовательно, при назначении параметров испытательного оборудования, а также составления программы испытаний необходимо иметь представление о работе стенда под нагрузкой и вносить соответствующие параметры в протокол.

Особую роль при проведении испытаний подобного рода играет этап жизненного цикла здания, при котором совершаются операции с исследуемым конструктивным элементом: на этапе проектирования – расчет и конструирование элемента по 1-ой группе предельных состояний, на этапе возведения – расчет и конструирование элемента по 2-ой группе предельных состояний, на этапе реконструкции – определение параметров усиления. При экспериментальном исследовании усиления, особенно если речь идет о внешнем армировании [11–12], в качестве фактора действительной работы, помимо остальных, появляется технологическая доступность граней элемента для нанесения систем усиления. Поэтому, наравне с жесткостными параметрами, следует также обращать внимание и на громоздкость элементов стенда, и на расстояние от его элементов до образца.

Дополнительные ограничения при подобного рода испытаниях создает сложнопрогнозируемая точка начала роста спиралевидной трещины [2–6], а также нелинейная зависимость между уровнем нагружения и соотношением прироста доли напряжения в сечении к приросту изгибающего момента. Если на этапе жизненного цикла здания возникает необходимость в усилении элемента, то определение направления и проектной зоны анкеровки внешнего армирования становится весьма нетривиальной задачей [13–16]. Если при классическом изгибе направление зон растяжения в бетоне вполне легко определить, то работа растянутой зоны при кручении с изгибом, как минимум будет различаться в описании в зависимости от соотношения доли изгибающего и крутящего моментов [17–19].

Материалы и методы. В рамках проведения экспериментальных исследований работы железобетонных конструкций с внешним армированием композитными материалами при изгибе с кручением был разработан стенд [1], общий вид которого в момент испытаний показан на рисунке 1. В рамках поставленных задач были доведены до разрушения 4 идентичных образца при 4 различных отношениях крутящего момента к изгибающему. Каждый из образцов после доведения до условного разрушения был зафиксирован в деформированном состоянии путем создания болтового закрепления оголовников к раме стенда. После выдержки в течение 96 часов показания измерительного оборудования снимались повторно, после чего образец доводился до разрушения.

Также были проведены предварительные расчеты стенда на статическую нагрузку в виде реакции деформированных образцов при соот-

ветствующих уровнях нагружения, в т.ч. результатов долговременных испытаний. Работа образцов принималась абсолютно упругой, растяжением и сжатием болтовых (фланцевых) соединений пренебрегалось. Степень адекватности поведения стенда под нагрузкой и соответствия полученных результатов по прочности и жесткости ожидаемым оценивалась путем определения относительного отклонения между экспериментальным значением и предварительно рассчитанным по каждой ступени нагружения с вычислением среднего арифметического [20].



Рис. 1. Стенд для испытаний строительных конструкций на изгиб с кручением при статическом длительном и кратковременном воздействии

Представленная установка позволяет провести испытания балок шириной от 100 до 200 мм, высотой от 100 до 300 мм, длиной от 1,0 до 3,0 м. В середине сечения испытываемого образца образуется зона чистого изгиба с чистым кручением, без воздействия поперечной силы. Величина изгибающего момента варьируется перемещением оголовников по длине балки, а величина крутящего момента изменяется перемещением точки передачи нагрузки от распределительной траверсы на оголовник (эксцентриситет приложения силы). В качестве испытываемых образцов приняты балки сечением 100x200 мм, расчетным пролетом 1,6 м, продольное армирование d10 A500, поперечное d6 A240, бетон B20, армирование и сечение показаны на рисунке 2.

Для выявления закономерностей работы вариативным параметром был эксцентриситет, со значениями 0,0 см; 4,0 см (соотношение Т к

$M = 0,1$); 8,0 см (соотношение T к $M = 0,2$) и 16,0 см (соотношение T к $M = 0,4$). Для описания работы образцов были установлены парные индикаторы часового типа, для определения вертикальных перемещений и углов поворота, схема установки показана на рисунке 3. Ширина раскрытия нормальных трещин фиксировалась на

наиболее раскрытой трещине на участке средней трети пролета кручения, т.е. расстояния между оголовниками. Ширина раскрытия наклонных трещин фиксировалась по наиболее раскрытому участку спиралевидной трещины на участке крайних третей пролета кручения.

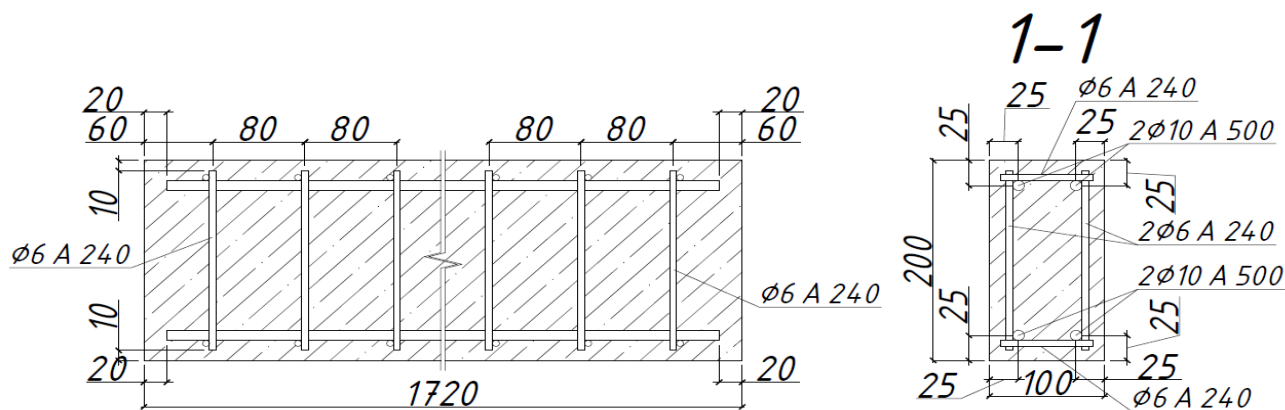


Рис. 2. Сечение и армирование испытываемых балок

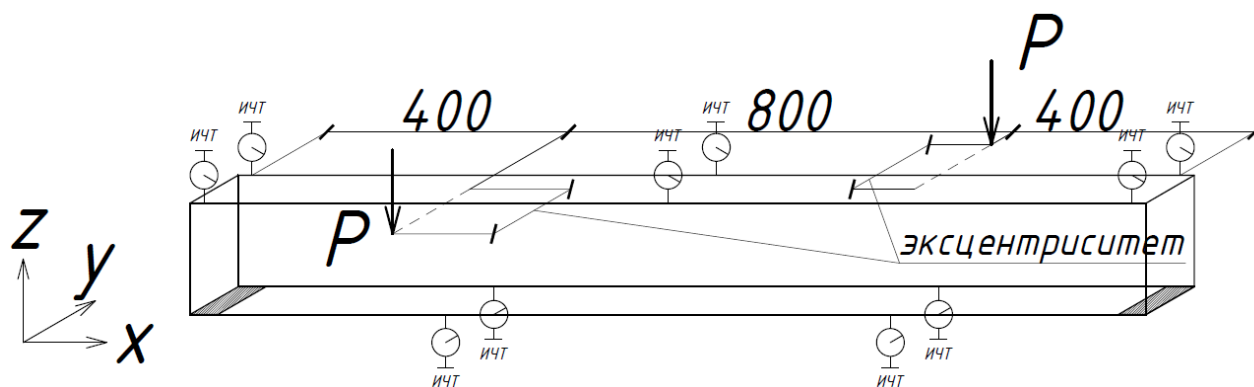


Рис. 3. Схема установки индикаторов часового типа

Основная часть. Шаг нагружения был выбран принят равным 1 кН, что является ~3% от разрушающей нагрузки для балки без эксцентриситета. Необходимое нагружение обеспечивалось работой гидравлического домкрата и насосной станцией, оттарированных на контрольном металлическом образце. В качестве подвижных опор были использованы домкратные резиновые опоры размером 110×120×160 мм. Данное решение позволило минимизировать сопротивление повороту сечения балок на опоре, с достаточным ограничением вертикальных перемещений. В местах передачи нагрузки от распределительной траверсы на оголовники были установлены домкратные резиновые опоры d110 h50 мм, позволившие сохранить точку приложения нагрузки, при повороте оголовников.

Для измерения поворота сечения и прогибов балок попарно были установлены индикаторы

часового типа на опорах, оголовниках и в середине сечения (рис. 3). ИЧТ были установлены на отдельные штативы. Они располагались в 50 мм от грани балки. В качестве перемещения каждой точки измерения, принято среднее значение показания двух индикаторов, а из разницы перемещений вычислен угол поворота сечения в каждой точке. Установка индикаторов на опоре вызвана необходимостью исключения деформации резиновой опоры при определении деформации балки.

Для фиксации образцов на длительный период действия нагрузки, на опорных балках стенда закреплены пластины. Они позволяют закрепить при помощи болтов каждый оголовник с двух сторон, тем самым фиксируя пространственное положение оголовников (рис. 4), при определенном усилии, которое создается гидравлическим домкратом.



Рис. 4. Фиксация положения оголовников

В качестве рассматриваемых и сравниваемых параметров приняты: прогиб балки в середине сечения, т.е. перемещение середины балки относительно перемещения опор (табл. 1), угол поворота балки между оголовниками (таблица 2); ширина раскрытия нормальных (табл. 3) и наклонных трещин (табл. 4). Также косвенно (без прямого измерения разности) были рассмотрены значения деформаций образцов при фиксации их деформированного состояния при исчерпании резерва упругой работы (20–25 % от разрушающего момента). Фиксация изменения деформаций в неупругой стадии не производилась.

В качестве параметра разрушения принято состояние балки, при котором, с последующем

увеличением нагрузки, происходят пластические деформации, препятствующие восприятию нагрузки. В качестве допустимой в рамках верификации погрешности разницы результатов предварительного и натурного эксперимента принята величина в 10 %, полученная как среднее возможное отклонение показаний при более ранних испытаниях различных железобетонных элементов при схожих условиях работы. Следует отметить, что частично в выборке присутствуют отклонения, превышающие 10 %, однако средние значения по всем 4 (для угла поворота и наклонных трещин – по 3) образцам укладывается в назначенный предел.

Таблица 1

Значения прогибов в пролете, их отклонение от ожидаемых

Нагрузка, кН	Эксцентриситет											
	0 см			4 см			8 см			16 см		
	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ , %	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ , %	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ , %	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ , %
4	0,85	0,88	3,4	0,80	0,79	0,9	0,30	0,35	14,3	0,55	0,61	10,0
8	1,75	1,83	4,3	1,80	1,96	8,2	1,20	1,39	13,6	1,70	1,88	19,5
12	2,70	2,88	6,2	2,95	3,19	7,5	2,25	2,47	9,0	3,00	3,14	4,7
16	3,95	3,89	1,5	4,25	4,46	4,7	3,60	3,57	1,0	–	–	0
20	5,00	5,14	2,7	5,30	5,67	6,5	5,10	4,87	4,5	–	–	0
24	6,34	6,26	1,9	6,60	6,92	4,6	6,00	6,63	9,5	–	–	0
28	8,10	8,02	1,0	8,20	8,51	3,6	–	–	0	–	–	0
32	9,60	9,38	2,3	–	–	0	–	–	0	–	–	0
36	10,8	12,43	13	–	–	0	–	–	0	–	–	0
	Среднее отклонение, %		4,1	Среднее отклонение, %		4	Среднее отклонение, %		5,8	Среднее отклонение, %		3,8

Таблица 2

Значения углов поворота опорных сечений, их отклонение от ожидаемых

Эксцентриситет									
Нагрузка, кН	4 см			8 см			16 см		
	Ожидание, °	Факт, °	Δ, %	Ожидание, °	Факт, °	Δ, %	Ожидание, °	Факт, °	Δ, %
4	0,06	0,07	14,3	0,07	0,07	0	0,16	0,20	20,0
8	0,12	0,15	20,0	0,25	0,30	16	0,70	0,76	7,9
12	0,25	0,30	16,0	0,50	0,51	2	1,98	2,35	15,7
16	0,42	0,44	5,0	0,70	0,64	9	–	–	0
20	0,61	0,62	1,0	1,05	0,90	14	–	–	0
24	0,85	0,93	8,6	1,60	1,75	8,5	–	–	0
28	1,20	1,11	8,1	–	–	0	–	–	0
	Среднее отклонение, %		10,4	Среднее отклонение, %		7,1	Среднее отклонение, %		10,91

Таблица 3

Значения ширины раскрытия нормальных трещин, их отклонение от ожидаемых

Эксцентриситет												
Нагрузка, кН	0 см			4 см			8 см			16 см		
	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ, %	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ, %	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ, %	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ, %
8	0,05	0,05	0	0,04	0,05	20	0,06	0,08	25	0,06	0,06	0
12	0,10	0,10	0	0,06	0,07	14	0,09	0,12	25	0,09	0,09	0
16	0,15	0,15	0	0,12	0,11	8	0,11	0,15	26	–	–	0
20	0,20	0,17	15	0,16	0,15	6	0,14	0,18	22	–	–	0
24	0,25	0,20	20	0,20	0,17	15	0,20	0,30	33	–	–	0
28	0,30	0,30	0	0,24	0,25	4	–	–	0	–	–	0
32	0,35	0,37	5,4	–	–	0	–	–	0	–	–	0
36	0,4	0,50	20	–	–	0	–	–	0	–	–	0
	Среднее отклонение, %		7,5	Среднее отклонение, %		8,4	Среднее отклонение, %		16	Среднее отклонение, %		0

Таблица 4

Значения ширины раскрытия наклонных трещин, их отклонение от ожидаемых

Эксцентриситет									
Нагрузка, кН	4 см			8 см			16 см		
	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ, %	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ, %	Ожидание, мм	Факт, мм	Δ, %
8	0	0	0	0	0	0	0,07	0,08	12,5
12	0	0	0	0,04	0,05	20	0,35	0,40	12,5
16	0,055	0,07	21	0,08	0,08	0	0,85	0,98	13,2
20	0,11	0,12	8,3	0,118	0,13	9,2	–	–	0
24	0,155	0,15	3,3	0,42	0,50	16	–	–	0
28	0,18	0,17	5,5	–	–	0	–	–	0
	Среднее отклонение, %		6,35	Среднее отклонение, %		7,5	Среднее отклонение, %		6,36

Обращает на себя внимание тот факт, что поведение системы «стенд-образец» под нагрузкой немного отличается от классического: экстремумы отклонений ожидаемых значений от

опытных не имеют четкого характера распределения по уровням нагружения, тогда как обычно отклонение минимально в упругой стадии работы образца и нарастает по мере приближения к стадии разрушения. Данный аспект можно

объяснить сложным напряженно-деформированным состоянием образцов, при котором для расчета прогибов, углов поворота и ширины раскрытия трещин существующих нормативных подходов недостаточно, либо они дают высокий уровень ошибки вследствие неучета одновременно действия нескольких усилий в сечении. Образец с нулевым значением крутящего момента показывает наибольшую сходимость по всем измеряемым факторам. В то же время, следует отметить, что из всех измеряемых факторов ширина раскрытия нормальных трещин получила наибольшие расхождения, что свидетельствует о некорректности модели развития нормальных трещин при наличии крутящего момента в сечении и о взаимном влиянии нормальных и наклонных трещин друг на друга по нижней грани образцов.

Выводы.

Разработанный стенд и методика испытаний для проведения экспериментальных исследований работы железобетонных конструкций с внешним армированием композитными материалами при изгибе с кручением показали свою работоспособность, подтвердив все теоретические гипотезы, а именно:

- значения углов поворота балки на оголовниках и на опорах показали примерно равные значения, подтвердив целесообразность применения податливых резиновых опор. величина отклонения ожидаемых углов поворота от полученных опытным путем составила 9,47 % и не превысила первоначально установленного максимума в 10 %;

- крепление оголовников болтами к опорной части стенда показало свою эффективность. равномерно притягивая оголовники и уменьшая давление в гидравлической системе, опираясь на показания индикаторов часового типа, оголовники были установлены, домкрат исключен из работы, а пространственное положение балки зафиксировано на длительный период. кроме того, установлено, что при работе в упругой стадии роста деформаций между фиксацией деформированного состояния и снятием нагрузки спустя 96 часов не наблюдалось. можно сделать косвенный вывод, что при упругопластической стадии работы все же будет наблюдаться релаксация арматуры и ползучесть бетона;

- величина отклонения ожидаемых прогибов от полученных опытным путем составила 4,4 % и не превысила первоначально установленного максимума в 10 %;

- величина отклонения ширины раскрытия нормальных трещин от полученных опытным путем составила 8 % и не превысила первоначально установленного максимума в 10 %;

- Величина отклонения ширины раскрытия наклонных трещин от полученных опытным путем составила 6,74 % и не превысила первоначально установленного максимума в 10 %.

Оценивая в целом результаты испытаний, следует отметить некоторые результаты, не составляющие основную цель работы:

- появление кручения, равного 0,1 от изгибающего момента уменьшило несущую способность балки на 11,5 %; 0,2 – 31,5 %; 0,4 – 63,0 %;

- во всех случаях приложения нагрузки с эксцентриситетом разрушение происходило от постепенного развития спиралевидной трещины, огибающей зону пролета кручения, и развивающейся от нижней грани элемента по боковой грани под углом 40–50° к продольной оси образца.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демьянов А.И., Сальников А.С., Колчунов В.И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом и анализ их результатов // Строительство и реконструкция. 2017. № 4(72). С. 17–26.

2. Колчунов В.И., Сальников А.С. Результаты экспериментальных исследований трещинообразования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2016. № 6(68). С. 22–28.

3. Демьянов А.И., Покусаев А.А., Колчунов В.И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2017. № 5(73). С. 5–14.

4. Демьянов А.И., Наумов Н.В., Колчунов В.И. Некоторые результаты экспериментальных исследований составных железобетонных конструкций при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2018. № 5(79). С. 13–23.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

14. Карась М.С., Кушель Р.О. Экспериментальные исследования несущей способности железобетонных балок, усиленных композитными

тканями в середине пролёта // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства : Сборник научных статей, Гродно, 13–14 мая 2021 года. Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2021. С. 122–125.

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

16. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 3. С. 288–298. DOI: 10.22363/1815-5235-2021-17-3-288-298.

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

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

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

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

Информация об авторах

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

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

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

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

Лесовик Галина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: galina.lesovik@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 07.08.2024 г.

© Меркулов С.И., Сулейманова Л.А., Есипов С.М., Кашуба С.О., Лесовик Г.А., 2024

¹Merkulov S.I., ²Suleymanova L.A., ²Esipov S.M., ²Kashuba S.O., ²Lesovik G.A.

¹Kursk State University

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

VERIFICATION OF THE TEST PROCEDURE FOR A REINFORCED CONCRETE ELEMENT DURING BENDING WITH TORSION IN LONG-TERM OPERATION

Abstract. In the sources available for research and analysis, including the current regulatory documents, the methods of calculating the elements reinforced with external reinforcement when working on torsion are extremely succinctly considered. This article discusses a number of existing proven methods for calculating reinforced concrete bendable elements with external composite reinforcement, including when working with torsion. The necessity of introducing into the existing calculation dependences of the prerequisites for substantiating the behavior of reinforced concrete bendable elements, including those with external composite reinforcement, when working in a complex stress-strain state is described. The cases of occurrence of additional torsional forces in the conditions of classical variants of loads and impacts on the element are considered. A description of the work of reinforced concrete elements with external reinforcement with composite materials during bending with torsion is proposed. The main provisions of the work of reinforced concrete structures in bending with torsion are given. The main limiting states are given, and assumptions are made about the possible presence of additional limiting states of reinforced concrete elements with external reinforcement with composite materials. A variant of the condition of proportionality of longitudinal relative deformations for reinforced concrete elements with external reinforcement with composite materials during bending with torsion is proposed.

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

REFERENCES

1. Demyanov A.I., Salnikov A.S., Kolchunov V.I. Experimental studies of reinforced concrete structures in torsion with bending and analysis of their results [Eksperimentalnye issledovaniya zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom i analiz ix rezultatov]. Building and reconstruction. 2017. No. 4(72). Pp. 17–26. (rus)
2. Kolchunov V.I., Salnikov A.S. Results of experimental studies of cracking of reinforced concrete structures during torsion with bending [Rezultaty eksperimentalnykh issledovanij treshhinoobrazovaniya zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom]. Building and reconstruction. 2016. No. 6(68). Pp. 22–28. (rus)
3. Demyanov A.I., Pokusaev A.A., Kolchunov V.I. Experimental studies of reinforced concrete

structures in torsion with bending [Eksperimentalnye issledovaniya zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom]. Building and reconstruction. 2017. No. 5(73). Pp. 5–14. (rus)

4. Demyanov A.I., Naumov N.V., Kolchunov V.I. Some results of experimental studies of composite reinforced concrete structures in torsion with bending [Nekotorye rezultaty eksperimentalnykh issledovanij sostavnykh zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom]. Building and reconstruction. 2018. No. 5(79). Pp. 13–23. (rus)

5. Salnikov A. S., Kolchunov V.I., Yakovenko I.A. Computational model of the formation of spatial cracks of the first type in reinforced concrete structures during torsion with bending [Raschetnaya model obrazovaniya prostranstvennykh treshhin pervogo vida v zhelezobetonnykh konstrukciyax pri

kruchenii s izgibom]. Industrial and Civil Engineering. 2015. No. 3. Pp. 35–40. (rus)

6. Merkulov S.I., Esipov S.M. Experimental studies of coupling of external composite nonmetallic reinforcement with concrete [Eksperimentalnye issledovaniya scepheniya vneshnej kompozitnoj nemetallicheskoj armatury s betonom]. Bezopasnost stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. 2017. No. 1. Pp. 93–97. (rus)

7. Rimshin V.I., Merkulov S.I., Esipov S.M. Concrete structures reinforced with composite material [Betonnye konstrukcii, usilennye kompozitnym materialom]. Fefu: school of engineering bulletin. 2018. No. 2(35). Pp. 93–100. DOI 10.5281/zenodo.1286034. (rus)

8. Esipov S.M., Esipova D.V. Criteria for the compatibility of composite external reinforcement and reinforced concrete structures under force influences [Kriterii sovmestnosti raboty kompozitnogo vneshnego armirovaniya i zhelezobetonnoj konstrukcii pri silovyh vozdejstviyah]. Mezhdunarodnyj studencheskij stroitel'nyj forum - 2018 (k 165-letiyu so dnya rozhdeniya V.G. Shukhova) : Sbornik dokladov. Belgorod, November 26, 2018. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2018. Pp. 64–69. (rus)

9. Merkulov S.I., Esipov S.M. Concrete structures with non-metallic composite reinforcement [Betonnye konstrukcii s nemetallicheskoj kompozitnoj armaturoj]. Bezopasnost stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. Kursk, November 15, 2019. Kursk: Kursk State University, 2019. Pp. 218–226. (rus)

10. Kuznetsova M.S., Popova M.V. Features of calculation of reinforced concrete bendable elements reinforced with composite materials [Osobennosti rascheta zhelezobetonnyh izgibaemyh elementov, usilennyh kompozitnymi materialami]. Dni nauki studentov IASE - 2021 : Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii. Vladimir, March 22–09, 2021. Vladimir: Vladimir State University, 2021. Pp. 178–181. (rus)

11. Gavrilova E.O. Reinforcement of bent elements with composite materials [Usilenie izgibaemyh elementov kompozicionnymi materialami]. Akademicheskaya publicistika. 2021. No. 8–2. Pp. 111–119. (rus)

12. Volik A.R., Novitsky Ya.Ya. Experimental studies of reinforced concrete beams with external reinforcement of a stretched face with composite fabrics [Eksperimentalnye issledovaniya zhelezobetonnyh balok s vneshnim armirovaniem rastyanutoj grani kompozitnymi tkanyami]. Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Technique. 2022. Vol. 12. No. 1. Pp. 117–125. (rus)

13. Starovoitova I.A., Shakirov A.R., Zykova E.S., Semenov A.N., Suleymanov A.M. Investigation of physico-mechanical characteristics of modified adhesive binders for external reinforcement systems of building structures [Issledovanie fiziko-mekhanicheskix harakteristik modifitsirovannyh kleevyh svyazuyushhix dlya sistem vneshnego armirovaniya stroitel'nyh konstrukcij]. Building Materials. 2021. No. 1-2. Pp. 98–104. (rus)

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

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

16. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Zyuzina O.V. Experimental studies of the stress-strain state of reinforced concrete structures reinforced with prestressed basalt composite reinforcement [Eksperimentalnye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnyh konstrukcij, usilennyh predvaritel'no napryazhennoj bazaltokompozitnoj armaturoj]. Structural mechanics of engineering constructions and buildings. 2021. Vol. 17. No. 3. Pp. 288–298. (rus)

17. Kurnavina S.O., Antonov M.D. The field of crack directions in reinforced concrete bendable elements reinforced with composite materials [Pole napravlenij treshhin v zhelezobetonnyh izgibaemyh elementah, usilennyh kompozitnymi materialami]. Building and reconstruction. 2020. No. 1(87). Pp. 3–13. (rus)

18. Baldin D.Yu., Kraev A.N., Zhaysambayev E.A. Comparative analysis of ways to strengthen reinforced concrete T-beams [Sravnitel'nyj analiz sposobov usileniya zhelezobetonnyh tavrovyyh balok]. Russian journal of transport engineering. 2020. Vol. 7. No. 2. Pp. 3–20. (rus)

19. Adamovich D.N. Normalization of strength characteristics of composite reinforcement in the design and calculation of concrete and reinforced concrete structures [Normirovanie prochnostnykh xarakteristik kompozitnoj armatury pri proektirovanii i raschyote betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij]. Tradicii, sovremennye problemy i perspektivy razvitiya stroitelstva : Sbornik nauchnyh statej.

Grodno: Grodnenskiy gosudarstvennyj universitet imeni Yanki Kupaly, 2020. Pp. 30–34. (rus)

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

Information about the author

Merkulov, Sergey I. Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial and Civil Engineering. E-mail: mersi.dom@yandex.ru. Kursk State University. Russia, 305000, Kursk, st. Radishcheva, 33.

Suleymanova, Ludmila A. Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of construction and urban economy. E-mail: kafedrasigsh@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

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

Kashuba, Sergey O. Master student. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Lesovik, Galina A. PhD, Assistant professor. E-mail: galina.lesovik@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 07.08.2024

Для цитирования:

Меркулов С.И., Сулейманова Л.А., Есипов С.М., Кашуба С.О., Лесовик Г.А. Верификация методики испытаний железобетонного элемента при изгибе с кручением в условиях длительной эксплуатации // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 12. С. 37–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-37-46

For citation:

Merkulov S.I., Suleymanova L.A., Esipov S.M., Kashuba S.O., Lesovik G.A. Verification of the test procedure for a reinforced concrete element during bending with torsion in long-term operation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 37–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-37-46

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-47-57

Ильин Е.А.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: Egor.Ilin.98@bk.ru

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АКТИВИРОВАННОЙ СТРУИ И ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ГРАНУЛЯТОРА

Аннотация. Состояние микроклимата при переработке порошкообразных материалов зависит от особенностей технологического процесса, исходных материалов и возможности локализации мелкодисперсной пыли. Основным средством локализации пылевых выделений является местная вытяжная вентиляция, но обычно улавливаемые взвешенные частицы становятся отходами производства. Производство твердых лекарственных форм основано на гранулировании порошкообразных материалов. Для грануляторов с открытым бункером не предусматриваются аспирационные укрытия, что обусловлено особенностями технологических операций и необходимостью ресурсосбережения. Для сохранности исходных материалов, и обеспечения нормируемой чистоты воздуха предлагается использовать подачу приточного воздуха непосредственно в зону загрузки порошкообразного материала. Подобный принцип применяется в местных отсосах (с поддувом, передувки), а также для воздушного душирования рабочих мест. Для создания активированной струи предлагается использовать воздухо-распределитель ВБС однонаправленного действия. В проектной практике используется инженерный метод расчета, основанный на результатах лабораторных исследований завода «Арктос». Для учета влияния условий движения воздушной струи применяется ряд коэффициентов (стеснения, взаимодействия и неизотермичности). Такой метод не может быть использован для случая взаимодействия струи с гранулятором. Инженерные методы расчета местных отсосов, активированных приточными струями, также не могут быть применены, поскольку разработаны для конкретных видов укрытий, например, бортовых отсосов. Методы расчета систем воздушного душирования основаны на закономерностях приточных струй без учета особенностей взаимодействия приточной струи и технологического оборудования. Для совершенствования инженерного метода расчета приточных струй в сложных условиях взаимодействия с технологическим оборудованием и исходным материалом необходимо использовать численный и лабораторный эксперименты. В статье приведены результаты исследований аэродинамических характеристик взаимодействия активированной струи с гранулятором для приготовления твердых лекарственных форм. Полученные, результаты могут быть использованы не только для проектирования климатических систем фармацевтического производства, но также для совершенствования методов расчета локальных систем приточной и вытяжной вентиляции.

Ключевые слова: фармацевтическое производство, чистое помещение, гранулятор, мелкодисперсная пыль, активированная струя, численный и лабораторный эксперимент.

Введение. Обеспечение нормируемых параметров микроклимата на рабочих местах является основной задачей формирования воздушного режима. В фармацевтическом производстве предъявляется ряд требований для обеспечения не только комфортного пребывания на рабочих местах и обеспечения нормируемой чистоты помещения, но и для предотвращения загрязнения конечной продукции и снижения потерь исходных материалов. Снизить перекрестную контаминацию и обеспечить нормируемые параметры микроклимата в «чистом помещении» необходимо на этапе проектирования систем вентиляции [1, 2]. Особенности технологического процесса исследуемого объекта представлены в работе [3].

Многие исследователи решали задачи рационального способа подачи воздуха для обеспечения нормируемых параметров воздуха за счет по-

дачи активированной приточной струи в рабочую зону [4, 5]. Исследованием аналитического расчета дальноточности струи занимались многие ученые, такие как В.В. Батулин, Г.М. Позин, М.И. Гримитлин [6]. Важно отметить, что струи, в том числе активированные, существенно влияют на развитие циркуляционных течений и распространение вредных веществ. Обобщение результатов исследований в зависимости от линейных размеров помещения и воздухо-распределителя, влияния ограждающих конструкций технологического оборудования представлены в работе автора [7] в виде зависимости для текущего значения осевой скорости:

$$V_x = \frac{m \cdot L_0}{x \cdot \sqrt{F_0}} \cdot K_C \cdot K_B \cdot K_H, \quad (1)$$

где m – скоростной коэффициент воздухо-распределителя (ВР); L_0 – объемный расход воздуха через ВР; x – расстояние от истечения до места

входа струи в рабочую зону по аэродинамической оси; F_0 – площадь расчетного сечения воздухораспределителя; K_c – коэффициент стеснения; K_v – коэффициент взаимодействия; K_n – коэффициент неизотермичности.

Использование инженерного метода расчета приточных струй на основе уравнения (1) применимо для расчетов воздухообмена и воздухораспределения в помещениях, а также систем воздушного душирования. Во всех таких случаях решение сводится к обеспечению нормируемых параметров в рабочей зоне и/или на рабочем месте, что неприемлемо для исследуемого объекта, когда одновременно с обеспечением нормируемых параметров микроклимата необходимо исключить потери ценного исходного материала.

Работы по предотвращению запыленности воздушной среды проводятся для производств химической, фармацевтической, деревообрабатывающей и других отраслей промышленности. Разработаны конструкции местных отсосов разной степени укрытия для удаления различных видов вредностей. Для повышения эффективности местных отсосов используются, например, конструктивные элементы [7], определенная организация струйных потоков внутри пылезащитной камеры [8], приточные струи для воздушно-струйного экранирования [9]. В инженерных методах расчета местных отсосов, активированных приточной струей, используются результаты лабораторных и численных исследований взаимодействия струи и стока, при этом практически не учитывается влияние оборудования на аэродинамику формирующихся газо-пылевоздушных потоков. Кроме того, в некоторых случаях, исходя из особенностей технологического процесса, например, для фармацевтического производства, использовать местные отсосы не представляется возможным.

Многие виды фармацевтических грануляторов, над пространством которых происходят манипуляции с порошками, не имеют аспирационных укрытий. Часть порошка поступает в открытое пространство помещения. В масштабах нескольких манипуляций с порошком – это незначительный расход, но, если таких операций за день больше 10, то актуальными становятся мероприятия по исключению выноса частиц порошка из гранулятора как с точки зрения ресурсосбережения [10, 11], так и обеспечения требований для «чистых» помещений [12, 13].

Учитывая существенные сложности в изучении аэродинамики и тепломассообмена при взаимодействии различных воздушных потоков с газовыми и пылевыми потоками [14] и конвективными течениями, с технологическим оборудованием, в настоящее время широко используются

не только исследования на опытных лабораторных установках, но и математическое моделирование [15–19]. Сравнительный анализ результатов лабораторных и численных исследований в последующем позволяет разработать инженерные методы расчета струйных течений в сложных условиях их формирования.

Таким образом, целью работы является исследование распределения скорости движения воздуха при взаимодействии активированной приточной струи с гранулятором по результатам лабораторного и численного экспериментов для выбранных расходов воздуха в работе [6]. Для поставленной цели исследований решены следующие задачи:

- на базе завода «Арктос» создана лабораторная установка для выполнения измерений при различных расходах воздуха;

- разработана численная модель натекания активированной струи на гранулятор;

- выполнена статистическая обработка результатов лабораторных исследований;

- на основании обработки результатов исследований предложены зависимости для определения коэффициентов стеснения и влияния гранулятора для совершенствования методики инженерного расчета.

Материалы и методы. Объектом исследования является модуль «чистого помещения» (рис. 1), имитирующий помещение класса d по изготовлению гранулированных порошков фармацевтического завода Полисан в масштабе 1:1. На рисунке 2 представлен общий вид фармацевтического гранулятора открытого типа для производства твердых лекарственных форм.

Производство твердых лекарственных форм фармацевтики состоит из следующих этапов: изготовление порошков, гранулирование, изготовление таблеток. На этапе грануляции происходит прессование простых порошков методом засыпки сырья в открытое пространство гранулятора. Как известно [19], в процессе засыпки порошкообразного сырья происходит пылеобразование на рабочем месте (рис. 3).

Для предотвращения перекрёстной контаминации, а также в избежание выноса в помещение взвешенных частиц в работе предлагается использовать средства вентиляции, а именно активированную приточную струю для формирования однонаправленного воздушного потока и обеспечения равномерности распределения скоростей при натекании струи на гранулятор, а также для нахождения рационального диапазона скоростей у поверхности гранулятора.

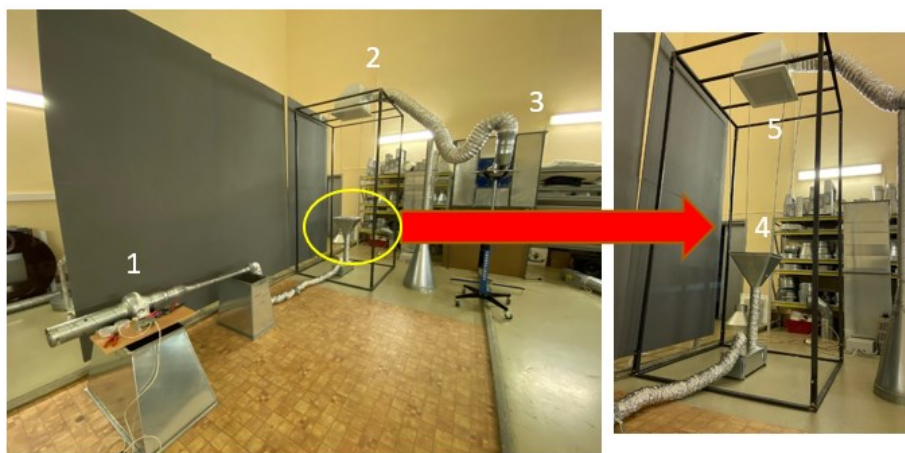


Рис. 1. Лабораторная установка (1 – канальный вентилятор; 2 – модуль помещения; 3 – вентиляционная установка; 4 – имитация гранулятора; 5 – воздухоподводящий блок)

Над местом образования пыли установлен воздухоподводящий блок с воздухораспределителем ВБС-М размерами 595×595 на расстоянии 2 м от источника. Подача воздуха осуществляется через приточную установку с частотами вентилятора 11 Гц ($L=150 \text{ м}^3/\text{ч}$) и 19 Гц ($L=300 \text{ м}^3/\text{ч}$). Равномерность и однонаправленность воздуха в рабочей зоне создается за счет воздушного Нерафилтра, установленного в воздухоподводящем блоке (1 ВБД 595×595 М), предназначенного для чистых помещений [20]. Для измерений использована специальная измерительная система с установкой датчиков воздуха в горизонтальной и вертикальной плоскостях (рис. 4).

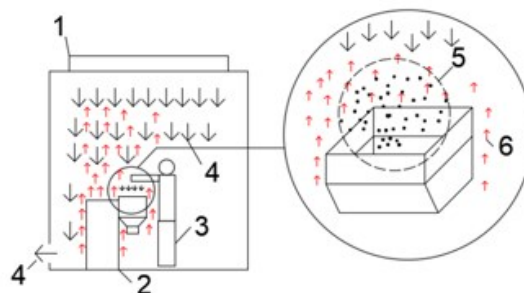


Рис.2. Фармацевтический гранулятор открытого типа



Рис. 3. Загрузка сухого материала (порошок)

1 – воздухораспределитель; 2 – гранулятор; 3 – оператор; 4 – вытяжка; 5 – облако взвешенных частиц; 6 – конвективные потоки от оборудования и оператора



Система измерений включает 8 датчиков скорости движения воздуха на стойке, расстояние между датчиками 10 мм, размещение нижнего датчика 10 мм от поверхности гранулятора. Обработка осуществляется автоматически в компьютерной программе «AirDistSys5000» в течение 3 минут. Температурный режим воздушной струи – изотермический.

Подача воздуха осуществлялась при двух расходах $L=300 \text{ м}^3$ и $L=150 \text{ м}^3$ согласно техническим данным в натурных условиях на рабочих местах завода «Полисан».

Численное моделирование выполнено в программе STAR-CCM+.

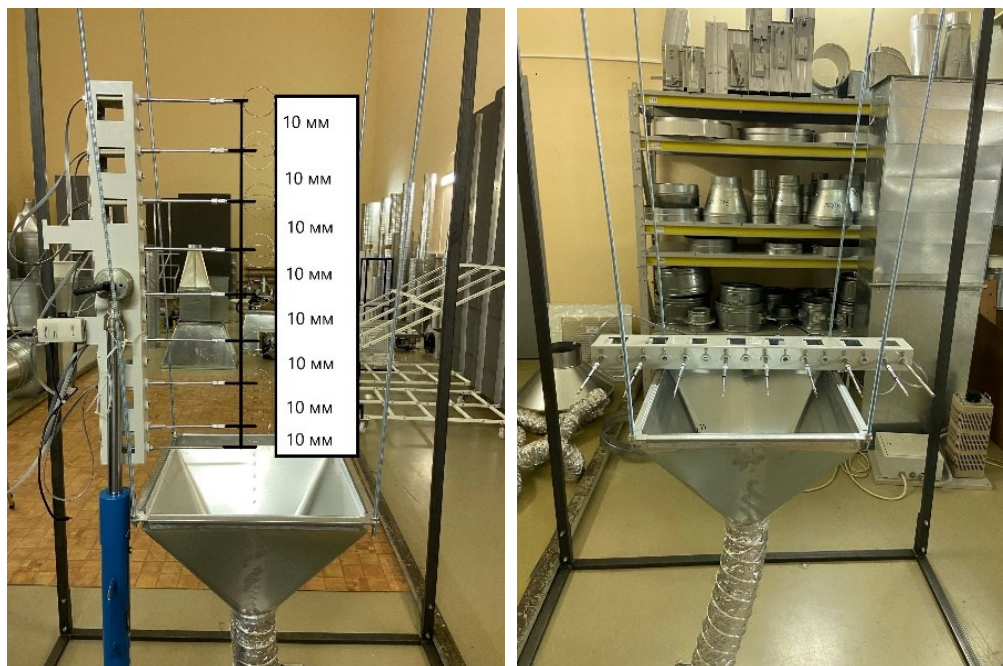


Рис. 4. Расположение датчиков скорости по аэродинамической оси

В основе численного моделирования лежит решение системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса, неразрывности, энергии и примесей. В данной работе для замыкания системы уравнений использована k - ϵ модель турбулентности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_i + \bar{\rho}' u_i') &= S_m \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) &= - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial \tau_{ij}'}{\partial x_j} + S_i \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{a})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{a} u_i)}{\partial x_j} &= - \frac{\partial (\bar{\rho} u_i' a')}{\partial x_j} + \bar{J}_a, \end{aligned} \quad (2)$$

где t – время; ρ – плотность; μ – коэффициент динамической вязкости; $\bar{u}_j$ – компоненты вектора осредненной скорости по осям координат; τ_{ij} – турбулентные напряжения (дополнительные напряжения Рейнольдса); u_i', u_j', T', C' – локальные пульсации скорости, температуры и примеси потока; $\bar{a}$ – осредненные значения удельной плотности скалярной величины; S_m, S_i – интенсивность источников массы и импульса; $\bar{J}_a$ – интенсивность источников примеси.

Для выполнения численного моделирования построена прямоугольная сетка с измельчением по аэродинамической оси от плоскости истечения до поверхности гранулятора, расчетное количество ячеек 267009. Физические свойства математической модели представлены на рис. 5.

Граничные условия модели задаются на поверхности подачи и удаления воздуха через массовый расход (табл. 1).

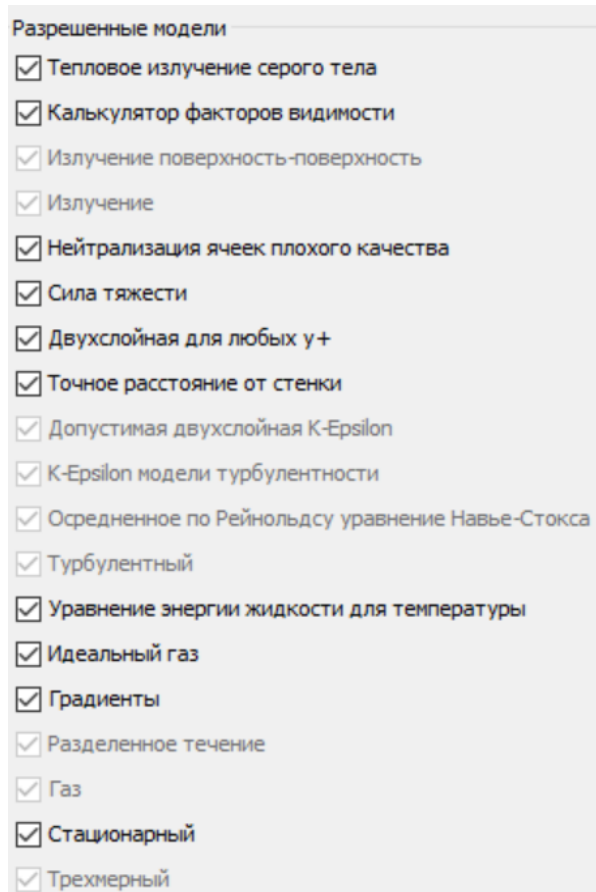


Рис. 5. Физические свойства математического моделирования

На рис. 6 приведены результаты численного моделирования в виде поля скоростей [6] и указанием точек измерений максимальных значений скорости в направлении истечения струи по оси x (рис.5).

Таблица 1

Граничные условия математического моделирования

Граничные условия	Физическое значение	Количественное значение
При расходе 300 м ³ /ч (0,083 кг/с)		
Граница (приток)	Массовый расход	0,083
Граница (вытяжка)	Массовый расход	-0,083
При расходе 150 м ³ /ч (0,042 кг/с)		
Граница (приток)	Массовый расход	0,042
Граница (вытяжка)	Массовый расход	-0,042

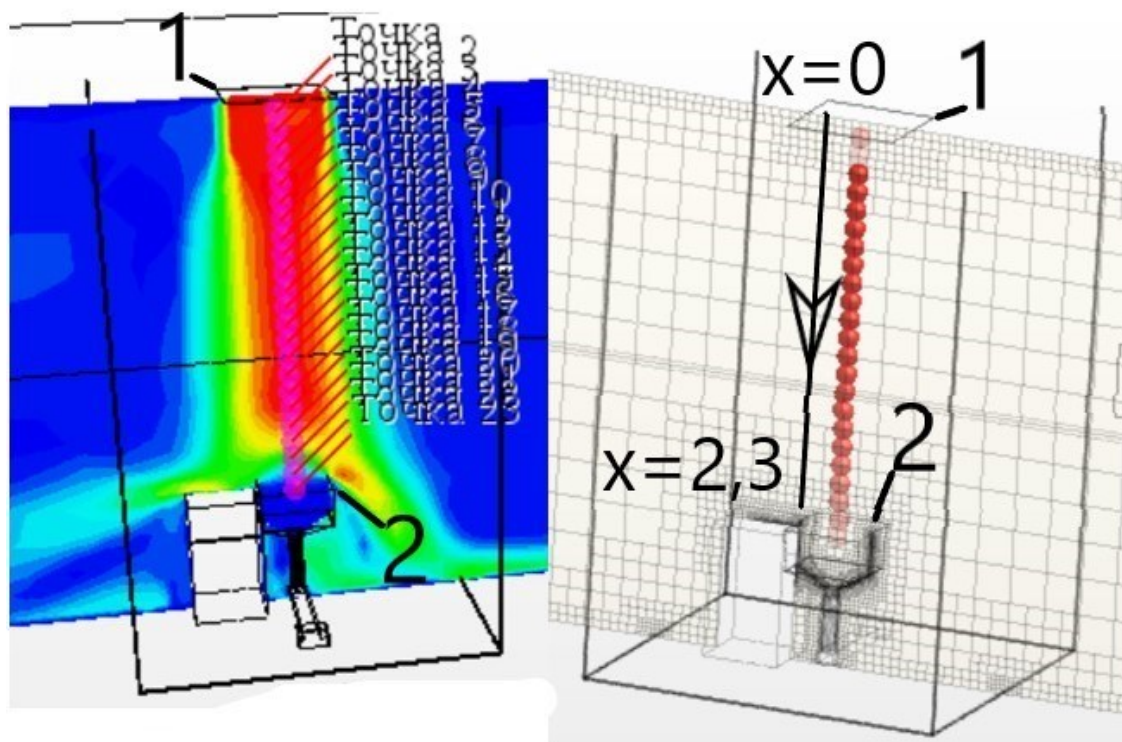


Рис. 6. Математическая модель рассматриваемого модуля «чистого помещения»

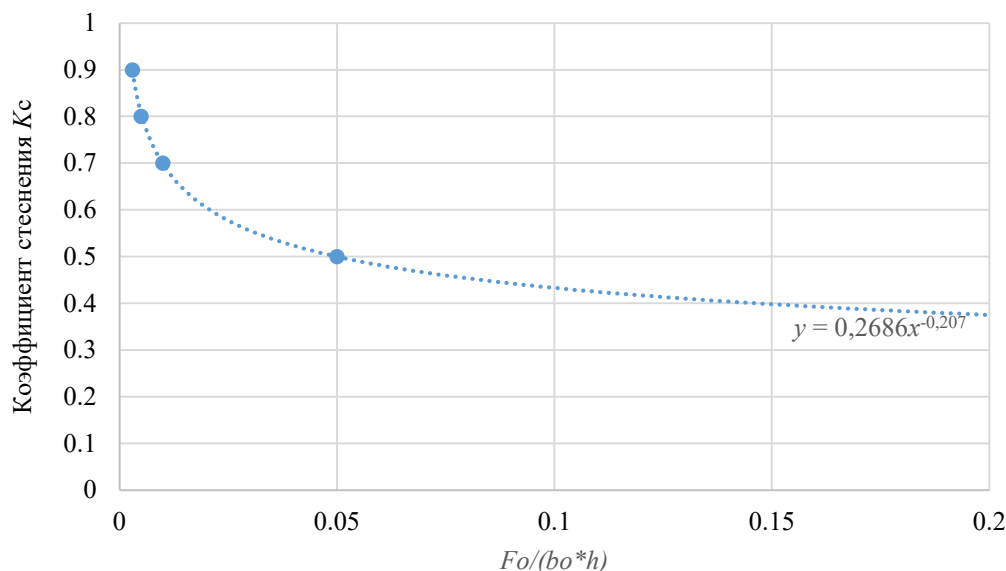
1 – воздухораспределитель, 2 – гранулятор

В качестве инженерного метода расчета используются рекомендации завода «Арктос», которые включены в СП 60.13330.2020 Приложение Ж. Расчет произведен для схемы подачи «сверху вниз коническими струями» для изотермического режима. Таким образом выражение (1) принимает следующий вид:

$$K_c \cdot m = \frac{V_x \cdot x \cdot \sqrt{F_0}}{L_0}, \quad (3)$$

Скоростной коэффициент принят по данным завода «Арктос» $m=6$ для конических струй, образующихся из прямооточных воздухораспределителей ВБС. В расчете использованы коэффициенты взаимодействия для единичной струи $K_B=1$ и неизотермичности $K_H=1$ для изотермического режима течения воздушной рециркуляционной струи. При распределении струи в ограниченном пространстве необходимо учесть коэффициент стеснения. Для нахождения зависимости данного коэффициента от расстояния между

воздухораспределителем и гранулятором $K_c=f(x)$ выполнена обработка данных СП 60.13330.2020 Приложение Ж (таблица Ж1), которые представлены в виде $K_c = f\left(\frac{F_0}{(b_0 \cdot h)}; \frac{x}{(m \cdot b_0 \cdot h)}\right)$. Здесь F_0 – площадь расчетного сечения воздухораспределителя ($F_0=0,192$ м²); b_0 – ширина расчетного сечения ВР ($b_0=0,47$ м); h – высота помещения, м ($h=3,0$ м); x – расчетная длина струи до поверхности гранулятора ($x=2,3$ м). Поскольку для условий исследований величина $F_0/(b_0 \cdot h) = 0,18$, что вне пределов данных таблицы, то предложен прогноз до значений 0,2. Для удобства обозначив $F_0/(b_0 \cdot h) = \bar{F}$ и $x/(m \cdot b_0 \cdot h) = \bar{x}$, для расстояния от плоскости истечения приточной струи до гранулятора $x=2,3$ м получена зависимость $K_c = 0,2686\bar{F}^{-0,207}$.

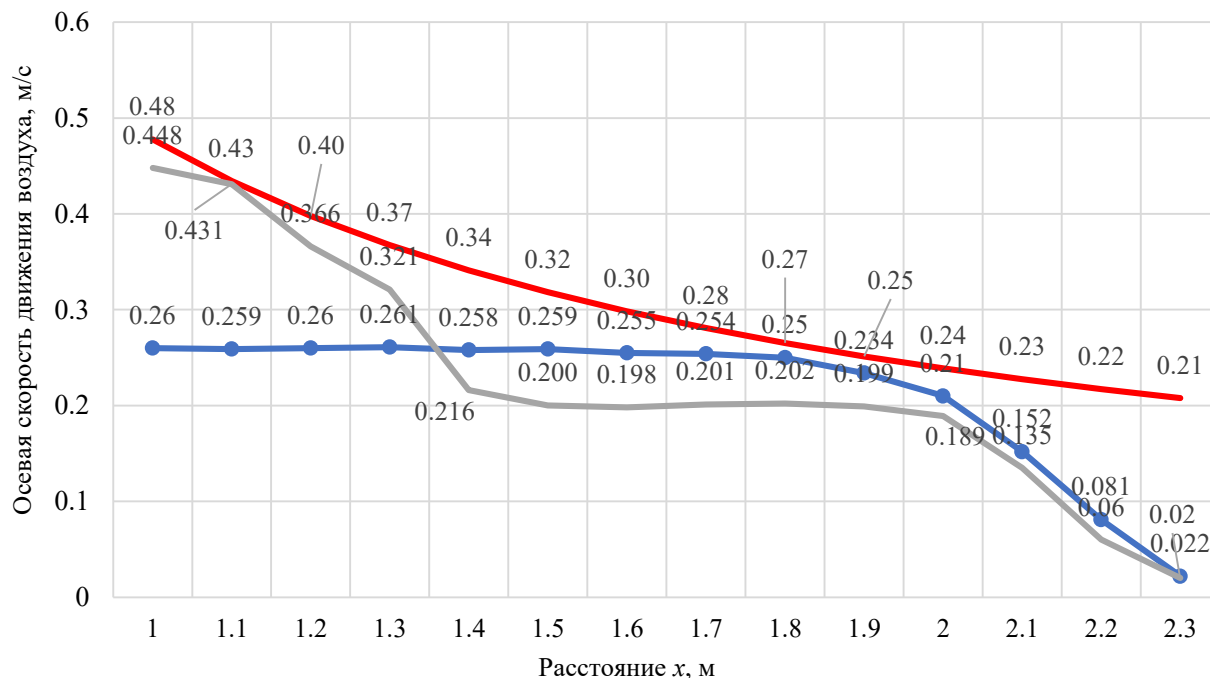
Рис. 7. Зависимость коэффициента стеснения K_s

Помимо коэффициента стеснения предлагается использовать дополнительный коэффициент для учета торможения струи при натекании и частичном обтекании гранулятора. Коэффициент влияния гранулятора K_Γ должен учитывать соотношение геометрических размеров воздухораспределителя и гранулятора. Таким образом:

$$K_\Gamma = \frac{S}{F_0}, \quad (4)$$

где S – площадь гранулятора ($S=0,18 \text{ м}^2$).

Основная часть. Результаты исследований представлены на рисунках 8-12. На рисунке 8 приведены графики изменения осевой скорости движения воздуха в пространстве над гранулятором при расходе $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ по результатам лабораторного и численного экспериментов, а также с использованием инженерного метода расчета с учетом предложенных коэффициентов стеснения и влияния гранулятора.

Рис. 8. Изменение осевой скорости активированной струи при расходе $300 \text{ м}^3/\text{ч}$

(Красным цветом показаны данные инженерного метода расчета; синим – результаты численного моделирования; серым – результаты лабораторного исследования)

В интервале от 1,0 до 2,0 м наблюдается удовлетворительное соответствие скоростей движения воздуха для всех методов исследований. В

непосредственной близости от гранулятора на расстоянии от 2,0 до 2,3 м инженерный метод не может быть использован вследствие торможения

потока при его взаимодействии с гранулятором. В этой зоне можно отметить удовлетворительное соответствие данных численного и лабораторного исследований, что доказывает адекватность принятых методов исследований, поскольку подробные пространственные поля распределения

параметров возможно получить только в результате численных экспериментов. Аналогичные результаты получены и при расходе $150 \text{ м}^3/\text{ч}$ (рис. 9).

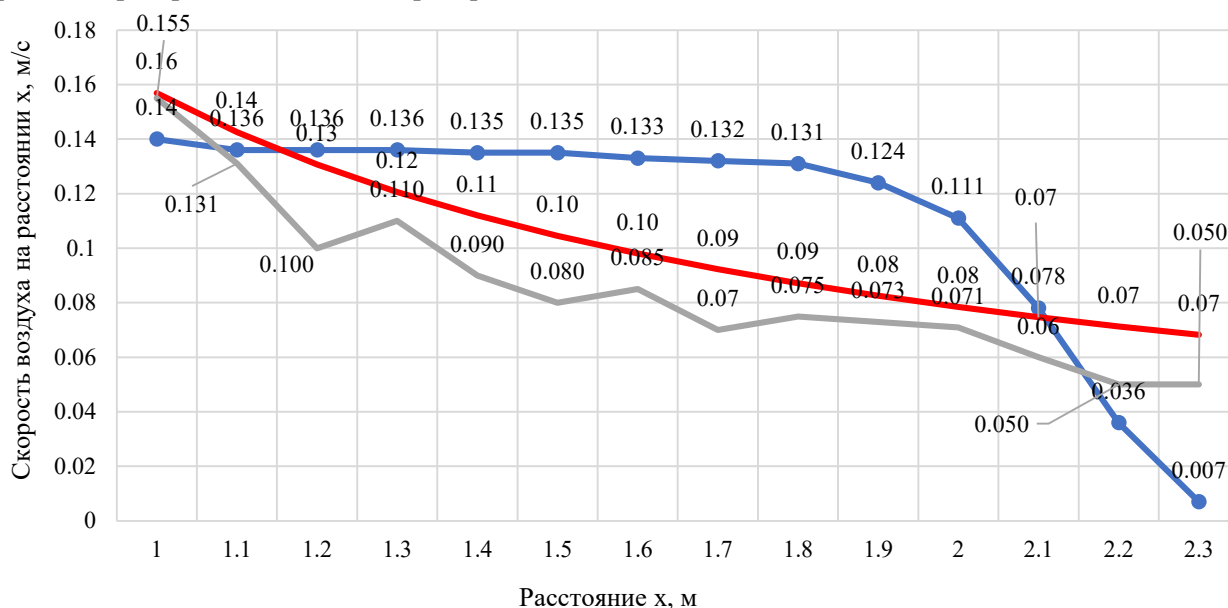


Рис. 9. Изменение осевой скорости активированной струи при расходе $150 \text{ м}^3/\text{ч}$
(Красным цветом показаны данные инженерного метода расчета;
синим – результаты численного моделирования; серым – результаты лабораторного исследования)

На рисунках 10–12 представлены поля распределения скорости движения воздуха в пространстве над гранулятором, полученные в результате численного эксперимента.

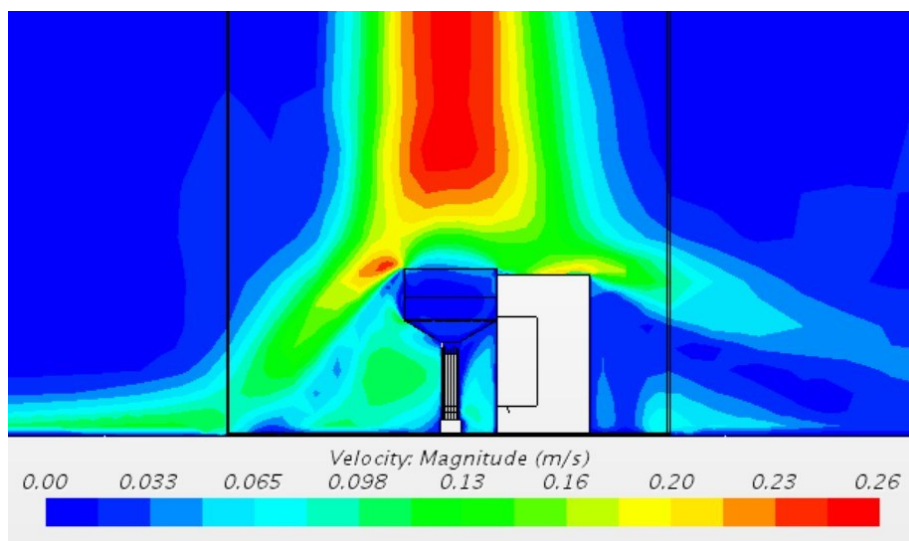


Рис. 10. Распределение скоростей движения воздуха при расходе $300 \text{ м}^3/\text{ч}$

На рисунке 10 видно, что на расстоянии $0,3 \text{ м}$ от гранулятора струя начинает испытывать влияние препятствия (гранулятора), происходит торможение и поворот струи. Струя обтекает гранулятор, создавая при этом несимметричные зоны распределения скоростей на рабочем месте

оператора из-за наличия вспомогательного оборудования (блока электропривода гранулятора). При этом скорости не превышают нормируемых значений. Максимальное значение при срыве струи в левой части (рис. 10) до $0,26 \text{ м/с}$. Одно-

временно в левой части образуется зона с малыми скоростями (Рис. 11.а), способствующая формированию ниспадающей струи. Частично воздух поступает в бункер гранулятора. В правой части поля скоростей наблюдается затухание струи (рис. 11.б), что связано, с одной стороны, с наличием препятствия (блока электропривода), соразмерного с гранулятором. С другой – с влия-

нием конвективной струи, возникающей над блоком. Несмотря на незначительную разность температур между поверхностью блока и воздухом в пределах 2–4°C, конвективная струя воздействует на активированную струю, изменяя ее траекторию.

При расходе 150 м³/ч поле распределения скоростей имеет идентичный характер (рис.12).

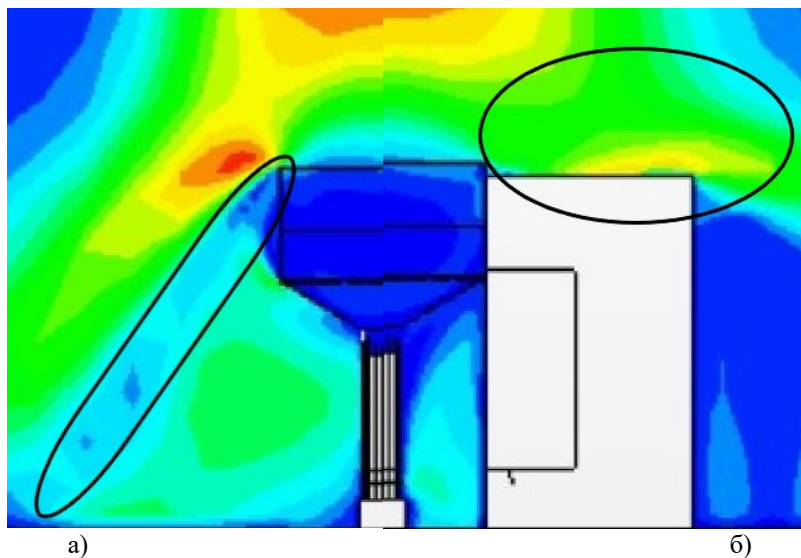


Рис. 11. Левая часть гранулятора (а), правая часть(б)

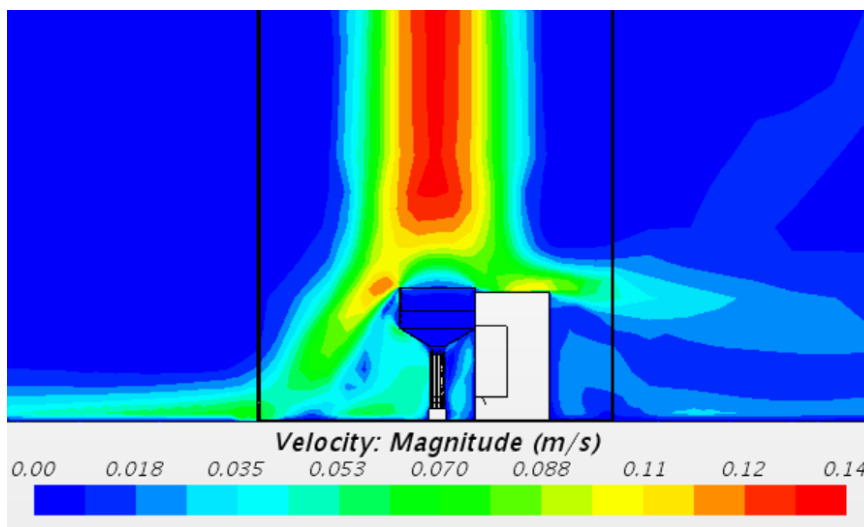


Рис. 12. Распределение скоростей при расходе 150 м³/ч

Особенности взаимодействия приточной активированной струи и гранулятора с точки зрения распределения скорости необходимы для исследования режима функционирования оборудования при загрузке порошкообразного исходного материала с размерами 0,5–5,0 мкм.

Выводы.

Результаты математического моделирования и лабораторного эксперимента на созданной опытной установке имеют удовлетворительное согласование, что подтверждает адекватность разработанной математической модели для описания процесса взаимодействия активированной приточной струи и гранулятора.

2. Предложено ввести в инженерный метод расчета струи полученные значения коэффициентов стеснения и влияния гранулятора, позволившие обобщить результаты при различных методах исследований.

3. Полученные поля распределения скорости движения воздуха при взаимодействии приточной струи и гранулятора выявили особенности формирования струйных течений в окрестности гранулятора и рабочей зоне помещения.

4. Определены перспективы дальнейших исследований, направленных на совершенствование способа подачи активированной струи для

повышения эффективности процесса локализации взвешенных частиц порошка с целью улучшения состояния микроклимата и снижения потерь исходного материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Краснюк И.И., Михайлова Г.В. Фармацевтическая технология: Технология лекарственных форм. Учебное пособие. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 464 с. Baseline pharmaceutical engineering guide. PDFSlide. URL: <https://pdfslide.us/documents/ispe-baseline-pharmaceutical-engineering-guide.html?page=1> (дата обращения: 29.05.2024).
2. Ilin E.A., Grimitlin A.M. Clean-Room Class D Air Distributor Performance Evaluation: Case Study of RTC Polisan // Proceedings of ECSF 2021 Engineering, Construction, and Infrastructure Solutions for Innovative Medicine Facilities. 2021. Pp. 111-122. DOI: 10.1007/978-3-030-99877-6_13
3. Батурин В.В., Ханжонков В.В. Циркуляция воздуха в помещении в зависимости от расположения приточных и вытяжных отверстий // АВОК. 2008. № 7. С. 91–100.
4. Гримитлин М.И., Позин Г.М. Определение параметров струй, развивающихся в ограниченном пространстве по тупиковой и проточной схемам // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. 1973. № 91. С. 12–17.
5. Гримитлин М.И. Распределение воздуха в помещениях. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2004. 320 с.
6. Ильин Е.А. Исследование скорости активированной струи у поверхности фармацевтического гранулятора // Сборник докладов Всероссийской конференции по теплогазоснабжению и вентиляции, посвященной 70-летию со дня образования БГТУ им. В. Г. Шухова [Электронный ресурс] / под ред. А.С. Семиненко - Белгород: БГТУ, 2024. С. 11–16.
7. Пат. 1459711. МПК E21F5/00. Аспирационное укрытие / А.П. Колесник, И.Н. Логачев, Г.Н. Никелина. Заявитель и патентообладатель: Научно-исследовательский институт по вентиляции и очистке воздуха на горнорудных предприятиях. № 1459711/22-3. Заявл.13.07.1970; опубл.13.09.1972.
8. Пат. 1112193. МПК F 24 F 3/00. Пылезащитная камера для рабочего стола / Л.Н. Гринберг, Р.Б. Знаменский, С.И. Крефцун, Г.Я. Крупкин, Л.В. Павлухин, Г.М. Позин, В.А. Трофимов. Заявитель и патентообладатель: Ленинградский научно-исследовательский институт гигиены труда и профзаболеваний и Всесоюзный научно-исследовательский институт охраны труда ВЦСПС. № 2045223. Заявл.18.01.83; опубл. 07.09.84.
9. Бройда В.А., Бабич Е.К. Зависимости для расчета воздушно-струйного экрана для промышленной ванны // Известия КГАСУ. 2017. №2 (40). С. 160–167.
10. Гроссман В.А. Технология изготовления лекарственных форм. М.: Издательская группа "ГЭОТАР-Медиа", 2018. 336 с.
11. Карел Б., Зденек П. Производство твердых лекарственных форм. Курс лекций. М.: Company G.M.Project, 2005. 92 с.
12. Мухаметджанов А.А. Испытания чистых помещений. Опыт и нерешенные проблемы // Технология чистоты. 2023. №2. С. 9–14.
13. Уайт У. Технология чистых помещений. Основы проектирования, испытаний и эксплуатации. М.: Клинрум, 2002. 304 с.
14. Семиненко А.С. Снижение пылеобразования при пневмотранспортной загрузке порошкообразных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №4. С. 56–61. DOI: 10.12737/article_5ac31d7d349966.71461325
15. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Popov E.N., Averkova O.A., Kryukova O.S., Gol'tsov A.B. Experiment determining pressure loss reduction using a shaped round exhaust hood // Building and Environment. 2021. Vol. 181. 107124
16. Сыромясов А.О., Понкратова Ю.В., Меньшакова Т.В. К вопросу моделирования термодинамического взаимодействия частиц, взвешенных в двумерной среде // Журнал средне-волжского математического сообщества. 2021. №4. С. 444–460. DOI: 10.15507/2079-6900.23.202104.444-460
17. Pandey P., Bharadwaj R., Chen X. Modeling of drug product manufacturing processes in the pharmaceutical industry // Predictive Modeling of Pharmaceutical Unit Operations. 2017. Pp. 1–13.
18. Zhuang J., Diao Y., Shen H. Numerical Investigation on Transport Characteristics of High-Temperature Fine Particles Generated in a Transiently Welding Process // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 176. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121471.
19. Zeng L., Liu G., Gao J., Du B., Lu L., Cao C., Ye W., Tong L., Wang Y. A Circulating Ventilation System to Concentrate Pollutants and Reduce Exhaust Volumes: Case Studies with Experiments and Numerical Simulation for the Rubber Refining Process // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 35. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101984
20. Dept G.B. Guide to good pharmaceutical manufacturing practice. H.M. Stationery Off. London, 1971. 302 p.

Информация об авторах

Ильин Егор Александрович, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: Egor.Ilin.98@bk.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4

Поступила 21.05.2024 г.

© Ильин Е.А., 2024

Ilin E.A.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: Egor.Ilin.98@bk.ru

INVESTIGATION OF THE VELOCITY OF THE ACTIVATED JET AT THE SURFACE OF THE PHARMACEUTICAL GRANULATOR

Abstract. The state of the microclimate during the processing of powdered materials depends on the characteristics of the technological process, the starting materials and the possibility of localization of fine dust. The main means of localizing dust emissions is local exhaust ventilation, but usually the suspended particles captured become production waste. The production of solid dosage forms is based on the granulation of powdered materials. Aspiration shelters are not provided for granulators with an open hopper, which is due to the peculiarities of technological operations and the need for resource conservation. To preserve the raw materials and ensure the normalized purity of the air, it is proposed to use the supply of supply air directly into the loading zone of powdered material. A similar principle is used in local suction systems (with blowdown, blow-down), as well as for air douching of workplaces. To create an activated jet, it is proposed to use a unidirectional VBS air distributor. In design practice, an engineering calculation method based on the results of laboratory studies of the Arkto plant is used. To take into account the influence of the conditions of movement of the air jet, a number of coefficients (constraint, interaction and non-isothermicity) are used. This method cannot be used for the case of jet interaction with a granulator. Engineering methods for calculating local suction systems activated by supply jets also cannot be applied, since they are designed for specific types of shelters, for example, on-board suction systems. The calculation methods of air douching systems are based on the regularities of the supply jets without taking into account the peculiarities of the interaction of the supply jet and technological equipment. To improve the engineering method of calculating supply jets in difficult conditions of interaction with technological equipment and raw material, it is necessary to use numerical and laboratory experiments. The article presents the results of studies of the aerodynamic characteristics of the interaction of an activated jet with a granulator for the preparation of solid dosage forms. The results obtained can be used not only for the design of climatic systems of pharmaceutical production, but also for improving the calculation methods of local supply and exhaust ventilation systems.

Keywords: pharmaceutical production, clean room, granulator, fine dust, activated jet, numerical and laboratory experiment.

REFERENCES

1. Krasnyuk I.I., Mikhailova G.V. Pharmaceutical technology: Technology of dosage forms. Textbook. [Farmaceuticheskaya tekhnologiya: Tekhnologiya lekarstvennykh form. Uchebnoe posobie]. Moscow: Publishing center "Academy", 2004. 464 p. (rus)
2. Ilin E.A., Grimitlin A.M. Clean-Room Class D Air Distributor Performance Evaluation: Case Study of RTC Polisan. Proceedings of ECSF 2021 Engineering, Construction, and Infrastructure Solutions for Innovative Medicine Facilities. 2021. Pp. 111–122. DOI: 10.1007/978-3-030-99877-6_13
3. Baturin V.V., Khanzhonkov V.V. Indoor air circulation depending on the location of supply and exhaust vents [Cirkulyaciya vozduha v pomeshchenii v zavisimosti ot raspolozhenie pritochnykh i vytyazhnykh otverstij]. AVOK. 2008. No 7. Pp. 91–100. (rus)
4. Grimitlin M.I., Pozin G.M. Determination of the parameters of jets developing in a limited space according to dead-end and flow schemes [Opredelenie parametrov struj, razvivayushchihsia v ogranichenom prostranstve po tupikovoj i protochnoj skhemam]. Scientific works of the Institutes of Labor Protection of the VTSPS. 1973. No. 91. Pp.12–17. (rus)
5. Grimitlin M.I. Indoor air distribution. [Raspredelenie vozduha v pomeshcheniyah]. St. Petersburg: AVOK Severo-Zapad, 2004. 320 p. (rus)
6. Ilin E.A. Investigation of the velocity of the activated jet at the surface of the pharmaceutical granulator [Issledovanie skorosti aktivirovannoj strui u poverhnosti farmacevticheskogo granulyatora].

Collection of reports of the All-Russian Conference on Heat and Gas Supply and ventilation dedicated to the 70th anniversary of the founding of the V.G. Shukhov BSTU, 2024. Pp. 11–16. (rus)

7. Grinberg L.N., Znamensky R.B., Kreftsun S.I., Krupkin G.Ya., Pavlukhin L.V., Pozin G.M., Trofimov V.A. Dustproof camera for the desktop. Pat. F, no. 2045223, 1984.

8. Kolesnik A.P., Logachev I.N., Nikelina G.N. Aspiration shelter. Pat. USSR, no. 1459711/22-3, 1972.

9. Broida V.A., Babich E.K. Dependencies for calculating an air-jet screen for an industrial bath [Zavisimosti dlya rascheta vozdušno-strujnogo ekrana dlya promyshlennoj vannы]. Izvestiya KGASU. 2017. No.2 (40). Pp. 160–167. (rus)

10. Grossman V.A. Technology of manufacturing dosage forms. [Tekhnologiya izgotovleniya lekarstvennyh form]. M.: Publishing group "GEOTAR-Media", 2018. 336 p. (rus)

11. Grossman V.A. Technology of manufacturing dosage forms. [Tekhnologiya izgotovleniya lekarstvennyh form]. M.: Publishing group "GEOTAR-Media", 2018. 336 p. (rus)

12. Mukhametdzhanov A.A. Testing of clean rooms. Experience and unresolved issues [Ispytaniya chistyh pomeshchenij. Opyt i nereshenye problem]. Purity technology. 2023. No.2. Pp. 9–14. (rus)

13. White W. Cleanroom technology. Fundamentals of design, testing and operation. [Tekhnologiya chistyh pomeshchenij. Osnovy proektirovaniya, ispytaniy i ekspluatatsii]. M.: Klinrum, 2002. 304 p. (rus)

14. Seminenko A.S. Reduction of dust formation during pneumatic transport loading of powdered materials [Snizhenie pyleobrazovaniya pri pnevmotransportnoj zagruzke poroshkoobraznyh

materialov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No.4. Pp. 56–61. DOI: 10.12737/article_5ac31d7d349966.71461325 (rus)

15. Logachev K. I., Ziganshin A.M., Popov E.N., Averkova O.A., Kryukova O.S., Gol'tsov A.B. Experiment determining pressure loss reduction using a shaped round exhaust hood. Building and Environment. 2021. Vol. 181. 107124

16. Syromyasov A.O., Ponkratova Yu.V., Men-shakova T.V. On the issue of modeling the thermodynamic interaction of particles suspended in a two-dimensional medium [K voprosu modelirovaniya termodinamicheskogo vzaimodejstviya chastic, vzveshennyh v dvumernoj srede]. Journal of the Middle Volga Mathematical Community. 2021. No. 4. Pp. 444–460. DOI: 10.15507/2079-6900.23.202104.444-460 (rus)

17. Pandey P., Bharadwaj R., Chen X. Modeling of drug product manufacturing processes in the pharmaceutical industry. Predictive Modeling of Pharmaceutical Unit Operations. 2017. Pp. 1–13.

18. Zhuang J., Diao Y., Shen H. Numerical Investigation on Transport Characteristics of High-Temperature Fine Particles Generated in a Transiently Welding Process. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 176. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121471

19. Zeng L., Liu G., Gao J., Du B., Lu L., Cao C., Ye W., Tong L., Wang Y. A Circulating Ventilation System to Concentrate Pollutants and Reduce Exhaust Volumes: Case Studies with Experiments and Numerical Simulation for the Rubber Refining Process. Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 35. DOI: 10.1016/j.job.2020.101984

20. Dept G.B. Guide to good pharmaceutical manufacturing practice. H.M. Stationery Off. London, 1971. 302 p.

Information about the authors

Ilin, Egor A. Postgraduate student of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation. E-mail: Egor.Ilin.98@bk.ru. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya str., 4.

Received 21.05.2024

Для цитирования:

Ильин Е.А. Взаимодействие активированной струи и фармацевтического гранулятора // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 12. С. 47–57. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-47-57

For citation:

Ilin E.A. Investigation of the velocity of the activated jet at the surface of the pharmaceutical granulator. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 47–57. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-47-57

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-58-70

**Дребезгова М.Ю., Перькова М.В., Чернышева Н.В., Ладик Е.И.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
E-mail: mdrebezgova@mail.ru

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА БЕЛГОРОДА: ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Аннотация. Одна из ключевых тем в современной городской архитектурно-градостроительной практике – это реновация промышленных территорий, которые входят в состав городских центров и крупных градостроительных узлов. Несоответствие промышленных предприятий современным требованиям развития территории ведет к необходимости проведения их реорганизации и трансформации. В статье выполнен анализ промышленности города Белгорода, выявлены деградирующие промышленные территории, которые нуждаются в реорганизации и дальнейшем развитии. В исследовании определены этапы формирования и развития промышленных зон г. Белгорода: 1945–1880 гг. – характеризуется активной фазой восстановления и строительства промышленных предприятий; 1990-е гг. – раздробление мощных градообразующих баз на десятки респондентов в рамках одного предприятия; 2000 – 2015 гг. – формирование постиндустриальной промышленности; 2020 г. – по н.в. – потребность в формировании новых направлений для градообразующей базы, направленных на укрепление обороноспособности страны и южных рубежей России в частности. В ходе исследования территории г. Белгорода выделены четыре основные деградирующие промышленные территории, которые расположены в восточной части центрального планировочного района: АО «Стройматериалы», меловой карьер, завод «КонПрок», завод «Энергомаш». Предложены пути преодоления деградации промышленных территорий и обеспечения их адаптации к современным нуждам.

Ключевые слова: реорганизация, депрессивные территории, промышленные территории, реновация, адаптация.

Введение. Одна из ключевых тем в современной городской архитектурно-градостроительной практике – реновация промышленных территорий, которые входят в состав городских центров и крупных градостроительных узлов. Промышленные предприятия всегда располагались с учетом дальнейшей градостроительной политики и развития города. На ранних этапах развития городов производственные здания являются своеобразным ядром города. С естественным градостроительным развитием территории города исторические промышленные зоны оказываются в окружении современной жилой застройки. Возникает ситуация, при которой предприятию некуда больше развиваться территориально, и оно переносится за пределы города, что позитивно влияет на экологическую и эстетическую составляющую городской среды, потому что промышленные предприятия «вытесняются» из селитебных зон [1–3]. После переноса предприятия или прекращения деятельности на территории остаются промышленные площадки с устаревшим производственным оборудованием и уже не используемыми объектами промышленной архитектуры [1]. В худшем случае происходит постепенная деградация таких пространств.

При грамотной градостроительной политике включение бывших промышленных территорий в программу реноваций ведет к улучшению качества городской среды, учитывая архитектурно-строительные и художественно-эстетические

требования. Но вместе с тем, перед градостроителями и архитекторами возникает ряд сложных задач, связанных с адаптацией бывших промышленных территорий и их интеграции в современную городскую среду или социальную инфраструктуру [4–6]. Это позволит улучшить экономическое, социальное, культурное, экологическое градостроительное развитие районов города и создаст земельный резерв для строительства.

Данной теме посвящено достаточно большое количество работ прикладного характера [7–10]. Проведенные исследования можно сгруппировать по следующим направлениям:

- адаптации промышленных объектов к новому средовому контексту: Глазычев В.Л., Гутнов А.Э., Каганов Г.З., Кириченко Е.И., Яковлев А.А., Кондратьева Ю.О., Кохно Б.И., Курбатов Ю.И., Махровская А.В., Штиглиц М.С., Яргина З.Н., Воронина Н.В.;
- преобразования бывших промышленных зон под озелененные территории: Фролов С.С., Лазарева И.В., Лазарев К.В., Воронина А.В., Миц Г.В., Хромов Ю.Б.;
- истории, исследования и сохранения индустриального наследия: Штиглиц М.С., Запарий В.В., Лотарева Р.М., Подольский Р.П., Алексеев В.В., Федосеева И.В., Слукин В.М., Казанцев Ю.И., Калита С.П., Юркин И.Н., Гранстрем М.А., Тютюнник Ю.Г.;
- формирования природно-экологического каркаса на нарушенных и постиндустриальных

территориях: Ахмедова Е.А., Владимиров В.В., Литвинов Д.В., Краснощекова Н.С., Красильникова Э.Э., Курбатова А.С., Птичникова Г.А., Чистякова С.Б., Нгуен Н.Н.;

- совершенствования эстетических качеств городской среды и повышения их социальной эффективности: Фролов С.С., Курбатов Ю.И.;

- организации городских пространств и формирования архитектурной среды: Крашенинников А.В., Большаков А.Г.;

- преобразования городского ландшафта с позиции повышения экологической устойчивости среды: Енин А.Е., Красильникова Э.Э., Нефедов В.А., Тетиор А.Н.;

- формирования ландшафта с точки зрения организации рекреационной деятельности: Литвинов Д.В., Гуськова Е.В., Задворянская Т.И., Лекарева Н.А., Маташова М.А.;

- историко-культурной среды Центрального Черноземья: Енин А.Е., Холодова Е.В., Чесноков Г.А., Перькова М.В.;

- охраны культурного наследия Белгородской области: Колесникова Л.И., Собровин В., Осыков Б., Овчинников В.В.

Сформировался целый ряд концепций и сценариев развития бывших промышленных территорий, таких как концепции «ресурсосберегающего города», «креативного города», «тактического урбанизма», «поэтапного урбанизма» [11, 12]. Последние концепции особенно популярны, рассматривают преобразование территорий при ограниченных ресурсах, а также постепенное включение деградирующих территорий в современный контекст, когда город и его жители сами запускают процесс интеграции территорий [13]. Изучены теории «экологической реконструкции», «вторичной природы», «экологического каркаса» как необходимость ландшафтно-экологической реконструкции промышленных территорий. Рассмотрены ранее разработанные методы ландшафтно-экологической реконструкции промышленных зон на примере исследования Нгуена Н.Н., предложения по формированию промышленного района Ворониной Н.В., изучена методика архитектурной адаптации индустриального наследия к новой функции Яковлева А.А. [14]. Авторы учитывали также результаты исследований [15–19] при разработке сценариев адаптации деградирующих промышленных территорий.

Целью исследования является анализ существующей промышленной застройки города Белгорода с выявлением депрессивных территорий и разработка методических рекомендаций по их дальнейшей адаптации на основе трех направлений реновации среды.

Особенностью преобразования промышленных территорий является наличие ряда внешних и внутренних факторов. Авторы учитывают, что на сегодняшний день основным внешним лимитирующим фактором градостроительного развития Белгородского региона, в том числе бывших промышленных территорий является геополитический. Также выявлены факторы, которые влияют на определение предметной области проектов преобразования промышленных территорий. К внешним факторам относятся: геополитические, экономические, экологические, градостроительные, социокультурные.

К внутренним факторам относятся: экономические, охранно-реабилитационные, планировочные, конструктивные, эстетические.

Теоретическая значимость заключается в разработке методических рекомендаций по дальнейшей адаптации бывших промышленных территорий на основе трех направлений реновации среды, который предполагает сохранение, частичное сохранение, радикальное преобразование промышленной функции.

Материалы и методы.

Теоретико-методологической основой исследования является изучение социально-экономического процесса формирования промышленных зон в исторической ретроспективе, включающее период индустриализации и происходящие процессы на территории промышленных предприятий г. Белгорода. В исследовании применяется комплексный подход, ретроспективный анализ градостроительного развития территории, натурные обследования с фотофиксацией и проблемным анализом. В работе используются картографические материалы, документы территориального планирования и градостроительного зонирования г. Белгорода. Также использовалось экспериментальное моделирование сценариев развития, построение прямых и косвенных аналоговых моделей.

Основная часть. Основу развития г. Белгорода в послевоенный период [20] во многом определяли различные промышленные предприятия, формирующие вокруг себя районы жилой застройки. В 1940 году в Белгороде числилось 23 промышленных предприятия, где было занято более двух тысяч рабочих.

Во время Великой Отечественной войны (1941–1945 гг.) практически все промышленные предприятия г. Белгорода были разрушены или остановлено их строительство. С 1945 г. началось восстановление разрушенных промышленных предприятий и строительство новых (трубного и шиферного заводов, маслозавода, комбината ас-

боцементных изделий и др.). Одновременно восстанавливались и строились заново жилые кварталы и общественные здания (рис. 1, а).

Одним из первых заводов, строительство которого в 1945 г. было возобновлено после окончания войны был котлостроительный завод, который представил первую продукцию в 1952 г. (энергетические котлы и трубопроводы). В апреле 1977 г. котлостроительный завод переименовали в завод энергетического машиностроения имени 60-летия СССР «Энергомаш». В 1946 г. был образован Белгородский литейно-механический завод (ранее назывался "13 лет Октября"). Завод специализировался на производстве сельскохозяйственного инвентаря, радиаторов и т.д. С 1954 года город Белгород становится областным центром, появляются новые предприятия, расширяются старые. Строится механизированный хлебокомбинат, мясокомбинат. В период с 1959 по 1970 гг. построены витаминный комбинат, слюдяная фабрика, институт «Центрогипроруда», новые жилые кварталы и микрорайоны. В 1965 г. началось строительство Белгородского опытно-промышленного завода шлифовальной шкурки на синтетических клеях. В 1967 г. завод был пере-

именован в Белгородский опытно-промышленный завод (БАЗ), а с 1992 г. и по настоящее время является АОО «Белгородский абразивный завод». Также на заводе осуществлялось производство товаров культурно-бытового и хозяйственного назначения. В 1968 г. был образован завод «Ритм». С 1970 по 1980 гг. осуществлялось строительство промышленных предприятий (рис. 1, б): заводов «Фрез», авторемонтного, «Металлоконструкций» и швейной фабрики [20]. В 1973 г. начал работу Белгородский завод металлоконструкций для объектов промышленности и строительства, сельского хозяйства. Также на заводе изготавливались товары народного потребления. В июле 1977 г. начал осуществлять производство металлообрабатывающих инструментов завод «Фрез». Помимо основного профиля на заводе оказывались услуги учебного и научно-технического характера. В настоящее время крупные промышленные предприятия в основном располагаются в центральной части города и представляют собой довольно значительные по площади территории, как минимум с трех сторон окруженные жилой застройкой различных морфотипов (рис. 1, в) [18].

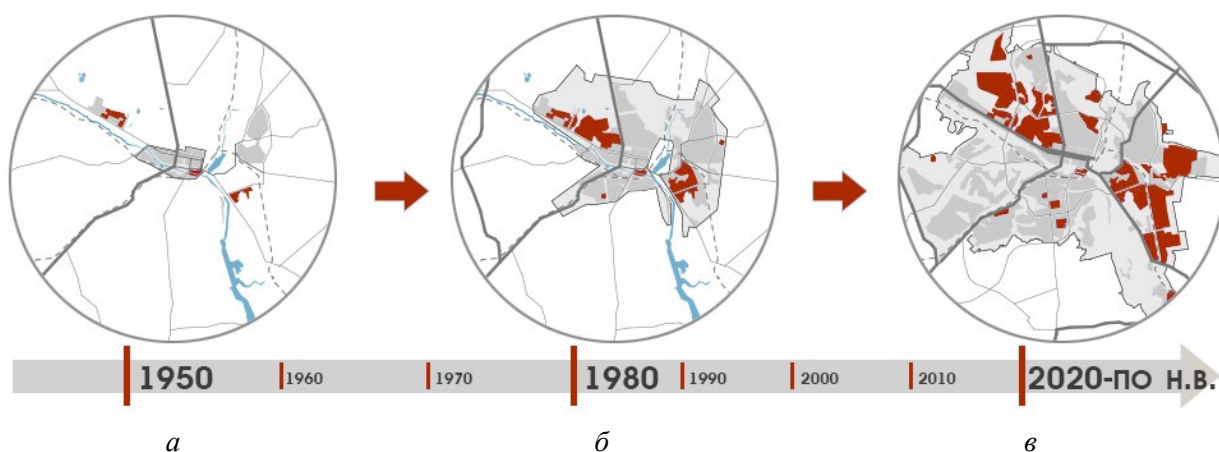


Рис. 1. Схема градостроительного развития территории г. Белгорода.

Разраб. Дребезгова М.Ю.

Согласно генеральному плану развития г. Белгорода до 2025 г. доля промышленных территорий в его черте составляет 13%. При этом на центральный планировочный район приходится 50% таких территорий (рис. 2). В Западной части центрального планировочного района г. Белгорода располагаются заводы: «Энергомаш», цементный, асбестоцементный, ЖБИ-4, «Цитробел», «Сокол», «Ритм», деревообрабатывающий и др. В восточной промышленной зоне г. Белгорода расположены заводы металлоконструкций, фрез, абразивный, «Новатор», ЖБИ-1, пивной завод «Очаково», мясокомбинат и др.

В основном эти промышленные территории являются закрытыми зонами и создают транс-

портные разрывы в городской ткани. Значительную часть территории в городской черте занимают карьеры строительных материалов, напрямую относящиеся к промышленным предприятиям. Необходимо провести оптимизацию данных деградирующих территорий за счет внедрения новых форм промышленности или изменения их функционального назначения.

Проведены натурные обследования имеющихся промышленных территорий, которые открыты для широкого доступа. Проведен проблемный анализ территории, осуществлена фотофиксация объектов. По результатам обследования предлагается разделить имеющиеся промышленные объекты на бывшие (не функционирующие), частично действующие (в том числе в

стадии реновации) и действующие, имеющие значительное количество респондентов. В результате исследования существующей ситуации в промышленных зонах г. Белгорода выявлены

устойчивые и бывшие (деградирующие) промышленные территории в центральном планировочном районе (рис. 3), которые нуждаются в адаптации к современным условиям.

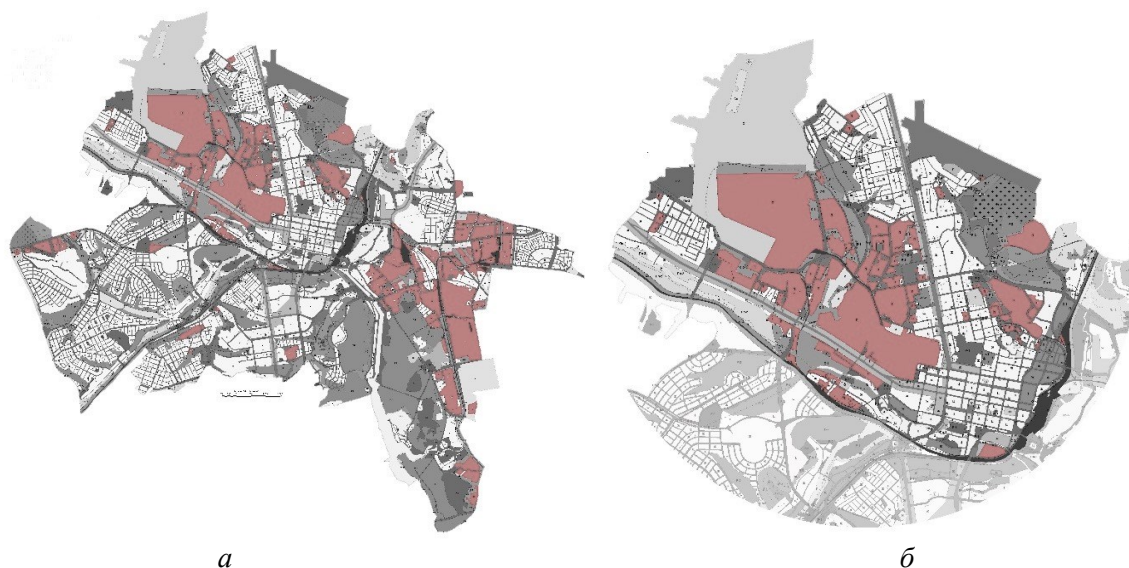


Рис. 2. Генеральный план г. Белгорода (а) и фрагмент генерального плана центрального планировочного района (б). Разраб. Галдин Р.Е., Дребезгова М.Ю.

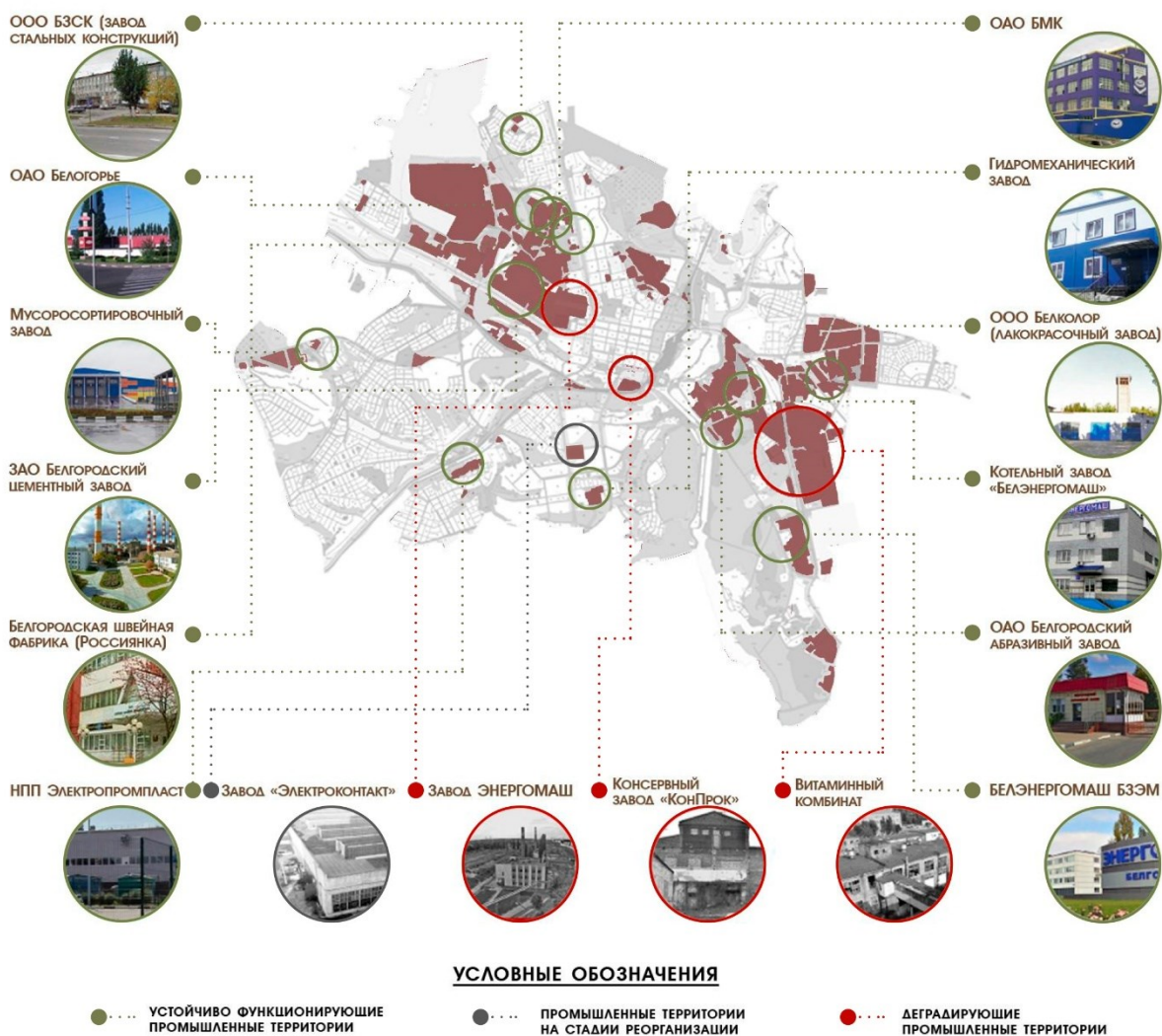
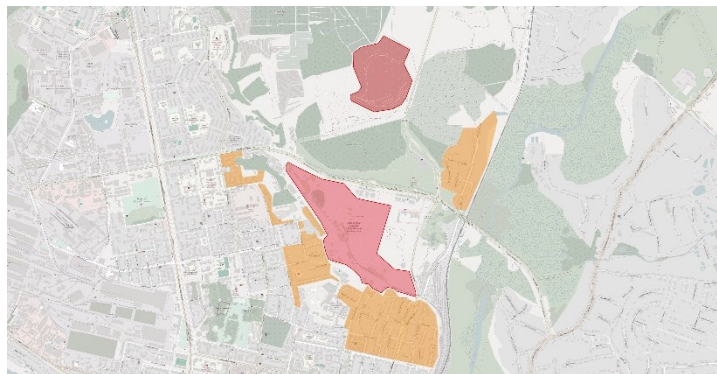


Рис. 3. Анализ промышленных предприятий г. Белгорода.

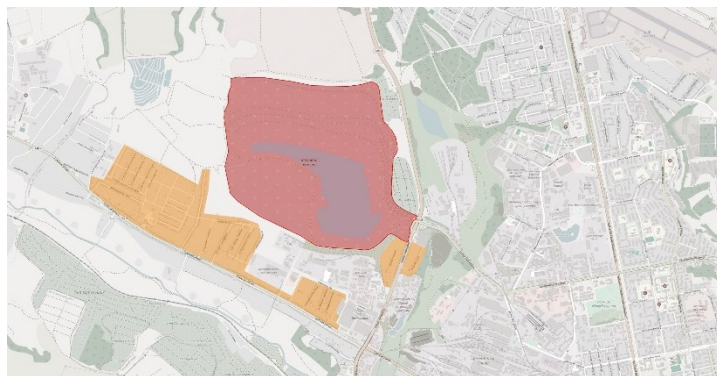
Первой деградирующей промышленной территорией, расположенной в восточной части центрального планировочного района, является АО «Стройматериалы» (рис. 4, а), занимающее площадь 1 090 596,88 м² (включая карьеры) и санитарно-защитную зону 300 м. Вынос комбината

стройматериалов за город нецелесообразен до выработки мелового карьера, но необходимы мероприятия по снижению отрицательного воздействия на окружающую среду, за счет рекультивации и озеленения территории отработанных карьеров.

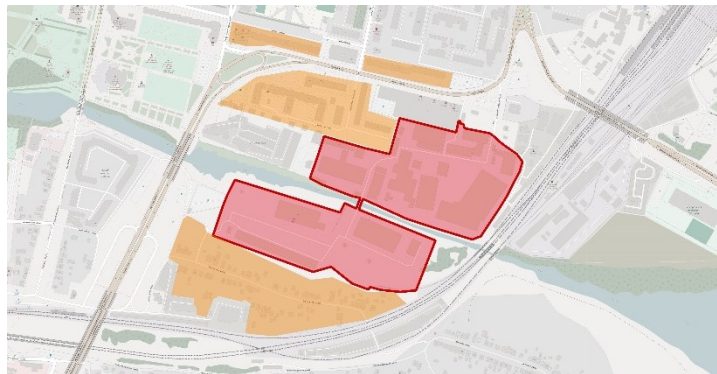
а



б



в



г

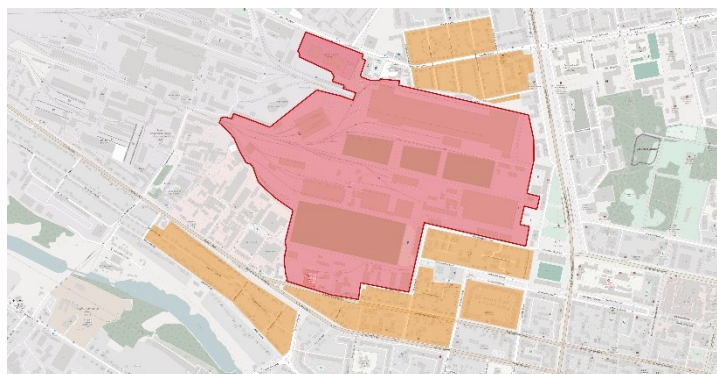


Рис. 4. Фотофиксация и ситуационная схема территории в структуре микрорайона:
а – АО «Стройматериалы»; б – меловой карьер цементного завода;
в – ООО «КонПрок»; г – завод «Энергомаш»

Второй деградирующей территорией является меловой карьер цементного завода площадью 2 547 917,94 м² (рис. 4, б), расположенный в западном планировочном районе в непосредственной близости от селитебной застройки, попадающей в санитарно-защитную зону 1000 м. Для эффективного использования и комплексного устойчивого развития данной территории необходимо изъять её из производственной зоны и внести в зону природного ландшафта.

Земельный участок площадью 172 990,30 м² с расположенным на нем Консервно-промышленным комплексом «КонПрок» (рис. 4, в), является третьей деградирующей промышленной территорией, нарушающей экологию и природный баланс и противоречащей градостроительной концепции развития города Белгорода. Более 70 лет назад, в соответствии с генеральным планом города Белгорода (рис. 1, а), устойчиво развивающийся завод «КонПрок» располагался на окраине города и максимально эффективно выполнял свою функцию. В настоящее время с учетом интенсивности роста города территория завода оказалась расположенной в его центральной части, вызывая ряд природно-экологических, градостроительных и социально-экономических проблем. Комбинат «КонПрок» рекомендуется вынести в Восточный планировочный район из-за нарушения функционального зонирования территории и градостроительного регламента. Территорию самого предприятия необходимо привести в соответствие с генеральным планом развития города Белгорода.

Четвертая деградирующая промышленная территория площадью 171 637,96 м² – завод «Энергомаш» (рис. 4, г). Данная территория используется не полностью (площадь, занимаемая зданиями и сооружениями, составляет лишь 40 %). Основная деятельность предприятия сейчас организована на второй производственной площадке (ул. Волчанская, 165). Для того, чтобы сделать территорию первой производственной площадки завода «Энергомаш» по ул. Котлозаводская благоприятной для жизнедеятельности и соответствующей концепции устойчивого развития территорий, необходимо наполнить её новыми функциями, «вдохнуть жизнь» в депрессивную территорию, восстановить её жизнеспособность и изменить облик в соответствии с современными требованиями комфортной городской среды.

Результаты

Учитывая имеющийся теоретический и практический опыт реновации бывших промышленных территорий в административных грани-

цах населенного пункта, предлагаются методические рекомендации по их дальнейшей адаптации на основе трех направлений реновации среды:

1) рефункционализация (изменение промышленной функции на новую в соответствии с социокультурным запросом и интересами инвесторов);

2) реконструкция промышленных объектов (под коммерческие помещения для малого и среднего бизнеса, организацию коворкингов, объектов питания, закрытых спортивных парков, общественных пространств со смешанной функцией, спортивных объектов);

3) модернизация (формирование промышленных парков, в том числе основанных на идее промышленного симбиоза, организация технологических парков с сохранением направленности производства, создание инновационных/экспериментальных кластеров или дополнительно формирование бизнес-инкубаторов при основном функционирующем производстве).

Направления реновации с сохранением или частичным изменением промышленной функции, реконструкцией промышленных объектов под коммерческие помещения, строительство новых жилых и общественных зданий в случае имеющейся возможности, организация различных видов парков, скверов, создание спортивных объектов позволят добиться максимально эффективного результата интеграции бывших (деградирующих) промышленных или частично действующих территории в городскую среду, улучшить ее качество, укрепить градообразующую базу, способствовать увеличению рабочих мест и развитию человеческого потенциала.

Предложенная методическая последовательность позволит поэтапно выполнить программу адаптации территории промышленного назначения и добиться максимально эффективного результата в повторном использовании территорий, прилегающих как к историческому центру, так и находящихся на окраинах городов (рис. 5).

Первый блок – комплексный анализ территории, который включает в себя изучение градостроительной документации и особенностей землепользования; количество имеющихся респондентов, в целом ресурсного потенциала; выявление ценностных характеристик имеющихся объектов (выявление памятников архитектуры или объектов, обладающих признаками культурного наследия для дальнейшего внесения их в реестр объектов охраны); определение экологических и историко-культурных характеристик (оценка уровня возможной реабилитации территории с последующим сохранением природно-экологического и историко-культурного ландшафта тер-

ритории); определение градостроительного, экономического, социального и инженерно-технического потенциала (комплексная оценка масштабов реновации и дальнейшего развития промыш-

ленной территории); выявление основных проблем (для определения наиболее эффективной стратегии реновации); социокультурный анализ или социологическое исследование по необходимости.

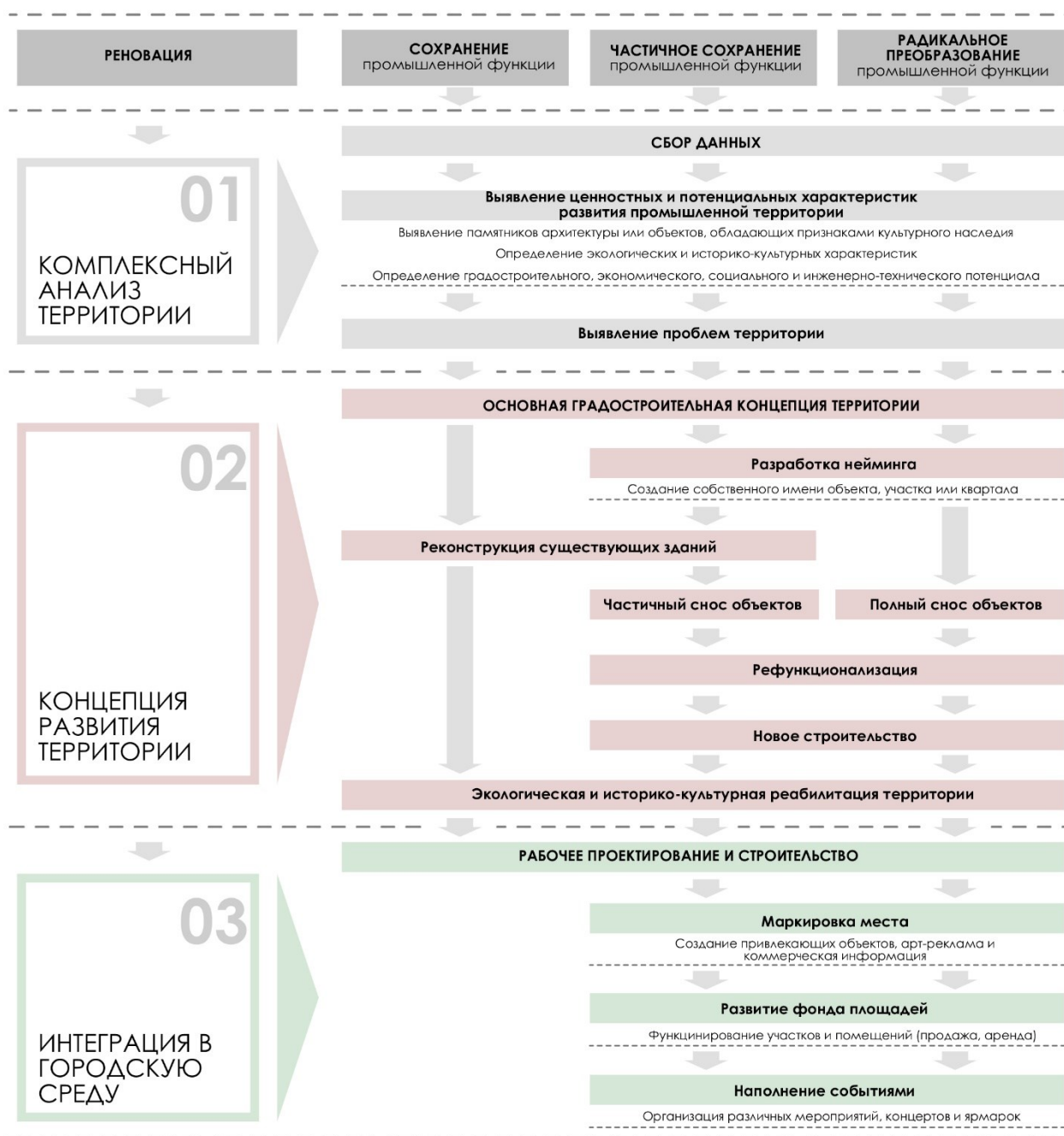


Рис. 5. Методическая последовательность адаптации промышленных территорий.

Разраб. Перькова М.В., Касенкова Я.А.

Второй блок – концепция градостроительного развития территории, включающая: реконструкцию планировочной структуры при условии сохранения наиболее устойчивых планировочных характеристик, позволяющих максимально эффективно использовать деградирующую промышленную территорию в градостроительном контексте; разработку объемно-планировочной концепции (должна быть разработана с учетом существующей окружающей застройки и

не противоречить основным ландшафтно-визуальным факторам территории), а в последующем проектной документации; разработку нейминга; реконструкцию существующих зданий, сохранение их первоначального облика (актуально для памятников промышленной архитектуры), а также пристройку и надстройку к промышленным объектам (позволит обновить архитектурный облик разрушающегося промышленного здания); рефункционализацию существующих

индустриальных объектов согласно критериям социально-культурной востребованности и актуальности (перепрофилирование промышленных объектов под новые функции); частичный или полный снос объектов (позволит освободить площадку для строительства новых зданий или для формирования рекреационной зоны, которая позволит развить природно-экологический каркас территории); новое строительство, включение новых объектов в историко-промышленные территории (иногда снос промышленного объекта и использование территории в других целях) позволит повысить плотность застройки и организовать новую функциональную деятельность на деградирующей промышленной территории; экологическую и историко-культурную реабилитацию территории за счет рекультивации нарушенных территорий, создание новых зеленых массивов (парков, скверов, аллей) и благоустройство территории с учетом актуальных экологических требований к промышленным зонам.

Третий блок – интеграция в городскую среду. В данный блок алгоритма реновации промышленных территорий входит: рабочее проектирование и строительство; инженерно-коммуникативные мероприятия (внедрение новых технологий производства в существующий объем здания или во вновь возведенные объекты для более ускоренной адаптации промышленных зон к современным социально-экономическим требо-

ваниям); маркировка места в физическом пространстве (создание привлекающих внимание объектов: стильные баннеры, граффити на фасадах зданий, а также арт-рекламы); развитие фонда площадей (продажа, аренда); наполнение событиями (организация различных мероприятий, концертов и ярмарок).

Разработаны 5 моделей адаптации объектов индустриального наследия в городской среде:

1. Пространственная прямая аналоговая **модель рефункционализации** промышленной территории на примере АО «Электроконтакт». Предполагает изменение промышленной функции и реконструкцию промышленных объектов под коммерческие помещения (бизнес-инкубаторы и региональные технопарки), спортивный объект, организацию парка и сквера на территории (рис. 6).

2. Пространственная прямая аналоговая **модель реновации** промышленной территории на примере Консервно-промышленного комплекса «КонПрок» (Перцев В.В., Перькова М.В., Касенкова Я.А.). Предполагает частичный снос производственных объектов, частичное изменение промышленной функции, реконструкцию промышленных объектов под коммерческие помещения, строительство новых жилых и общественных зданий. Формируемый лофт-квартал включает проектирование набережной, рекреационной территории, новых социальных объектов (рис. 7).



Рис. 6. Пространственная прямая аналоговая модель рефункционализации промышленной территории на примере АО «Электроконтакт».

3. Пространственная косвенная аналоговая модель модернизации промышленной территории на примере промышленной территории бывшего витаминного комбината (Перькова М.В., Серебренников А.А.). Предполагает формирова-



Рис. 7. Пространственная прямая аналоговая модель реновации промышленной территории на примере Консервно-промышленного комплекса «КонПрок». Разраб. Перцев В.В., Перькова М.В., Касенкова Я.А.

ние замкнутого цикла функционирования предприятий разных отраслей на основе промышленного симбиоза (рис.8).

4. Пространственная прямая аналоговая модель реновации промышленной территории на примере мелового карьера «Полигон» (Перцев

В.В., Дребезгова М.Ю.). Предполагает диверсификацию земельных участков – создание агропромышленного парка с агропромышленным и офисно-научным кластером, а также развитие рекреационной инфраструктуры (рис.9).

5. Пространственная косвенная аналоговая модель модернизации промышленной территории, направленная на обеспечение обороноспособности страны. Предполагает модернизацию имеющихся ресурсов для организации объектов (в том числе закрытого типа).

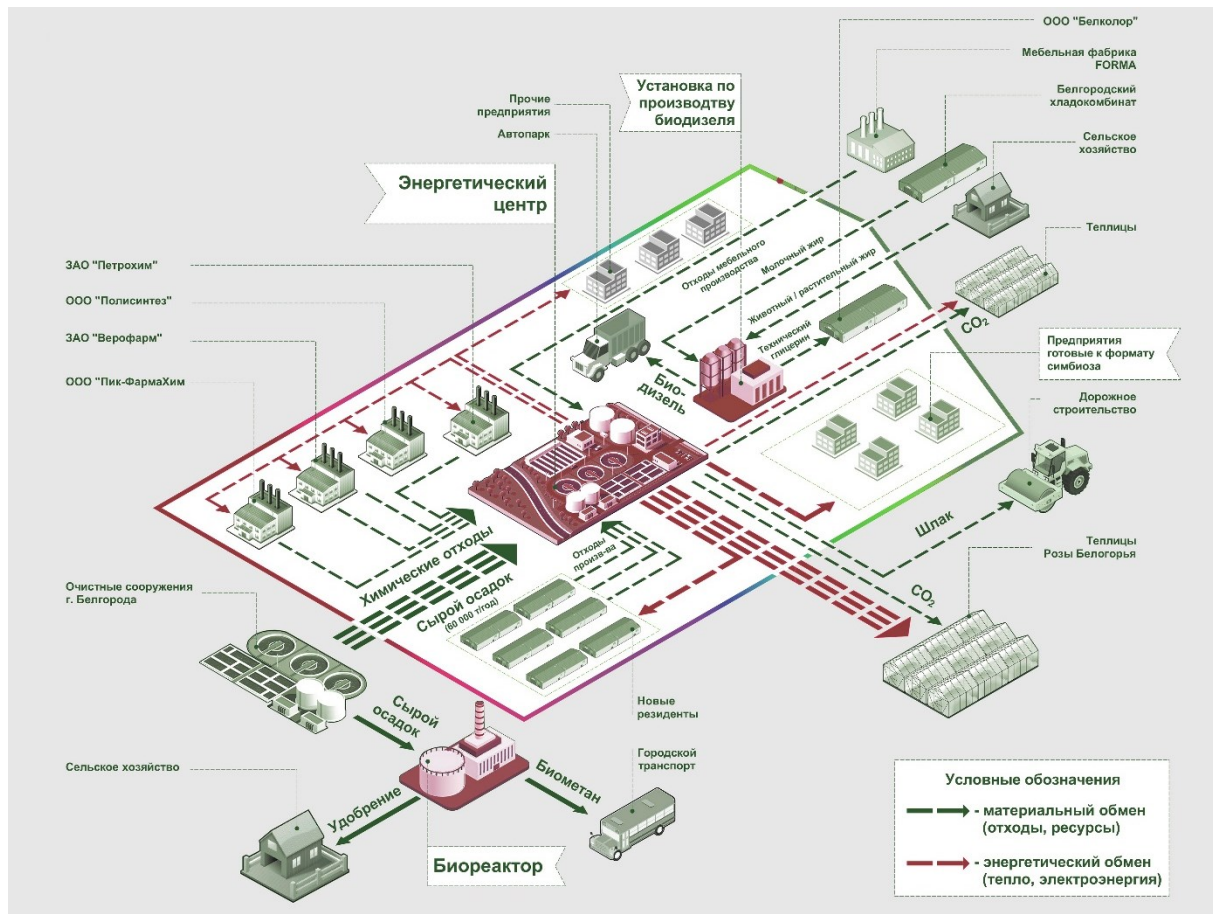


Рис. 8. Пространственная косвенная аналоговая модель модернизации промышленной территории на примере промышленной территории бывшего витаминного комбината.

Разраб. Перькова М.В., Серебренников А.А.

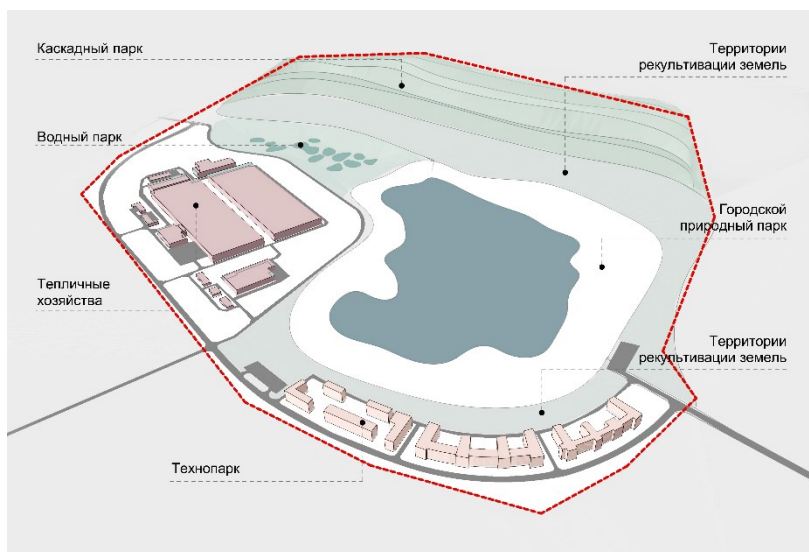


Рис. 9. Пространственная прямая аналоговая модель реновации промышленной территории на примере мелового карьера «Полигон»

Для успешного преодоления деградации бывших промышленных территорий и обеспечения их адаптации к современным нуждам предполагается:

- Приведение зданий и сооружений в соответствии с современными стандартами, включая их перепрофилирование под новые виды деятельности, такие как производство оборонной продукции или организация логистических центров.
- Стремление к самообеспечению и уменьшению зависимости от внешних поставок. Это может быть достигнуто через поддержку местных производителей, разработку новых технологий и поощрение инновационных проектов, что в целом будет способствовать экономической независимости региона.
- Оценка и структурирование наиболее перспективных направлений для привлечения инвестиций, что позволит задействовать как местные, так и федеральные ресурсы для обновления и развития промышленной инфраструктуры.

Выводы.

Исследование этапов формирования и развития промышленных зон г. Белгорода позволяет понять трансформацию градообразующей базы и её влияние на экономическую и социальную структуру города и страны в целом в условиях приграничного расположения. Формирование промышленных зон г. Белгорода с момента организации Белгородской области по настоящее время включает 4 основных этапа:

- 1) 1954 - 1880 гг. характеризуется активной фазой восстановления разрушенных промышленных предприятий после ВОВ и строительства промышленных предприятий.
- 2) 1990 - 2000 гг. – реорганизация структуры промышленных объектов, раздробление мощных градообразующих баз на десятки респондентов в рамках одного предприятия;
- 3) 2000 – 2020 гг. – адаптация промышленных предприятий к постиндустриальному периоду;
- 4) 2020 г – по настоящее время – формирование новых направлений развития градообразующей базы и имеющихся предприятий, направленных на укрепление обороноспособности страны.

В ходе анализа промышленных территорий в настоящее время были выделены четыре основные бывшие (деградирующие) промышленные территории, которые расположены в восточной части центрального планировочного района: АО «Стройматериалы», меловой карьер, завод «КонПрок», завод «Энергомаш». Адаптацию таких территорий предлагается осуществлять на

основе методических рекомендаций по их дальнейшей адаптации на основе трех направлений реновации среды.

Важно также учитывать, что трансформация промышленных зон должна происходить в контексте общей градостроительной политики г. Белгорода, обеспечивая интеграцию новых пространств с уже существующими элементами городской инфраструктуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов А.В. Архитектурно-пространственное преобразование территорий промышленных предприятий в городской застройке // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2013. №1. С. 25–28.
2. Гинеева А. В., Шаповаленко Я. И., Деркач Н. В. Промышленность как градообразующий фактор // Academy. 2017. №12 (27). С. 43–45.
3. Дрожжин Р.А. Реновация промышленных территорий // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2015. № 1 (11). С. 84–86.
4. Цитман Т.О., Богатырева А.В. Реновация промышленной территории в структуре городской среды // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2015. №4 (14). С. 29–35.
5. Гордей А.А., Абакумов Р.Г. Необходимость и особенности реконструкции городских территорий, находящихся в производственном фонде действующих промышленных предприятий г. Белгорода // Инновационная наука. 2017. №4-1. С. 69–71.
6. Бессарабова Я. И., Евтушенко-Мулукаева Н. М. Архитектурная адаптация промышленного предприятия к новой функции // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2019. №2 (28). С. 28–33.
7. Снитко А. В. Реновация промышленных объектов и архитектурно-историческая среда: вопросы корреляции // Архитектура, градостроительство и дизайн. 2022. № 1 (31). С. 19–28.
8. Снитко А. В. Вопросы реновации архитектурной среды исторических промышленных предприятий // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 2. С. 19–22.
9. Антюфеев А. В. Градостроительная реновация депрессивных производственных территорий в крупных индустриальных городах (на примере Волгограда) // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2015. № 1 (9). С. 100–105.
10. Lapidus A., Dmitry T. Formation of Methods for Assessing the Effectiveness of Industrial Areas' Renovation Projects // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 3, Prague, 18–22

июня 2018 года. Prague, 2019. 022034. DOI: 10.1088/1757-899X/471/2/022034.

11. Mehaffy M. Tactical Urbanism Using «Pattern Language» Toolkits. [Электронный ресурс] URL: http://www.cnu.org/sites/www.cnu.org/files/tactical_urbanism_with_pattern_language_toolkits-mehaffy.pdf (дата обращения: 18.11.2022).

12. Sturm T. D. Incremental Urbanism and the Art of Revitalization [Электронный ресурс] URL: <http://buildipedia.com/aec-pros/urban-planning/incrementalurbanism-and-the-art-of-revitalization> (дата обращения: 18.11.2022).

13. Голованов Е.Б., Киселева В.А. Развитие редевелопмента как направления по преобразованию городских территорий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2013. Т. 7. № 3. С. 12-16.

14. Яковлев А.А. Индустриальное наследие. Анализ современного состояния предприятия // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 3 (25). С. 41–47.

15. Perkova M.V., Baklazhenko E.V., Vaytens A. G. Urban Conflicts of the Belgorod Regional Settlement System and its Elements // IOP Conference

Series: Materials Science and Engineering, Vladivostok, 02–04 октября 2018 года. Vol. 463, Part 3. Vladivostok: Institute of Physics Publishing, 2018. P. 032014. DOI 10.1088/1757-899X/463/3/032014.

16. Перькова М.В., Заикина А. С. Пути решения проблем деградирующих территорий в г. Шебекино // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 58-63.

17. Перькова М.В., Ладик Е. И. Формирование рекреационных зон на нарушенных территориях // Синергия наук. 2017. №16. С. 427-436.

18. Drebezgova M. Y., Perkova M. V., Ladik E. I., Percev V. V., Chernyshev Y. V. Adaptation of Industrial Territories // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 227. Pp. 175–184. DOI: 10.1007/978-3-030-94770-5_13.

19. Perkova M.V., Drebezgova M.Y. Experience of reorganization of depressed industrial areas // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/944/1/012024.

20. Акимова Л.В., Горбачева Л.В., Дмитриева З.П., Кривцова Е.В., Погребняк Е.Д., Топчий Е.В., Утенина Т.И. Путеводитель. Государственный архив Белгородской области [Электронный ресурс] URL: <https://belarchive.ru/assets/files/putevoditel.pdf> (дата обращения: 19.11.2022).

Информация об авторах

Дребезгова Мария Юрьевна, кандидат технических наук, доцент Высшей школы дизайна и архитектуры. E-mail: mdrebezgova@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б.

Перькова Маргарита Викторовна, доктор архитектуры, директор Высшей школы дизайна и архитектуры. E-mail: perkova.margo@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б.

Чернышева Наталья Васильевна, доктор технических наук, профессор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. E-mail: chernysheva56@rambler.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б.

Ладик Елена Игоревна, кандидат архитектуры, доцент Высшей школы дизайна и архитектуры. E-mail: krushelnitskaya.lena@yandex.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б.

Поступила 09.04.2024 г.

© Дребезгова М.Ю., Перькова М.В., Чернышева Н.В., Ладик Е.И., 2024

***Drebezgova M.Yu., Perkova M.V., Chernysheva N.V., Ladik E.I.**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

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

INDUSTRIAL TERRITORIES OF THE CITY OF BELGOROD: URBAN PLANNING ANALYSIS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Abstract. *One of the key topics in modern urban architectural and urban planning practice is the renovation of industrial territories that are part of city centers and large urban planning nodes. The inconsistency*

of industrial enterprises with modern requirements for territorial development leads to the need for their reorganization and transformation. The article analyzes the industry of the city of Belgorod, identifies degrading industrial areas that need reorganization and further development. The study identifies the stages of formation and development of industrial zones of Belgorod: 1945 - 1880 - characterized by an active phase of restoration and construction of industrial enterprises; 1990s - fragmentation of powerful city-forming bases into dozens of respondents within one enterprise; 2000 - 2015 - formation of post-industrial industry; 2020 - present - the need to form new directions for the city-forming base aimed at strengthening the defense capability of the country and the southern borders of Russia in particular. During the study of the territory of Belgorod, four main degrading industrial territories were identified, which are located in the eastern part of the central planning area: AO Stroymaterialy, chalk quarry, KonProk plant, Energomash plant. Ways to overcome the degradation of industrial territories and ensure their adaptation to modern needs are proposed.

Keywords: reorganization, depressed territories, industrial territories, renovation, adaptation.

REFERENCES

1. Popov A.V. Architectural and spatial transformation of the territories of industrial enterprises in urban development [Arhitekturno-prostranstvennoe preobrazovanie territorij promyshlennyh predpriyatij v gorodskoj zastrojke]. Academic Bulletin Ural-NIIproekt RAASN. 2013. No. 1. Pp. 25–28. (rus)
2. Gineeva A.V., Shapovalenko Ya. I., Derkach N. V. Industry as a city-forming factor [Promyshlennost' kak gradoobrazuyushchij factor]. Academy. 2017. No. 12 (27). Pp. 43–45. (rus)
3. Drozhzhin R.A. Renovation of industrial territories [Renovaciya promyshlennyh territorij]. Bulletin of the Siberian State Industrial University. 2015. No. 1 (11). Pp. 84–86. (rus)
4. Tsitman T.O., Bogatyreva A.V. Renovation of the industrial territory in the structure of the urban environment [Renovaciya promyshlennoj territorii v strukture gorodskoj sredy]. Engineering and construction bulletin of the Caspian Sea. 2015. No. 4 (14). Pp. 29–35. (rus)
5. Gordey A.A., Abakumov R.G. Necessity and features of the reconstruction of urban areas located in the production fund of existing industrial enterprises in Belgorod [Neobhodimost' i osobennosti rekonstrukcii gorodskih territorij, nahodyashchihся v proizvodstvennom fonde dejstvuyushchih promyshlennyh predpriyatij g. Belgoroda]. Innovatsionnaya nauka. 2017. No. 4-1. Pp. 69–71. (rus)
6. Bessarabova Ya.I., Evtushenko-Mulukaeva N. M. Architectural adaptation of an industrial enterprise to a new function [Arhitekturnaya adaptaciya promyshlennogo predpriyatiya k novoj funkcii]. Engineering and construction bulletin of the Caspian Sea. 2019. No. 2 (28). Pp. 28–33. (rus)
7. Snitko A.V. Renovation of industrial facilities and architectural and historical environment: issues of correlation [Renovaciya promyshlennyh ob"ektov i arhitekturno-istoricheskaya sreda: voprosy korrelyacii]. Architecture, urban planning and design. 2022. No. 1 (31). Pp. 19–28. (rus)
8. Snitko A.V. Issues of renovation of the architectural environment of historical industrial enterprises [Voprosy renovacii arhitekturnoj sredy istoricheskikh promyshlennyh predpriyatij]. Industrial and civil construction. 2008. No. 2. Pp. 19–22. (rus)
9. Antyufeev A.V. Urban planning renovation of depressive industrial territories in large industrial cities (on the example of Volgograd) [Gradostroitel'naya renovaciya depressivnyh proizvodstvennyh territorij v krupnyh industrial'nyh gorodah (na primere Volgograda)]. Biospheric compatibility: man, region, technologies. 2015. No. 1 (9). Pp. 100–105. (rus)
10. Lapidus A., Dmitry T. Formation of Methods for Assessing the Effectiveness of Industrial Areas' Renovation Projects . IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 3, Prague, June 18–22, 2018. Prague, 2019. 022034. DOI 10.1088/1757-899X/471/2/022034.
11. Mehaffy M. Tactical Urbanism Using "Pattern Language" Toolkits. [Electronic resource] URL: http://www.cnu.org/sites/www.cnu.org/files/tactical_urbanism_with_pattern_language_toolkits-mehaffy.pdf (accessed 11/18/2022).
12. Sturm T.D. Incremental Urbanism and the Art of Revitalization [Electronic resource] URL: <http://buildipedia.com/aec-pros/urban-planning/incrementalurbanism-and-the-art-of-revitalization> (Accessed: 18.11. 2022).
13. Golovanov E.B., Kiseleva V.A. Development of redevelopment as a direction for the transformation of urban areas [Razvitie redevelopment kak napravleniya po preobrazovaniyu gorodskih territorij]. Bulletin of the South Ural State University. Series: Economics and Management. 2013. Vol. 7. No. 3. Pp. 12–16. (rus)
14. Yakovlev A.A. Industrial heritage. Analysis of the current state of the enterprise [Industrial'noe nasledie. Analiz sovremennogo sostoyaniya predpriyatiya]. Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2013. No. 3 (25). Pp. 41–47. (rus)
15. Perkova M.V., Baklazhenko E.V., Vaytens A.G. Urban Conflicts of the Belgorod Regional Settlement System and its Elements. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018.

Vol. 463/ 032014. DOI[^] 10.1088/1757-899X/463/3/032014.

16. Perkova M.V., Zaikina A.S. Ways of solving the problems of degrading territories in Shebekino [Puti resheniya problem degradiruyushchih territorij v g. Shebekino]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 6. Pp. 58-63. (rus)

17. Perkova M.V., Ladik E. I. Formation of recreational zones in disturbed territories [Formirovanie rekreatsionnyh zon na narushennyh territoriyah]. Synergy of Sciences. 2017. No. 16. Pp. 427-436. (rus)

18. Drebezgova M. Y., Perkova M. V., Ladik E. I., Percev V. V., Chernyshev Y. V. Adaptation of In-

dustrial Territories. Lecture Notes in Civil Engineering. 2022 Vol. 227. Pp. 175-184. DOI 10.1007/978-3-030-94770-5_13.

19. Perkova M.V., Drebezgova M. Y. Experience of reorganization of depressed industrial areas. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 012024. DOI 10.1088/1757-899X/944/1/012024.

20. Akimova L.V., Gorbacheva L.V., Dmitrieva Z.P., Krivtsova E.V., Pogrebnyak E.D., Topchiy E.V., Utenina T.I. Guide. State Archive of the Belgorod Region [Putevoditel'. Gosudarstvennyj arhiv Belgorodskoj oblasti]. URL: <https://belarchive.ru/assets/files/putevoditel.pdf> (date of access: 11/19/2022). (rus)

Information about the authors

Drebezgova, Maria Yu. PhD in Engineering, Associate Professor of the Higher School of Design and Architecture. E-mail: mdrebezgova@mail.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, St. Petersburg, Politekhnikeskaya St., 29, litera B.

Perkova, Margarita V. Doctor of Architecture, Director of the Higher School of Design and Architecture. E-mail: perkova.margo@mail.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, St. Petersburg, Politekhnikeskaya St., 29, litera B.

Chernysheva, Natalia V. Doctor of Engineering, Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction. E-mail: chernysheva56@rambler.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint Petersburg, Politekhnikeskaya St., 29, litera B.

Ladik, Elena I. PhD in Architecture, Associate Professor of the Higher School of Design and Architecture. E-mail: krushelnitskaya.lena@yandex.ru. Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint Petersburg, Politekhnikeskaya St., 29, litera B.

Received 09.04.2024

Для цитирования:

Дребезгова М.Ю., Перькова М.В., Чернышева Н.В., Ладик Е.И. Промышленные территории города Белгорода: градостроительный анализ и перспективы развития // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 12. С. 58–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-58-70

For citation:

Drebezgova M.Yu., Perkova M.V., Chernysheva N.V., Ladik E.I. Industrial territories of the city of Belgorod: urban planning analysis and development prospects. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 58–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-58-70

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-71-81

**Супранович В.М., Сафронова А.Д.*

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

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

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПЛАНИРОВОЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТЕХНОПАРКОВ

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные вопросы формирования функционально-планировочной системы новейшей типологии проектирования – вертикальных технопарков с включением функции мусоропереработки. В работе изучены три основные технологические схемы формирования вертикальных технопарков на примере проектных решений мирового опыта. Первые проектные предложения с применением технологий разработаны в 2023 году. В качестве объектов для комплексного анализа были выбраны проекты вертикальных технопарков в Китае, США и Сингапуре. В рамках НИР № 39С24 «Функционально-планировочная организация вертикальных технопарков с включением комплексов мусоропереработки» 2024 года на кафедре Архитектурного проектирования СПбГАСУ проведены исследования мирового опыта типологии проектирования технопарков в целом, а также изучены материалы проектов формирования функционально-планировочной системы вертикальных технопарков с включением комплексов мусоропереработки. Статья также рассматривает этапы развития технопарков в России вплоть до современности. Кроме того, проанализировано развитие понятия термина «технопарк» для России. Изучены пять успешных объектов экологических технопарков по переработке отходов в стране. В рамках анализа отечественного опыта рассмотрены следующие технопарки: КПО «Нева» в Московской области, МПК «Эко Лэнд» в Кемеровской области, Экотехнопарк «Щучье» в Курганской области, КПО «Волхонка» в Ленинградской области и Экотехнопарк «Михайловский» в Саратовской области.

В статье приведены результаты комплексных исследований, выявлены основные особенности функционально-планировочной организации вертикальных технопарков с функцией мусоропереработки. На основе изученных материалов разработаны рекомендации по организации технопарков в России.

Ключевые слова: объекты мусоропереработки, вертикальный технопарк, тенденции формообразования, многофункциональность, экология

Введение. Негативное влияние человека на экологию планеты заставляет население земли задуматься над поиском путей ее улучшения. Это неразрывно связано с вопросами утилизации твердых бытовых отходов, основным решением которых является создание объектов переработки ТБО [1]. В России за последнее десятилетие возобновлена программа по обращению с мусором: модернизируются существующие предприятия и строятся новые мусоросжигательные заводы (МСЗ), комплексы по переработке отходов (КПО) и технопарки [2]. В рамках научно-исследовательской работы (НИР № 39С24) «Функционально-планировочная организация вертикальных технопарков с включением комплексов мусоропереработки» при финансовой поддержке гранта СПбГАСУ в 2024 году выполнено изучение технопарков по переработке отходов. Данные объекты являются одними из перспективных для развития системы промышленных зданий по утилизации ТБО, так как позволяют не только оптимизировать утилизацию отходов, но и организовать научно-исследовательскую деятельность данного процесса и интегрировать производство в городскую среду.

В Санкт-Петербурге с 2020 года ведется комплексная работа в сфере переработки отходов. Закрыты и рекультивируются все полигоны по сбыту ТБО [3]. Комитетом по градостроительству и архитектуре были утверждены участки под организацию мусороперерабатывающих комплексов. Согласно утвержденной схеме в городе выделено 5 участков в черте города. Участки находятся на периферии. К каждому из комплексов дополнительно организуется по две мусоросортировочные станции на расстоянии менее 5 км от объекта МПК. Данный принцип организации объектов в связанной структуре нацелен на эффективность в сфере переработки и сокращение транспортных связей [4, 5].

Гипотеза исследования. На современном этапе в России применяются горизонтальные технологические схемы переработки отходов, поэтому для объектов обращения с ТБО характерны крупный масштаб объемов, протяженность фасадов и большие площади земельных участков. Это осложняет интеграцию данных предприятий в существующую городскую ткань, поэтому необходим поиск альтернативных решений с вертикальным технологическим модулем

переработки, например – вертикальные технопарки.

Целью публикации данной статьи является определение особенностей функционально-планировочной организации вертикальных технопарков.

Задачи исследования: определить значение понятия «технопарк» в России; выполнить обзор существующих данных о развитии технопарков в России; изучить существующий опыт организации объектов мусоропереработки в России, в том числе технопарков (технологические потоки и системы); выявить преимущества использования технопарков в качестве объектов переработки; выполнить комплексный анализ зарубежного опыта проектирования вертикальных технопарков; выявить особенности функционально-планировочной организации вертикальных технопарков; дать рекомендации по функционально-планировочным решениям технопарков в России.

Объект исследования – функционально-планировочная организация вертикальных технопарков.

Материалы и методы исследования. При выполнении исследования были изучены научные труды Г. Н. Черкасова, Е. В. Сазыкиной, А. О. Дмитриевой, В. М. Супранович, Е.Г. Филимоновой о развитии современных промышленных зданий, в том числе технопарков и объектов по обращению с отходами в России. Исследованы точки зрения зарубежных ученых He M., Debbie Chen, Dierdonck, Rappa, Michael A по вопросам гуманизации промышленной архитектуры и ее интеграции в городскую среду. Вопросы устойчивого развития проанализированы в работах Т. В. Шамаевой и О. В. Калугиной.

Для достижения поставленных задач в работе использован метод комплексного анализа данных по вопросам развития промышленной архитектуры, в частности объектам мусоропереработки в России и за рубежом. Проведен графический анализ существующих проектных материалов: градостроительного размещения, архитектурно-планировочных решений и функционального зонирования, а также анализ характеристик габаритов здания.

Основная часть. *Значение понятия «технопарк» в России и развитие данных объектов.* С продвижением межотраслевых научных направлений в 1950-х годах на общепринятом международном уровне появляется термин «технопарк», который подразумевает под собой объединение специалистов двух или более различных областей науки для решения одной проблемы с помощью различных способов. В 1960-х три передовых страны СССР, США и Япония ставят новые

цели – развитие отраслей высоких технологий с помощью инновационных методов, создаются научные парки в качестве инструмента научно-технологического прогресса на основе крупных промышленных предприятий и зон ТВЗ (технико-внедренческих зон). Данные научные парки должны были решать не одну, а ряд поставленных проблем общества. В 1984 году международная ассоциация научных парков – The IASP, предлагает трактовку понятия «технопарк», как объекта инновационной инфраструктуры. Это независимый объект, возникший по средствам необходимости решения возникающих проблем общества, объединенный общим тематическим направлением разработок и исследований, и решающий поставленные вопросы на всех уровнях цикла жизни заданного направления. Он нацелен на создание инфраструктуры, проведения комплексных исследований, выявление роста инновационных решений, с последующим применением на практике и получением конечного решения на поставленную проблему, привлечением интереса сторонних людей к процессам работы объекта. Для достижения целей технопарк стимулирует и управляет потоками знаний и технологий.

История развития технопарков в России является не очень обширной, так как до 90-х годов данный термин имел лишь номинальное значение. При крупных производственных площадках появлялись научно-исследовательские центры, которые в основном были нацелены на развитие определенной отрасли науки, нежели на решение вновь появляющихся проблем производства или поиска инновационных методов и технологий. В 1990 году утверждается программа «Технопарки России». За последующие 10 лет в стране возникает 80 объектов технологического инновационного развития. В течении этого времени и происходит формирование понятия технопарка – это территория производства или выделенная для предприятия отдельная территория, нацеленная на разработку объекта работающего в определенной области для реализации инновационных проектов. На его территории, должны располагаться научно-исследовательские институты и коммерческие предприятия. Основной целью создания системы технопарка является привлечение инвестиций для разработки и создания новых высокотехнологичных проектов [6, 7].

За последние пять лет в России термин «технопарк» изменил свои основные характеристики. Сейчас современный технопарк – это научно-технический комплекс предприятий, созданный для формирования благоприятной среды развития инновационных компаний в определенной сфере, имеющих общий тематический уклон. В состав

технопарка включают: научно-исследовательский центр с лабораториями и программами профориентации (разработанные совместно с высшими учебными заведениями); открытый общественный блок с выставочными площадками для привлечения интереса сторонних людей к решаемым проблемам; производственный блок для применения на практике исследуемых материалов. Таким образом, функционально-планировочный состав технопарка подразумевает обязательное наличие нескольких отдельно стоящих объектов, с возможностью их связи между собой для коммуникации сотрудников [8].

Обзор существующего опыта организации объектов мусоропереработки в России. В СССР существовала работающая система обращения с отходами, но с распадом государства, была утрачена и начала восстанавливаться в России лишь в 2015 году. На уровне законодательства активная фаза принятия решений по вопросам утилизации пришлась на 2019 год с выходом указа президента о необходимости консервирования полигонов и строительства мусороперерабатывающих комплексов. В настоящее время в Российской Федерации строятся мусоросжигательные заводы, мусороперерабатывающие комплексы и технопарки по переработке отходов (КПО «НЕВА» (Солнечногорск, Московская область), ЭкоЛЭНД (Кемерово), Экотехнопарк «Щучье» (Курганская область), КПО «Волхонка» (Ленинградская область), Экотехнопарк «Михайловский»). Как правило, данные объекты располагаются на территориях промышленного назначения, в уже сложившихся промышленных зонах, на периферии городской застройки и в пригородах (участки расположены среди существующего природного ландшафта) [9]. Таким образом, все объекты имеют «изолированное» размещение, длинные транспортные и логистические связи с объектами хранения отходов в городе. На всех предприятиях преимущественно применяется технология горизонтального конвейерного типа, с ручной загрузкой конвейера [10]. Данная технология диктует линейную горизонтальную протяженность объектов, с конструктивной схемой железобетонного или стального каркаса, этажностью 1-2 этажа и единой высотой объемов, для которых требуется выделять крупные по площади участки для размещения. Более того, объекты по утилизации ТБО в России, в частности так называемые технопарки, монофункциональны, что противоречит значению понятия «технопарк» [11].

При проектировании предприятий по обращению с отходами возникают сложности при вы-

боре участков для их строительства и качественной интеграции в городскую застройку. Архитектура данных объектов утилитарна, не обладает какой-либо художественной ценностью или приемами адаптации для социального принятия населением, не отвечает принципам устойчивого развития (рис. 1). Можно утверждать, что предприятия по обращению с отходами в большей степени отвечают инновационным техническим требованиям, но к функционально-планировочному содержанию и их внешнему облику по-прежнему сохраняются устаревшие подходы [12].

Преимуществом практической реализации технопарков по работе с ТБО в России может стать многофункциональность таких объектов при значительно более компактных габаритах зданий. Наличие общественного и научно-технического блоков в составе комплекса позволяет интегрировать его в городскую инфраструктуру, обеспечить связь с различными группами населения: создать социально-информационную платформу по внедрению культуры обращения с отходами [13]. Применение современных технологических схем утилизации, позволит сократить радиус зон санитарной защиты от предприятий и предотвратить изоляцию объекта от окружающего мира [14]. Таким образом, станет очевидна необходимость изменения подходов к решению архитектурного облика данных предприятий.

Комплексный анализ зарубежного опыта проектирования вертикальных технопарков. Быстроразвивающиеся в сфере утилизации отходов страны Азии с конца 2023 года приняли новую политику в сфере организации специальных инженерных сооружений по работе с ТБО. Мировой опыт давно использует технологию исследования градостроительного размещения объектов по утилизации, которая строится на расчете транспортно-логистических нагрузок [15]. Поэтому мусороперерабатывающие объекты организуются в черте города, в непосредственной близости к месту временного сбора и хранения бытовых отходов, имеют дополнительную общественную функцию, необходимую для гуманизации предприятия и привлечения внимания населения к проблемам экологии: открытые и закрытые к посещению блоки, а также, зачастую, собственные исследовательские центры. При этом, плотность застройки городов Китая, Японии и Южной Кореи увеличилась вдвое за последние 8 лет. Это приводит к постоянному удорожанию земли в черте города и сокращению площадей участков, выделяемых под новую застройку, переводу большинства инженерных коммуникаций в уровень подземных этажей зданий [16].

основная информация	градостроительное размещение	габаритные характеристики объекта	архитектурный образ
Название: КПО «Нева» Год: 26.01.2022 Адрес: Солнечногорск, Московская обл. Мощность: 500 000 тон в год			
Название: МПК «Эко Лэнд» Год: 2020 Адрес: Новокузнецк, Кемеровская обл. Мощность: 200 000 тон в год			
Название: Экотехнопарк «Щучье» Год: 2024 Адрес: Щученский р-н, Курганская обл. Мощность: 50 000 тон в год			
Название: КПО «Волхонка» Год: 2022 Адрес: ЛО, Волхонское шоссе, 4а. Мощность: 600 000 тон в год			
Название: Экотехнопарк «Михайловский» Год: 2021 Адрес: Саратовская обл, Михайловский округ Мощность: 50 000 тон в год			

Рис. 1. Крупные экологические технопарки России

Анаэробный процесс переработки отходов, чаще всего используемый на предприятиях, требует организации технологического модуля с выделением складских помещений под вторсырье, а также системы воздухообмена, представленную технологической трубой [17]. Поэтому мусороперерабатывающие комплексы не могут в полной мере быть организованы в подземных этажах. Вместе с решением правительства Китая о сокращении площади участков под организацию предприятий по переработке отходов, возникла необходимость разработки проектов вертикальных объектов мусоропереработки. Существует ряд проектных предложений по их организации.

Согласно изученным материалам проектов вертикальных технопарков по работе с ТБО, было выявлено, что существует три основные функционально-планировочные схемы:

1) Вертикальная плоскостная схема с трубчатыми спиральными конвейерами.

Разрабатывается в Китае и США. Основной принцип организации технологической схемы заключается в создании вакуумных спиральных вертикальных труб, которые также служат в качестве яркого образного акцента – доминанты. Пятно застройки при этом не превышает 1500 – 2000 м². Комплекс состоит из 5-7 этажей различной высоты. Конвейеры представлены в виде вертикальных пневмо-воздушных труб, проходят через каждый из блоков и работают каждый на отдельный вид отходов. Для устройства данного технопарка необходимо организовывать систему первичной сортировки. Отходы перерабатываются строго по классам. По мере движения ТБО по конвейеру размер фракций уменьшается [18].

а) Проект разработки объекта вертикального технопарка в Шанхае, Китай (стадия разработки объекта – проект) (рис. 2).

основная информация	градостроительное размещение	характеристики объекта	функционально-планировочная организация	архитектурный образ
Название: Garbage classification and recycling Center Автор: Yanru He Стадия: проект Год: 2027 Адрес: Шанхай, Китай Мощность: 500 000 тон в год				

Рис. 2. Анализ объекта вертикального технопарка в Шанхае, Китай

Согласно проведенному анализу данный вертикальный технопарк располагается в городской застройке, земельный участок имеет небольшую площадь, которая составляет 1,2 га. Основной особенностью комплекса являются спиральные конвейерные трубы. Данная технология требует развития комплекса по вертикали, а также протяженную сеть технических связей – труб. Средняя общая длина вакуумных труб составляет 5–6 км. Такая протяженность конвейера требует организацию резервных станций для обслуживания, станции устраиваются через каждые 200 – 250 м.

Общественная функция интегрирована в основной объем комплекса. Она представляет собой экскурсионный маршрут с экспозиционными пространствами. В уровне первого этажа организуется пространство не более 200 м² с постоянной

интерактивной экспозицией. Экспозиционное пространство связано с блоками переработки навесными обзорными галереями. Данная структура направлена на привлечение внимания населения к проблеме и вопросам утилизации отходов. Общественный модуль имеет независимые коммуникации, хозяйственные и вспомогательные помещения, а также инженерное и техническое оборудование (системы вентиляции, дымоудаления, пожаротушения), разработанные пути пожарной эвакуации и устройство лестнично-лифтовых узлов с подпором воздуха и модулей эвакуации МГН.

б) Проект разработки вертикального технопарка с сетчатой оболочкой в Аризоне, США (стадия разработки объекта – конкурсный проект) (рис. 3).

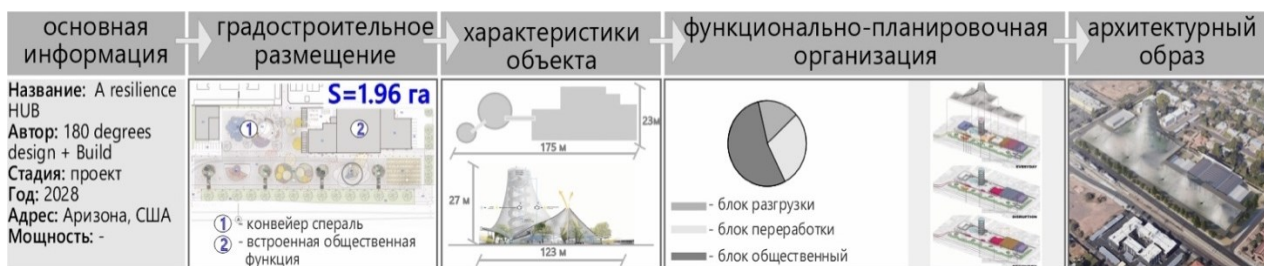


Рис. 3. Анализ объекта вертикального технопарка в Аризоне, США

Согласно проекту, объект предполагается разместить в черте города, вблизи исторического центра. По соотношению площадей, блок с общественной функцией превышает по размеру блок

переработки на 2000 м². Комплекс технопарка является мощным поставщиком альтернативной энергии и природного газа, за счет этого под сетчатой оболочкой проектируется природный парк.

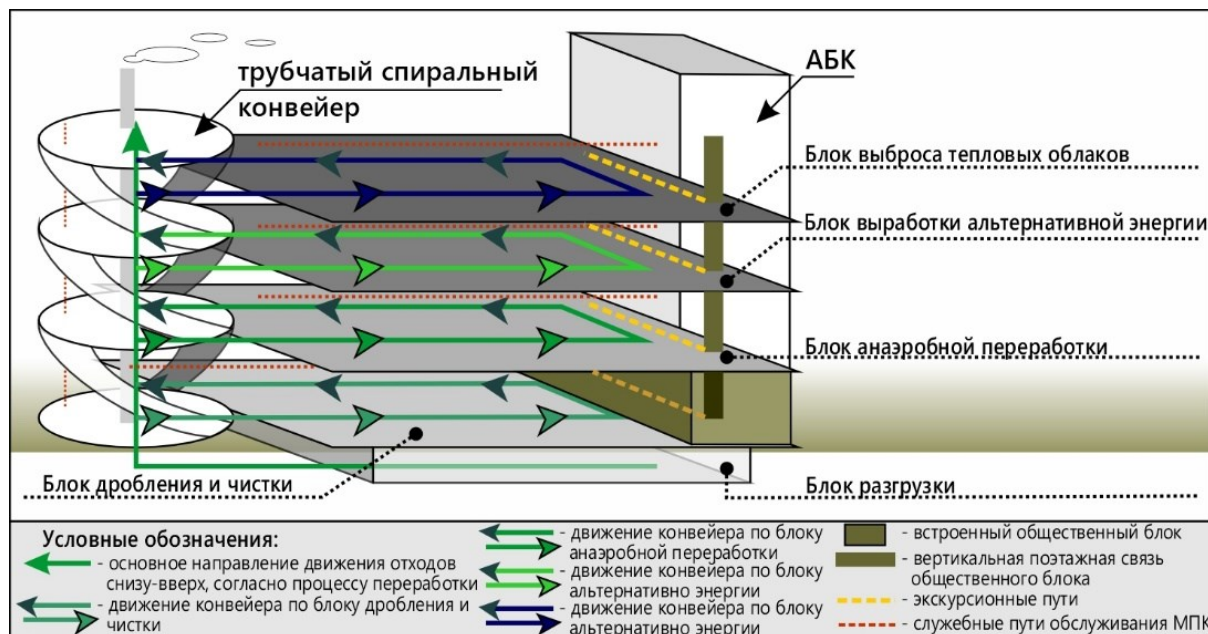


Рис. 4. Схема организации технопарка с технологией вертикального трубчатого спирального конвейера

Таким образом, технологическая схема обоих объектов предполагает перемещение отходов снизу-вверх, по спирали (рис. 4). Это отражается как на функционально-планировочной организации, так и на формообразовании здания. Оно

имеет вытянутую по вертикали форму, около 12–25 метров в высоту. Функциональные блоки располагаются поэтажно. В уровне первых этажей происходит дополнительная сортировка, а в уровне последующих поэтапная переработка.

Комплекс включает большое количество площадей под общественную функцию. Общественная функция, в свою очередь интегрирована в основной объем здания. Основные площади общественной функции располагаются в уровне первого этажа и имеют линейные связи в виде галерей с блоком переработки отходов. При этом, площадь земельного участка не превышает 2 га и располагается в плотной городской застройке.

Динамическое развитие формы позволяет создать яркий архитектурный образ с вертикальной доминантой.

2) Вертикальный лифтовой поэтажный конвейер с разделением отходов по классам.

Технология основана на материалах исследования Принстонского технологического университета, согласно которой технопарк представляет собой здание высотой в 6 этажей, встроенное в ткань города. Разделение отходов производится по классам [19] (рис. 5).

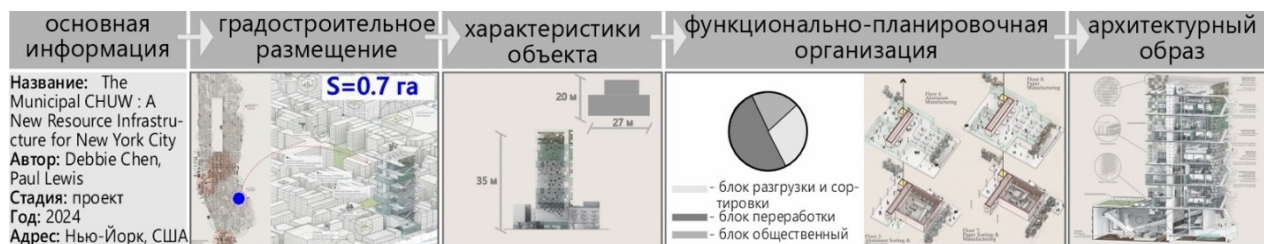


Рис. 5. Анализ объекта вертикального технопарка в Нью-Йорке, США

Согласно проекту вертикального технопарка в Нью-Йорке, объект размещается в застройке с высокой плотностью, в центре города. Кроме основной функции переработки объект имеет встроенную общественную функцию, представленную офисами компаний. Блок является независимым пристроенным и имеет поэтажные связи с тем или иным сектором переработки. Центральные этажи общественного блока имеют научно-исследовательскую функцию. Данная функция интегрирована в проект для проведения исследований в области разложения и химических остатков отходов. Лаборатория является необходимой, поскольку объекты расположены в центре города с высокой плотностью застройки. Таким образом, необходим постоянный контроль за экологическим фоном и исправностью оборудования блока переработки. Основной процесс

переработки отходов строится поэтажно. В нулевом и первом этаже размещается зона выгрузки, а также сортировки ТБО. Далее лифтовой вертикальный конвейер распределяет отходы по этажам. Каждый этаж имеет собственный цех переработки и отгрузки на сортировку. Согласно функционально-планировочной организации, второй этаж имеет установку переработки биологических и органических отходов, третий и четвертый этаж образует единую систему по переработке и прессовке металлических отходов. Так в уровне третьего этажа происходит сортировка металлов, а в уровне четвертого этажа происходит переработка и прессовка с дальнейшей отгрузкой на вторсырье. Седьмой и восьмой этажи представлены системой по утилизации бумаги и картона (рис. 6).

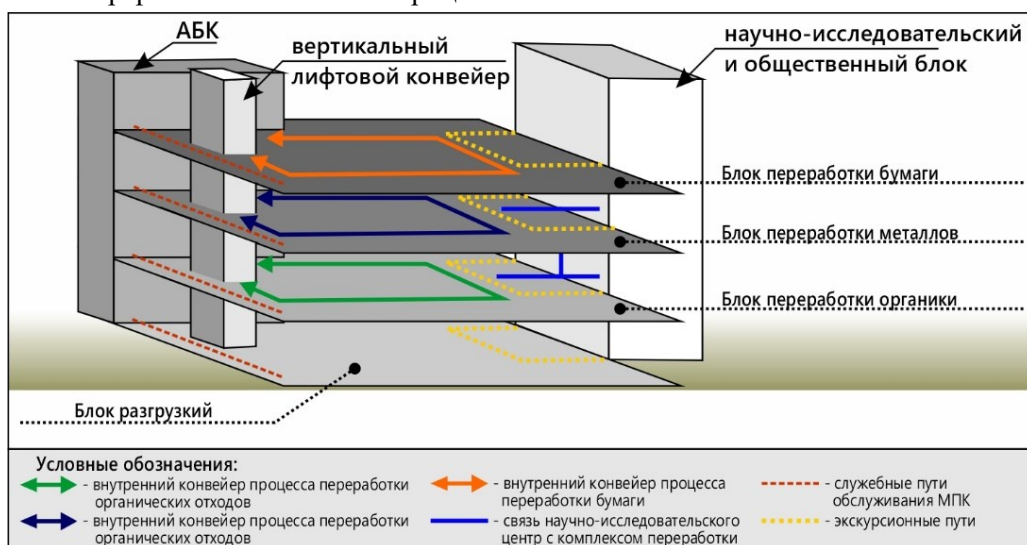


Рис. 6. Схема организации технопарка с технологией вертикального лифтового поэтажного конвейера с разделением отходов по классам

Основной особенностью данной технологии является функционально-планировочная организация объекта. Каждый этаж является независимым блоком по переработке отдельного вида отходов. Перемещение по этажам в зависимости от типа отходов осуществляется лифтовым конвейером. Первичная сортировка отходов не требуется. Объект максимально вытянут по высоте, средняя этажность составляет 8–15 этажей. Количество этажей зависит от количества видов перерабатываемого сырья. Объект требует самые минимальные площади участков под застройку, от 0,5 га. Особенностью размещения является организация такого технопарка в самой высокой по плотности застройке части города.

3) Вертикальный блочный конвейер.

Данная технология является аналогом любого горизонтального конвейера, единственное отличие в ориентации. На единый пневмо-конвейер установлены последовательно блоки по переработке, конструкция строится на металлическом каркасе (рис. 7). Примеры такой технологии чаще всего встречаются в Сингапуре [20]. Инженеры и архитекторы создают сеть из специальных объектов по переработке отходов по всему городу. Объекты являются типовыми. Данный метод организации диктуется дефицитом свободных площадей.

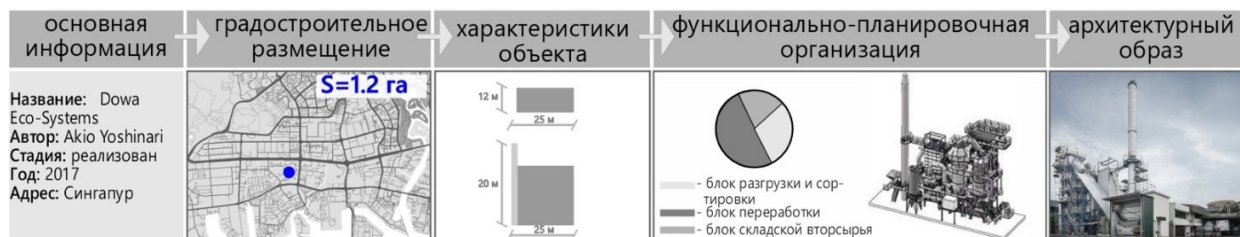


Рис. 7. Анализ объекта вертикального технопарка в Сингапуре

Планировочное устройство представляет собой копию горизонтальной технологии переработки с переориентацией ее на вертикальную (рис. 8). Функциональные блоки соединены вакуумным конвейером. Объект представляет собой промышленный кластер и носит лишь одну функцию переработки ТБО, в связи с чем, архи-

тектурный образ представлен металлоконструкциями и непосредственно установленными по вертикали блоками переработки. Объект имеет две доминанты, вакуумный вертикальный конвейер, а также технологическую трубу. Площадь участка составляет 1–1,2 га. Объект включен в городскую застройку.

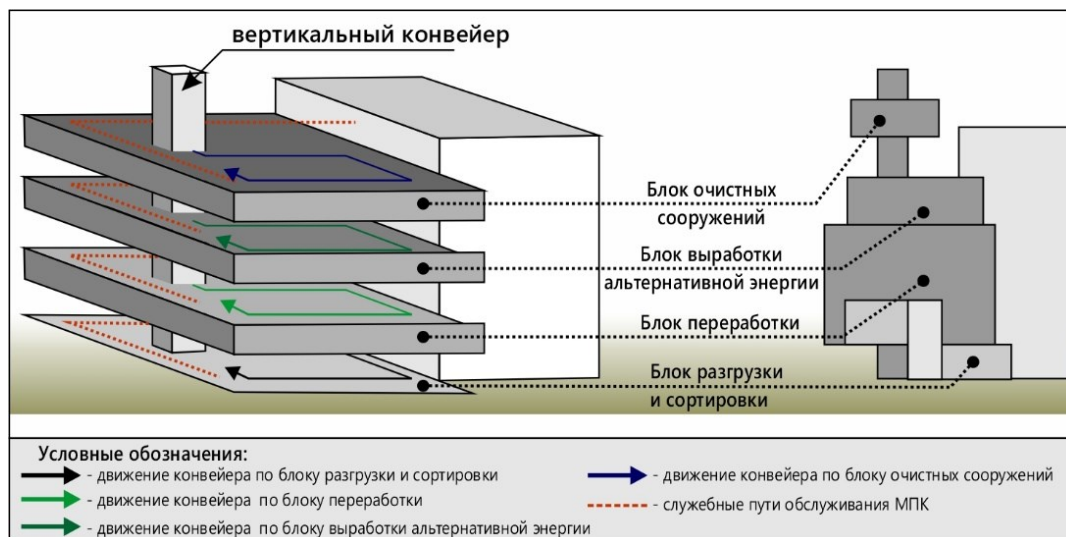


Рис. 8. Схема организации технопарка с технологией вертикального блочного конвейера

Выводы. Основные функционально-планировочные особенности организации вертикальных технопарков. Согласно проведенному анализу, вертикальные технопарки по работе с ТБО могут иметь три различных типа технологического модуля. Это влияет на функционально-пла-

нировочную организацию как территории размещения, так и самого объекта [21]. Так организация вертикального технопарка позволяет:

– сократить площадь участка под застройку, средняя площадь участков варьируется от 0,5 га до 1,5 га, что втрое меньше участков, вы-

деленных под технопарки и экологические заводы по переработке ТБО с горизонтальной технологией процесса переработки;

- включить данный тип объекта в сложившиеся городские застройки высокой плотности;

- предотвратить изоляцию объекта от городского населения, так как он включает в себя общественную-рекреационную функцию: научно-образовательные зоны, общественно-деловые, парки. Соотношение площадей технологических зон и общественных в объекте может быть равным, а может быть увеличено в пользу общественной функции;

- создать новую городскую доминанту в существующей застройке, при условии соблюдения высотного регламента города, так как большинство вертикальных технопарков имеет высоту от 20 до 30 м.

Рекомендации по функционально-планировочным решениям технопарков в России. В России на данный момент существует довольно консервативная система организации мусороперерабатывающих объектов: предприятия имеют большие площадные характеристики, горизонтальный технологический модуль, унитарный архитектурный образ. Участки для размещения изолированы на территории промышленных зон или в пригородах. Транспортно-логистическая сеть не согласована между собой, а предприятия находятся на значительном удалении от непосредственных мест сбора отходов [22]. Поэтому открытым остается вопрос о пересмотре ряда норм строительства и проектирования объектов МПК. Более того, существующая система сбора отходов требует наличия объектов с организацией первичной сортировки, что требует появления новых типов объектов. Вертикальные технопарки могут стать альтернативой для уже существующих объектов мусоропереработки и оптимизировать уже существующие и проектируемые системы обращения с отходами в современных городах России [23]. Более того, использование таких предприятий возможно в условиях плотной городской застройки, исторических городах, в уже существующих промышленных зонах городской застройки [24]. Наличие общественного блока позволяет расширить функциональное применение объекта в городской среде, изменить качество промышленной архитектуры и сделать ее устойчивой к динамичным изменениям внутри общества.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках темы НИР № 39С24, «Функционально-планировочная организация вертикальных технопарков с включением комплексов мусоропереработки», при финансовой поддержке

гранта Санкт-Петербургского Государственного Архитектурно-строительного Университета (СПбГАСУ) в 2024 году.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Говорушко С.М., Лазарев С., Петухов В.И., Зелинская Е.В. Обращение с твердыми коммунальными отходами: Россия на фоне мира // Астраханский вестник экологического образования. 2021. № 2 (62). С. 4–31.
2. Супранович В.М. Архитектура объектов мусоропереработки в России. Исторический опыт и современное состояние // Сборник материалов XIII Регионального творческого форума с международным участием «Архитектурные сезоны в СПбГАСУ». Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2023. С. 122–123.
3. Рожков Р.С. Совершенствование системы мотивации в области сортировки бытовых отходов // Инновации. Наука. Образование. 2020. №17. С. 261–265.
4. Рыжих Ю.С. Проблема утилизации бытовых отходов // Устойчивое развитие науки и образования. 2019. № 10. С. 125–128.
5. Вавилова Т.Я., Коваленков И.О. Актуальные направления архитектурного проектирования объектов обращения с отходами // Вестник СПбГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2016. №1(22). С. 91–96.
6. Сазыкина Е.В. Пути развития современного производства России и их влияние на практику архитектурного проектирования // Architecture and modern information technologies. 2016. №1(34). С. 1–10.
7. Дмитриева А.О., Хрусталева А.А. Функциональное зонирование и архитектурные решения современных производственных предприятий // Системные технологии. 2019. №2(32). С. 103–111.
8. Сазыкина Е.В. Особенности архитектурно-планировочной организации производственных предприятий в условиях современного города // Архитектура и современные информационные технологии. 2017. №1(38). С. 213–224.
9. Шамаева Т.В. Устойчивое развитие архитектурного облика промышленных объектов на примере зарубежного опыта // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2022. № 12. С. 46–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-46-61
10. Супранович В.М., Сафронова А.Д. Тенденции формообразования мусороперерабатывающих объектов. Основные направления и их влияние на архитектуру МПО // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2023. № 3. С. 97–110. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-97-110

11. Черкасов Г.Н. Некоторые особенности современной архитектуры // Academia. Архитектура и строительство. 2017. № 2. С. 36–42.
12. Алешкина Я., Калугина О. В. Роль архитектурного дизайна в достижении целей устойчивого развития // Инновации и инвестиции. 2024. № 5. С. 554–559.
13. Супранович В.М. Особенности градостроительного размещения существующих объектов мусоросортировки и мусоропереработки в России // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2023. № 10. С. 68–77. DOI 10.34031/2071-7318-2023-8-10-68-77.
14. Супранович В.М. Архитектура существующих объектов мусоросортировки и мусоропереработки в России // Перспективы науки. 2023. № 9 (168). С. 107–111.
15. Georgoulas A., Kara H., Asensio Villoria L. Architecture and Waste Management // «Harvard Design Magazine». 2015. 40 p.
16. Wu J., Nie X., Wang H., Li W. Eco-industrial parks and green technological progress: evidence from chinese cities // Technological forecasting and social change. 2023. Т. 189. 122360. DOI: 10.1016/j.techfore.2023.122360.
17. Филимонова Е.Г., Богатова Е.В., Развитие научно-технологических парков // Сборник научных трудов IV национальной с международным участием научно-практической конференции «Стратегии развития предпринимательства в современных условиях». 2020. С. 71–73.
18. Черных Ю.А. Анализ особенностей архитектуры и организации технопарков в мировой практике // Сборник докладов VIII Международного студенческого строительного форума БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. С. 250–253.
19. Chen D., Lewis P. The Municipal CHUW (Center for Harvesting Utility from Waste): A New Resource Infrastructure for New York City // F'14 Thesis. Princeton University School of Architecture. 2014. С. 1–2
20. Поливанова М.В. Инновационный подход к формированию архитектуры технопарков // Сборник материалов международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. С. 712–718.
21. Shen L., Liu Ya., Ge H. Layout Optimization of Construction Waste Recycling Facilities for Development of New Urban Areas from Centralized and Decentralized Processing Collaboration Perspective // KSCE Journal of Civil Engineering. 2023. Т. 27, № 8/ С. 3204–3218. DOI: 10.1007/s12205-023-1955-2.
22. Бахчеванска Т.Б., Блинков С.В., Мурахов С. А. Проектирование предприятий по переработке отходов // Механизация строительства. 2008. № 7. С. 7–11.
23. Wu K., Remarchuk S.M., Trofimov N.A. Planning of low-carbon cities in China // Статья в сборнике конференции «Современные проблемы земельно-имущественных отношений, урбанизации территории и формирования комфортной городской среды», 2023. С. 19–24.
24. Павловский А.А. К вопросу о размещении мусороперерабатывающих объектов на территории крупнейших городов России // Астраханский вестник экологического образования. 2020. № 4 (58). С. 44–56.

Информация об авторах

Супранович Валерия Михайловна, кандидат архитектуры, архитектурный факультет, кафедра архитектурного проектирования. E-mail: vmsupranovich@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4.

Сафронова Арина Дмитриевна, студент кафедры архитектурного проектирования. E-mail: arinasddd@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4.

Поступила 10.08.2024 г.

© Супранович В.М., Сафронова А.Д., 2024

***Supranovich V.M., Safronova A.D.**

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

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

THE FUNCTIONS OF THE FUNCTIONAL-PLANNING ORGANIZATION OF VERTICAL TECHNOLOGY PARKS

Abstract. The article considers the topical issues of creating a functional planning system for vertical technology parks, which includes garbage processing functionality as part of the latest design typology. Three main technological schemes for the formation of vertical technology parks are examined in the work, and

design solutions from the world's experience are used to evaluate them. The first project proposals with application of technologies were developed in 2023. Vertical technology park projects in China, the USA and Singapore were selected as the subjects for comprehensive analysis. Within the framework of R&D № 39C24 «Functional and planning organization of vertical technology parks with the inclusion of waste processing complexes» 2024, at the Department of Architectural Design of SPBGUS, research was carried out on the world experience of typology of designing technoparks in general, and also materials of projects for functional-The planning system of vertical technology parks with inclusion of waste processing complexes. The article covers the progression of techno-parks in Russia up until now. Furthermore, the evolution of the phrase 'technology park' in Russia was scrutinized. Five successful waste treatment technology parks in Russia were investigated. The following technology parks are considered in the framework of analysis of domestic experience: WMF «Neva» in Moscow region, WRO «Eco Land» in Kemerovo region, Eco-technology park «Schucje» in Kurgan region, WMF «Wolhonka» in Leningrad region and Eco technology Park «Mihailov» in Saratov region.

The article provides results of complex studies, identified the main features of functional and planning organization of vertical technology parks with a function of garbage processing. Based on the studied materials, recommendations for organization of techno-parks in Russia have been developed.

Keywords: waste processing facilities, vertical technology park, shape formation trends, multifunctionality, ecology.

REFERENCES

1. Govorushko S., Lazarev S., Petukhov V., Zelinskaya E. An overview of municipal solid waste management: Russia on the background of the world. [Obrashchenie s tverdyimi kommunal'nymi othodami: Rossiya na fone mira]. Astrakhan Bulletin of Ecological Education. 2021. No 2 (62). Pp. 4–31. (rus)
2. Supranovich V. Architecture of waste processing facilities in Russia. Historical experience and modern state [Arhitektura ob"ektov musoropere-rabotki v Rossii. Istoricheskij opyt i sovremennoe sostoyanie]. [Sbornik materialov XIII Regional'nogo tvorcheskogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem «Arhitekturnye sezony v SPbGASU»]. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPBGASU). 2023. Pp. 122–123. (rus)
3. Rogkov R.S. Improving the incentive system for household waste sorting. [Sovershenstvovanie sistemy motivacii v oblasti sortirovki bytovyh othodov]. Innovacii. Nauka. Obrazovanie. 2020. No. 17. Pp. 261–265. (rus)
4. Ryzhikh Yu.S. The problem of disposal of domestic waste. [Problema utilizacii bytovyh othodov]. Sustainable development of science and education. 2019. No 10. Pp. 125–128. (rus)
5. Vavilova T.Ya., Kovalenkov I.O. Current trends in wireless design of waste management facilities [Aktual'nye napravleniya arhitekturnogo proektirovaniya ob"ektov obrashcheniya s othodami]. Bulletin of SPbGASU. Urban development and architecture. 2016. No. 1 (22). Pp. 91–96. (rus)
6. Sazykina E. The paths of development of modern production in Russia and their influence on architectural design practice [Puti razvitiya sovremennogo proizvodstva Rossii i ih vliyanie na praktiku arhitekturnogo proektirovaniya]. Architecture and modern information technologies. 2016. No 1(34). Pp. 1–10. (rus).
7. Dmitrieva A., Khrustalev A. Functional zoning and architectural design of contemporary industrial facilities. [Sistemnye tekhnologii]. 2019. No 2 (32). Pp 103–111. (rus).
8. Sazykina E. Architectural and planning organization features of industrial facilities in the contemporary urban structures. Architecture and modern information technologies. 2017. No. 1(38). Pp. 213–224. (rus)
9. Shamaeva T. Sustainable development of the architectural appearance of industrial facilities on the example of foreign experience. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No 12. Pp. 46–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-46-61 (rus)
10. Supranovich V., Safronova A. Shaping trends of waste recycling objects. Main directions and their impact on WRO architecture. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No 3. Pp. 97–110. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-97-110 (rus)
11. Cherkasov G.N. Some features of contemporary architecture. ACADEMIA. Architecture and construction. 2017. No 2. Pp. 36–42. (rus).
12. Aleshkina Y., Kalugina O. The role of architectural design in achieving sustainable development goals. [Innovacii i investicii]. 2024. No 5. Pp. 554–559. (rus)
13. Supranovich V. Features of urban planning location of existing objects of waste sorting and waste processing in Russia. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No 10. Pp. 68–77. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-68-77. (rus).
14. Supranovich V. Waste sorting and recycling facilities in Russia. Reports Scientific Society. 2023. No. 9 (168). Pp. 107–111. (rus)

15. Georgoulas A., Kara H., Asensio Villoria L. Architecture and Waste Management. Harvard Design Magazine. 2015. Pp. 40–47.

16. Wu J., Nie X., Wang H., Li W., Eco-industrial parks and green technological progress: evidence from Chinese cities. Technological forecasting and social change. 2023. Vol. 189. 122360. DOI: 10.1016/j.techfore.2023.122360

17. Filimonova E.G., Bogatova E.V. Development of scientific and technological parks. [Strategii razvitiya predprinimatel'stva v sovremennykh usloviyakh]. 2020. Pp. 71–73. (rus)

18. Chernyh Yu. Analysis of the features of architecture and organization of technology parks in global practice. [Analiz osobennostey arhitektury i organizatsii tekhnoparkov v mirovoj praktike]. [Sbornik dokladov VIII Mezhdunarodnogo studentcheskogo stroitel'nogo foruma BSTU named after V.G. Shukhov]. 2023. Pp. 250–253. (rus).

19. Chen D., Lewis P. The Municipal CHUW (Center for Harvesting Utility from Waste): A New Resource Infrastructure for New York City. F'14 Thesis. Princeton University School of Architecture. 2014. Pp. 1–2.

20. Polivanova M. Innovative approach to the development of architecture of technology parks [Innovatsionnyj podhod k formirovaniyu arhitektury

tekhnoparkov]. [Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii molodykh uchenykh BSTU named after V.G. Shukhov]. 2014. Pp. 712–718. (rus)

21. Shen, L., Liu Ya., Ge H., Layout Optimization of Construction Waste Recycling Facilities for Development of New Urban Areas from Centralized and Decentralized Processing Collaboration Perspective. KSCE Journal of Civil Engineering. 2023. Vol. 27, No 8, Pp. 3204–3218. DOI 10.1007/s12205-023-1955-2

22. Bakhchevansk T., Blinkov S., Muratov S. Design of waste treatment plants [Proektirovanie predpriyatij po pererabotke othodov]. [Mekhanizatsiya stroitel'stva]. 2008. No 7. Pp. 7–11. (rus)

23. Wu K. Remarchuk S.M., Trofimov N.A. Planning of low-carbon cities in China. [Sovremennye problemy zemel'no-imushchestvennykh otnoshenij, urbanizatsii territorii i formirovaniya komfortnoj gorodskoj sredy], 2023. Pp. 19–24. (rus)

24. Pavlovskii A. On the placement of waste processing facilities on the territory of the largest cities of Russia. [K voprosu o razmeshchenii musoropererabatyvayushchih ob"ektov na territorii krupnejshih gorodov Rossii]. Astrakhan Bulletin of Ecological Education. 2020. No. 4(58). Pp. 44–56. (rus)

Information about the authors

Supranovich, Valeriya M. PhD. E-mail: vmsupranovich@gmail.com. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU). Russia, 190005, Saint Petersburg, 2-ya Krasnoarmeiskaya st., 4.

Safronova, Arina D. Student. E-mail: arinasddd@gmail.com. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU). Russia, 190005, Saint Petersburg, 2-ya Krasnoarmeiskaya st., 4.

Received 10.08.2024

Для цитирования:

Супранович В.М., Сафронова А.Д. Особенности функционально-планировочной организации вертикальных технопарков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 12. С. 71–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-71-81

For citation:

Supranovich V.M., Safronova A.D. The functions of the functional-planning organization of vertical technology parks. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 71–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-71-81

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-82-92

^{1,*}Бондаренко Н.И., ¹Басов В.О., ¹Бондаренко Д.О., ¹Дороганов В.А., ²Лукин Е.С.,
¹Пивинский А.Э.

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

²Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева

*E-mail: bondarenko-71@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ДЕФЛОКУЛЯНТОВ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТХОДОВ КЕРАМОГРАНИТА

Аннотация. Изучено влияние дефлокулянтов, которые использовались для разделения и удаления сгустков и осадков в шликере, на реологические свойства отходов керамогранита. Целью работы являлось определение их оптимальной концентрации, при которой достигается наилучшая дисперсия и стабилизация отходов керамогранита. Проведены исследования с различными концентрациями дефлокулянта, в качестве которых выбраны сода, жидкое натриевое стекло, а также смесь соды и жидкого натриевого стекла в соотношении 1:1. Оптимальная концентрация составила 4 мл на 50 г сухого отхода, при которой обеспечивается наибольшая степень стабилизации частиц. Полученные результаты подтверждают эффективность добавления дефлокулянта в отходы керамогранита, что приводит к значительному улучшению их реологических характеристик. Отмечено, что применение соды в качестве дефлокулянта для отходов полировки керамогранита малоэффективно. Установлено, что жидкое стекло в роли дефлокулянта даёт более резкое возрастание модуля сдвига, при этом гораздо однороднее убывает вязкости. Определен наиболее предпочтительный и действенный дефлокулянт для шликера – смесь соды и жидкого стекла. Применение различных дефлокулянтов может значительно облегчить процесс обработки отходов керамогранита, делая их более подходящими для повторного использования, что приведет к снижению затрат на их утилизацию и сокращению негативного воздействия на окружающую среду. Результаты работы могут быть полезны в промышленности для оптимизации процессов утилизации и повторного использования данных отходов.

Ключевые слова: дефлокулянт, реология, отходы керамогранита, шликер, жидкое стекло, сода.

Введение. Проблема загрязнения окружающей среды твердыми производственными и бытовыми отходами является одной из актуальных в современном мире [1–3]. Темпы роста масштабов загрязнения негативно сказываются на здоровье людей и окружающей природе. Повсеместное образование отходов в огромных количествах делает данную проблему одной из самых значимых и требующих решения. Кроме того, для каждого вида отходов существует своя оптимальная технология переработки, требующая индивидуального подхода [4]. При подборе технологий для реализации проектов важно, чтобы процессы утилизации отходов производства и потребления не нарушали экологическую безопасность города, нормальное функционирование городского хозяйства с точки зрения общественной санитарии и гигиены, а также условий жизни населения в целом. В действительности использование лишь одних отходов, в том числе применяя комбинированные методы их переработки, позволяет получать многочисленные виды ценнейшей продукции [5, 6], что предопределяет в дальнейшем целесообразность перехода на безотходные и экологически чистые технологии.

Согласно статистическим данным, только малая часть всех природных материалов

(около 2 %) в промышленности перерабатывается в полезную для человека продукцию, остальная часть (около 98 %) загрязняет окружающую среду в виде различных отходов. Разработка безотходных и энергоэффективных технологий, создание новых материалов с улучшенными эксплуатационными, функциональными и декоративными свойствами является ключевой задачей для различных отраслей промышленности, включая стекольную, керамическую, химическую, металлургическую, тароупаковочную и др. [7, 8]. Более того, вторичная переработка сырья и отходов производства экономически выгодная стратегия, позволяющая расширить ресурсы отрасли, снизить материальные и трудовые затраты и сделать продукцию более доступной.

Шликерные массы используются в процессе производства полированного керамогранита. Они представляют собой суспензии, содержащие твердый наполнитель (отход полировки керамогранита), воду (временную связку) и технологические добавки [9–11]. Технологические добавки выполняют различные функции: дефлокуляция (разжижение), стабилизация, коагуляция или пластификация [12–14].

На сегодняшний день переработка отходов керамогранита является принципиально значимой проблемой, поскольку отсутствуют качественные методы и эффективные технологии для их утилизации. Утилизация отходов от полировки керамогранита путем возврата в производственный цикл технологией получения керамогранита не предусмотрена, поэтому их накопление является источником экологических сложностей.

Отходы от полировки керамогранита обладают неньютоновским характером течения, это означает, что частицы отходов находятся во взвешенном состоянии в шликере и оседают с выталкиванием молекул воды, образуя вязкий осадок, который трудно перемешивать. При производстве полированного керамогранита в воду добавляют коагулянты, такие как $AlCl_3$, негативно влияющие на реологию шликеров. $AlCl_3$ действует как флокулянт, укрепляя получившийся осадок и обеспечивая его стабильность до момента удаления путем образования молекулярных связей между загрязняющими элементами.

Для устранения данного нежелательного эффекта необходимо найти дефлокулянт, который мог бы предотвратить слипание частиц с сохранением молекул воды внутри массы шликера [15–17]. В качестве дефлокулянтов выбраны сода, жидкое стекло, а также смесь соды и жидкого стекла в соотношении 1:1, как наиболее часто применяемые для разжижения глинистых минералов. Разжижение суспензий из отходов полировки керамогранита, основано на том, что обменные ионы кальция и частично магния замещаются ионами натрия [18].

Материалы и методы. Для приготовления шликера брали навеску отхода полировки керамогранита ООО «Белкерамика», просеянную через сито № 01, затем добавляли определенное количество дефлокулянта и воды. В качестве дефлокулянта выбраны сода, жидкое натриевое стекло, а также смесь соды и жидкого натриевого стекла в соотношении 1:1. Дефлокулянт добавляли в расчёте 4 мл на 50 граммов отхода. Воду вводили в таких объемах, чтобы достичь вязкотекучей консистенции.

Измерения реологических характеристик проводили на ротационном вискозиметре «Реотест 2».

С целью облегчения оценки действия дефлокулянта введена эмпирическая шкала текучести с диапазоном от 1 до 10, где 1 – шликер скорее ломается, чем перемешивается, 10 – при перемешивании не чувствуется сопротивление шликера. Улучшение реологических и пластичных свойств шликеров наблюдали визуально.

Для определения физико-механических характеристик керамогранита с применением отходов приготовлены экспериментальные образцы плит размером 5×5 см и балок размером 4×4×16 см. Произведен расчёт шихты для 5 партий (составов), в каждой партии 5 образцов. Партия 1 не содержит в составе отход полировки керамогранита и используется в качестве контрольных образцов, партии 2, 3, 4, 5 содержат 3, 5, 7, 10 % отхода полировки керамогранита соответственно (таблица 1).

Таблица 1

Составы керамогранитных образцов

№ партии (% отхода)	Отход полировки керамогранита, г	Каолин, г	Полевой шпат, г	Глина, г
1 (0)	0	801,99	233,19	14,82
2 (3)	31,5	777,93	226,20	14,37
3 (5)	52,5	761,88	221,52	13,65
4 (7)	73,5	745,86	206,01	13,35
5 (10)	105	721,80	199,38	13,35

Для определения водопоглощения и пористости керамической плитки использован вакуумный метод. Плитку взвешивали и записывали массу, затем её погружали в вакуум-установку. После создания вакуума пускали воду на определенное время (1–2 минуты), далее вынимали и снова взвешивали. Разница между массой плитки до и после погружения в воду позволяет определить количество воды, которое было поглощено.

Для определения износостойкости керамогранита сделаны замеры длины, ширины, начальной массы m_n и массы плитки после истирания

m_k . Образцы устанавливали на подвижную платформу круга истирания и закрепляли его зажимами, затем на поверхность плитки наносилась абразивная смесь, состоящая из частиц различного размера и твердости. Подвижная платформа начинала двигаться по основанию, при этом абразивная смесь действовала на поверхность плитки. В процессе движения платформы измерялось количество потерь материала с поверхности плитки.

После эксперимента рассчитана площадь образцов, разница масс после 12 циклов истирания m_{12} и износостойкость Q (г/см²) по формуле (1.1):

$$Q = \frac{m_{12}}{s} \quad (1)$$

Основная часть. Шликерные массы являются концентрированными суспензиями с объемным соотношением дисперсной фазы к дисперсионной среде от 9,5 до 2,5, имеющими в составе твердый наполнитель, временную связку и технологические добавки. В данном эксперименте твердый наполнитель – отход полировки керамогранита, временная связка шликерных

масс – вода, технологическая добавка – жидкое стекло и сода, которые выступают в роли дефлокулянта.

Разработанные составы шликеров представлены в таблице 2. Полученные реограммы (рисунки 1–3) свидетельствуют о тиксотропном течении шликера, в том числе с применением различных дефлокулянтов, что подтверждает медленное снижение вязкости при одновременном возрастании градиента скорости сдвига.

Таблица 2

Составы керамогранитных шликеров с добавлением дефлокулянтов

№ состава	Количество сухого отхода полировки керамогранита, г	Используемый дефлокулянт	Количество дефлокулянта, мл	Количество воды в шликере, мл
1	50	–	–	18,5
2	50	Сода	0,25	18,25
3	50	Сода	0,50	18,00
4	50	Сода	0,75	17,75
5	50	Сода	1,00	17,50
6	50	Сода	1,25	17,25
7	50	Сода	1,50	17,00
8	50	Сода	1,75	16,75
9	50	Жидкое стекло	0,50	18,00
10	50	Жидкое стекло	1,00	17,50
11	50	Жидкое стекло	1,5	17,00
12	50	Жидкое стекло	2,00	16,50
13	50	Жидкое стекло	2,50	16,00
14	50	Жидкое стекло	3,00	15,50
15	50	Сода и жидкое стекло (1:1)	0,50	19,50
16	50	Сода и жидкое стекло (1:1)	1,00	19,00
17	50	Сода и жидкое стекло (1:1)	1,50	18,50
18	50	Сода и жидкое стекло (1:1)	2,00	18,00
19	50	Сода и жидкое стекло (1:1)	2,50	17,50
20	50	Сода и жидкое стекло (1:1)	3,00	17,00
21	50	Сода и жидкое стекло (1:1)	3,50	16,50
22	50	Сода и жидкое стекло (1:1)	4,00	16,00
23	50	Сода и жидкое стекло (1:1)	4,50	15,50
24	50	Сода и жидкое стекло (1:1)	5,00	15,00

Для составов 1–8 с увеличением содержания раствора соды градус подъема модуля сдвига сначала растет вплоть до состава 3, последние значения которого зашкалили прибор, начиная с состава 4 возрастание становится медленнее, при этом на составах 7 и 8 возрастание вновь оказывается резким (рисунок 1, *а*). Таким образом, количество данного дефлокулянта (соды) влияет на изменение модуля сдвига не линейно, а волнообразно. Эффект, полученный от добавления соды заметен только у составов 3–8, что говорит о нелинейной корреляции данных показателей (рисунок 1, *б*). Применение соды в качестве дефлокулянта для отходов полировки керамогранита малоэффективно.

Для составов 9–14 с увеличением содержания раствора жидкого стекла градус подъема модуля сдвига сначала уменьшается при составах 9 и 10, начиная с состава 11 возрастание становится стабильным (рисунок 2, *а*). Количество

данного дефлокулянта (жидкого стекла) влияет на изменение модуля сдвига более выражено, чем раствор соды, что определяет плохую перемешиваемость и быстрое затвердевание шликера. Стоит отметить, что жидкое стекло в роли дефлокулянта даёт более резкое возрастание модуля сдвига, при этом гораздо однородное убывание вязкости (рисунок 2, *а, б*).

Для составов 15–24 с увеличением содержания смеси соды и жидкого стекла сначала уменьшается градус подъема модуля сдвига при составах 15 и 16, начиная с состава 17 вплоть до состава 20 возрастание происходит под примерно одинаковым углом (рисунок 3, *а*). У состава 21 возрастание гораздо медленнее предыдущих, у состава 22 – под наиболее резким углом из всех, а состав 24 вновь возрастает менее резко. Количество данного дефлокулянта (смесь соды и жидкого стекла, 1:1) значительно влияет на изменение модуля сдвига, чем раствор соды, при этом

можно уловить весьма схожие закономерности изменения вязкости и модуля сдвига у данных типов дефлокулянтов (рис. 3, б).

По результатам эмпирической оценки текучести шликеров наилучший результат показал

состав 22 (согласно табл. 2), который предпочтительнее использовать для дальнейших исследований (табл. 3).

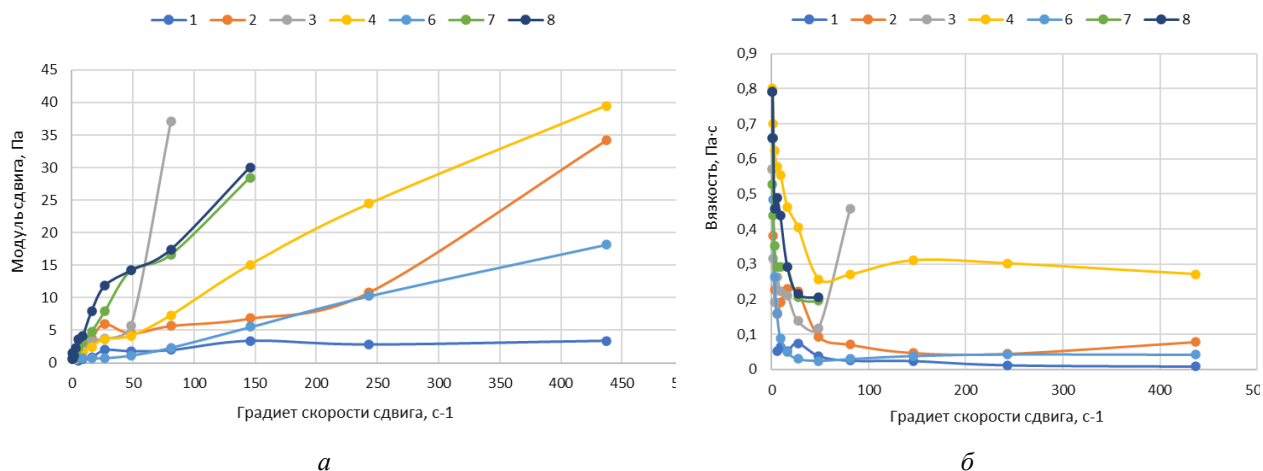


Рис. 1. Реограмма керамогранитных шликеров с добавлением дефлокулянта (сода):

а – зависимость модуля сдвига от градиента скорости сдвига;

б – зависимость вязкости от градиента скорости сдвига;

1–8 – составы шликеров согласно данным таблицы 1

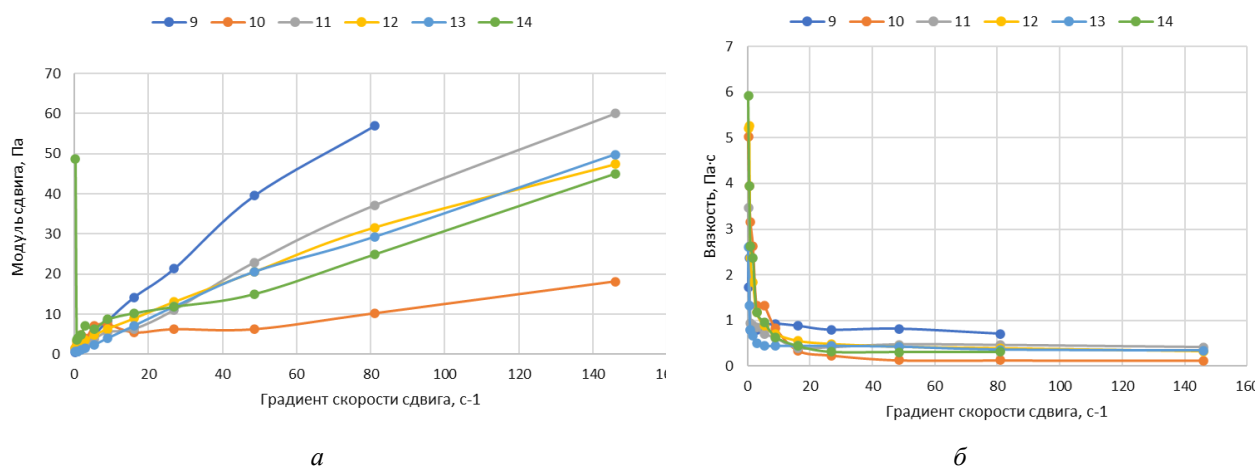


Рис. 2. Реограмма керамогранитных шликеров с добавлением дефлокулянта (жидкое стекло):

а – зависимость модуля сдвига от градиента скорости сдвига; б – зависимость вязкости от градиента скорости сдвига;

9–14 – составы шликеров согласно данным таблицы 1

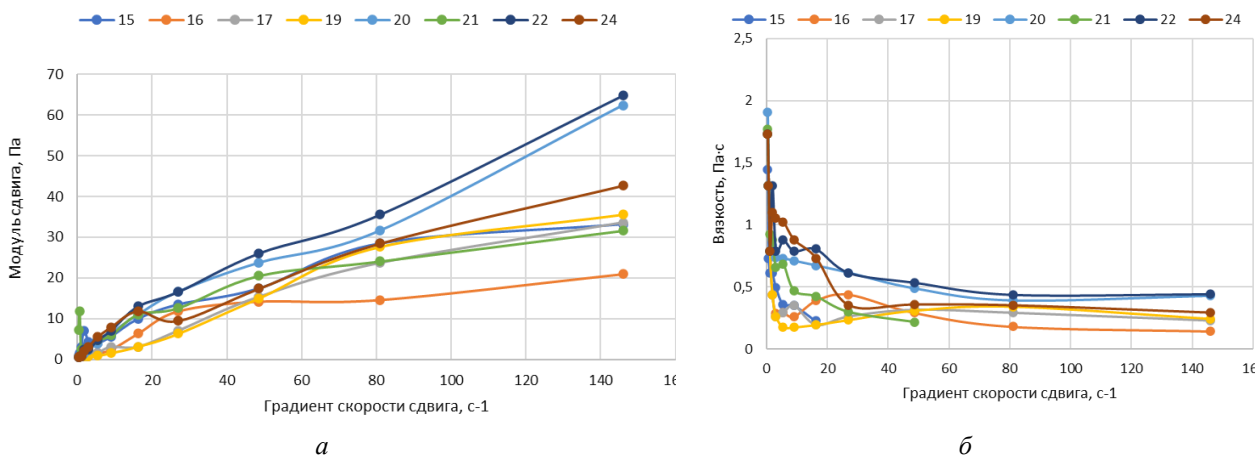


Рис. 3. Реограмма керамогранитных шликеров с добавлением дефлокулянта (смесь соды и жидкого стекла, 1:1):

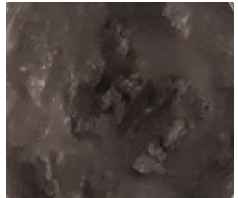
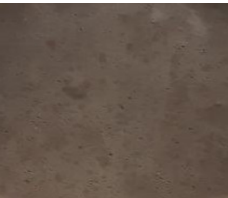
а – зависимость модуля сдвига от градиента скорости сдвига;

б – зависимость вязкости от градиента скорости сдвига;

15–24 – составы шликеров согласно данным таблицы 1

Таблица 3

Эмпирическая оценка текучести дефлокулянтов

№ состава	Внешний вид шликера	Эмпирическая оценка текучести	№ состава	Внешний вид шликера	Эмпирическая оценка текучести	№ состава	Внешний вид шликера	Эмпирическая оценка текучести
1		3	9		3	17		4
2		3	10		3	18		5
3		3	11		2	19		6
4		4	12		3	20		5
5		4	13		4	21		6
6		4	14		2	22		7
7		4	15		4	23		6
8		4	16		4	24		5

Экспериментальные образцы испытаны на водопоглощение (таблица 4). Результаты показали, что водопоглощение незначительно возрастает с увеличением содержания отхода керамогранита в составе образцов и находится в пределах допустимого для керамических плиток полусухого прессования согласно ГОСТ 13996–2019 «Плитки керамические. Общие технические условия».

Предел прочности при изгибе уменьшается с увеличением содержания отхода керамогранита

в составе образцов (таблица 5). В соответствии с ГОСТР 57141–2016 предел прочности при изгибе должен составлять не менее 30 МПа. Данному требованию в полной мере соответствуют контрольные образцы без отходов полировки и образцы с содержанием 3 % отходов полировки, дальнейшее увеличение процентного содержания отходов керамогранита отрицательно сказывается на прочности при изгибе образцов.

Таблица 4

Водопоглощение керамогранита с использованием отходов полировки

№ партии	№ образца	Масса сухого образца m_0 , г	Масса мокрого образца m_2 , г	Водопоглощение, B_m , %	Среднее значение водопоглощения в партии, %
Партия 1	1	42,4	43,1	1,65	2,18
	2	40,5	42,0	3,70	
	3	41,8	42,1	0,72	
	4	44,2	45,3	2,49	
	5	43,1	44,1	2,32	
Партия 2	1	51,8	53,5	2,28	2,28
	2	50,5	52,7	2,36	
	3	52,0	53,3	2,33	
	4	52,3	54,1	2,42	
	5	52,2	53,7	2,01	
Партия 3	1	42,4	44,2	2,24	2,62
	2	45,	47,0	2,44	
	3	44,0	45,3	2,95	
	4	44,1	46,1	2,53	
	5	44,1	45,4	2,95	
Партия 4	1	42,9	44,7	3,20	3,16
	2	44,4	46,2	3,05	
	3	42,8	44,6	3,20	
	4	42,8	44,6	3,21	
	5	43,7	45,5	3,12	
Партия 5	1	42,2	44,3	3,98	3,45
	2	42,8	45,1	3,37	
	3	42,0	44,2	3,24	
	4	34,9	36,8	3,44	
	5	42,1	44,3	3,23	

Таблица 5 (начало)

Прочность на изгиб керамогранита с использованием отходов полировки

№ партии	№ образца	Длина l , мм	Ширина b , мм	Высота h , мм	Прочность на изгиб $R_{изг}$, МПа	Среднее значение прочности на изгиб в партии, МПа
Партия 1	1	54,3	13,2	12,7	40,76	37,88
	2	54,1	13,4	12,5	39,13	
	3	53,9	13,1	13,1	35,09	
	4	54,9	13,2	12,7	37,00	
	5	52,9	13,1	13,3	37,44	
Партия 2	1	54,1	13,6	10,8	36,15	35,14
	2	53,6	13,6	10,8	33,64	
	3	53,7	13,6	10,8	35,62	
	4	53,5	13,6	10,8	34,59	
	5	53,4	13,6	11,1	35,79	

Таблица 5(окончание)

Прочность на изгиб керамогранита с использованием отходов полировки

№ партии	№ образца	Длина l , мм	Ширина b , мм	Высота h , мм	Прочность на изгиб $R_{изг}$, МПа	Среднее значение прочности на изгиб в партии, МПа
Партия 3	1	55,2	14,0	10,0	30,71	30,90
	2	55,0	13,9	10,2	29,09	
	3	54,8	14,1	10,5	32,84	
	4	55,4	14,2	10,3	29,13	
	5	55,2	14,3	10,4	32,69	
Партия 4	1	54,5	13,9	11,0	25,58	25,61
	2	55,0	13,9	10,2	24,86	
	3	55,1	14,2	10,4	27,33	
	4	55,2	14,2	9,9	24,01	
	5	54,5	13,9	10,4	26,27	
Партия 5	1	55,3	14,1	10,0	23,81	22,67
	2	55,1	14,1	10,2	22,42	
	3	55,3	14,0	10,5	21,92	
	4	55,2	14,2	10,5	24,12	
	5	55,3	14,1	10,6	21,08	

Результаты исследований экспериментальных образцов показали, что износостойкость повышается с увеличением содержания отхода по-

лировки керамогранита в составе образцов (таблица 6) и удовлетворяет минимальным требованиям.

Таблица 6

Износостойкость керамогранита с использованием отходов полировки

№ партии	Длина, см	Ширина, см	Площадь S , см ²	m_n , г	m_k , г	m_{12} , г	Q , г/см ²
Партия 1	4,63	4,66	21,58	50,60	48,10	2,50	0,12
Партия 2	4,66	4,62	21,53	51,10	47,90	3,20	0,15
Партия 3	4,61	4,67	21,53	49,80	46,40	3,40	0,16
Партия 4	4,59	4,59	21,07	49,70	46,20	3,50	0,17
Партия 5	4,60	4,65	21,39	50,30	46,40	3,90	0,18

Выводы.

1. Рассмотрена возможность повторного использования отходов полированного керамогранита в качестве основного сырья для производства керамогранита.

2. Показано, что определенные типы дефлокулянтов способствуют улучшению текучести и пластичности отходов полировки керамогранита, это может быть полезно для оптимизации процесса обработки. Наиболее предпочтительным и эффективным дефлокулянт для шликера является смесь соды и жидкого стекла с соотношением 1:1. Оптимальная концентрация составила 4 мл на 50 г сухого отхода, при которой обеспечивается наибольшая степень стабилизации частиц. Недостаток или избыток дефлокулянта может привести к нежелательным изменениям в консистенции материала.

3. Изучение влияния дефлокулянта на реологические характеристики отходов керамогранита имеет потенциал для улучшения процессов переработки отходов и повышения качества конечной продукции в керамической промышленности.

4. Дальнейшие исследования в данной области могут включать более глубокий анализ взаимодействия различных типов дефлокулянтов с отходами керамогранита, что позволит определить оптимальные условия для достижения желаемых реологических характеристик материала.

5. Определены физико-механические характеристики керамогранита с применением отходов полировки керамогранита. Подобрано рациональное содержание отхода в составе массы – 3 %.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесникова Л.А., Ковальчук Т.В. Проблемы и перспективы экологической безопасности горнодобывающих регионов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 2–1. С.

275–286. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-275-286

2. Нгуен Т.Т.Х. Текущая ситуация по обращению с производственными и бытовыми отходами во Вьетнаме и других странах мира // Экономика и управление: проблемы, решения. 2020. Т. 1. № 7. С. 146–151. DOI: 10.34684/ek.up.p.r.2020.07.01.020

3. Антонова Т.Л., Евсикова Е.В. Основы правового регулирования обращения с производственными и бытовыми отходами и административная ответственность за их нарушение // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Юридические науки. 2020. Т. 6 (72). № 1. С. 402–418.

4. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Джуманиязов З.Б., Болтабаев Д.З., Хужязов Ш.Х., Рузимов Е.С. Влияние порошка отходов стекла на свойства керамической брусчатки на основе лессовой породы // Стекло и керамика. 2024. Т. 97. № 3 (1155). С. 30–36. DOI: 10.14489/glc.2024.03.pp.030-036

5. Бондаренко Н.И., Басов В.О., Даценко А.О. Разработка составов вяжущих с использованием стеклоотходов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 83–89. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-83-89

6. Min'ko N.I., Dobrinskaya O.A., Bulgakov A.S. Technological features of using secondary products in the production of silicate materials // Glass Physics and Chemistry. 2018. Vol. 44. No. 3. Pp. 238–243. DOI: 10.1134/S1087659618030082

7. Krakhmatova V.Y., Zakharov A.I., Andreev D.V., Krivoshechepov A.F. Methods of additive technologies for the manufacture of ceramic products // Glass and Ceramics. 2019. Vol. 75. No. 11–12. Pp. 479–484. DOI: 10.1007/s10717-019-00116-3

8. Бондаренко Н.И., Бондаренко Д.О., Ковылова Ю.В., Даценко А.О. О возможности получения нефритованных глазурей для керамической плитки с применением вторичных источников сырья // Вестник технологического университета. 2023. Т. 26. № 4. С. 29–32. DOI: 10.55421/1998-7072_2023_26_4_29

9. Петрейкина Н.С., Полутина Е.С., Яровая О.В., Вартанян М.А., Беляков А.В. Реологические свойства концентрированных водных суспензий на основе высокодисперсных кальций-

фосфатных порошков // Успехи в химии и химической технологии. 2014. Т. 28. № 8 (157). С. 74–76.

10. Акиншин Д.В., Парамонова Н.Д., Россихина Л.А., Вартанян М.А., Яровая О.В. Реологические свойства концентрированных водных суспензий на основе оксида алюминия // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. 31. № 3 (184). С. 7–9.

11. Zdorenko N.M., Min'ko N.I., Bessmertnyi V.S., Simachev A.V. Synergism of organo-mineral defloculators in ceramic slips // Glass and Ceramics. 2014. Vol. 71. No. 1–2. Pp. 68–70. DOI:10.1007/s10717-014-9619-9

12. Слюсарь О.А., Здоренко Н.М. Модифицирующие комплексные добавки для каолиновых суспензий // Перспективные материалы. 2014. № 1. С. 44–48.

13. Slyusar A.A., Slyusar O.A., Zdorenko N.M. Rheological properties and critical structure-forming concentration of kaolin suspensions with complex additives // Glass and Ceramics. 2008. Vol. 65. No. 7–8. Pp. 285–286. DOI: 10.1007/s10717-008-9060-z

14. Слюсарь А.А., Здоренко Н.М., Горобец А.В. О влиянии комплексной разжижающей добавки на коллоидно-химические свойства суспензий каолина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2008. № 4. С. 89–90.

15. Slyusar' A.A., Slyusar' O.A., Zdorenko N.M. Complex thinning additions for ceramic slips // Glass and Ceramics. 2009. Vol. 66. No. 7–8. Pp. 297–298. DOI: 10.1007/s10717-009-9187-6.

16. Пищ И.В., Климош Ю.А., Габалов Е.В. Влияние разжижающих добавок на реологические свойства керамических шликеров // Труды БГТУ. 2013. № 3. С. 106–109.

17. Mozgovoi G.V., Butman M.F., Kozlovskaya G.P., Nikolaeva E.V. Effect of complex thinning composition based on oxyethylidenediphosphonic acid, liquid glass, and soda on the structural-mechanical properties of a clay suspension // Glass and Ceramics. 2011. Vol. 68. No. 7–8. Pp. 267–269. DOI: 10.1007/s10717-011-9369-x

18. Kotova E.V., Mozgovoi G.V., Kozlovskaya G.P., Butman M.F. Complex thinner based on soda, liquid glass and oxyethylidenediphosphonic acid in ceramic casting technology // Glass and Ceramics. 2014. Vol. 71. No. 1–2. Pp. 71–74. DOI: 10.1007/s10717-014-9620-3

Информация об авторах

Бондаренко Надежда Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: bondarenko-71@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Басов Владислав Олегович, магистрант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: jeigjb@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бондаренко Диана Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: di_bondarenko@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дороганов Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой технологии стекла и керамики. E-mail: dva_vadjik1975@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Лукин Евгений Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры химической технологии керамики и огнеупоров. E-mail: lukin.e.s@muctr.ru. Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева. Россия, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9.

Пивинский Александр Эдуардович, аспирант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: pivinskiy_aleed@edu.bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 09.09.2024 г.

© Бондаренко Н.И., Басов В.О., Бондаренко Д.О., Дороганов В.А., Лукин Е.С., Пивинский А.Э., 2024

**^{1,*}Bondarenko N.I., ¹Basov V.O., ¹Bondarenko D.O., ¹Doroganov V.A., ²Lukin E.S.,
¹Pivinskiy A.E.**

¹State Technological University named after V.G. Shukhov

²D.I. Mendeleev Russian Chemical Technical University

*E-mail: bondarenko-71@mail.ru

INFLUENCE OF DEFLOCCULANTS ON THE RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF CERAMOGRAHITE WASTE

Abstract: The effect of deflocculants used for separation and removal of clots and sediments in slip on the rheological properties of porcelain stoneware waste was studied. The aim of the work was to determine their optimal concentration, which ensures the best dispersion and stabilization of porcelain stoneware waste. Studies were conducted with various concentrations of deflocculant, for which soda, liquid sodium glass, and a mixture of soda and liquid sodium glass in a 1:1 ratio were selected. The optimal concentration was 4 ml per 50 g of dry waste, which ensures the highest degree of particle stabilization. The results confirm the effectiveness of adding deflocculant to porcelain stoneware waste, which leads to a significant improvement in their rheological characteristics. It is noted that the use of soda as a deflocculant for porcelain stoneware polishing waste is ineffective. It has been established that liquid glass as a deflocculant provides a sharper increase in the shear modulus, while the viscosity decreases much more uniformly. The most preferable and effective deflocculant for slip has been determined – a mixture of soda and liquid glass with a ratio of 1:1. The use of various deflocculants can significantly facilitate the processing of porcelain stoneware waste, making them more suitable for reuse, which will lead to a decrease in the cost of their disposal and a reduction in the negative impact on the environment. The results of the work can be used in industry to optimize the processes of disposal and reuse of this waste.

Keywords: deflocculant, rheology, porcelain stoneware waste, slip, liquid glass, soda.

REFERENCES

1. Kolesnikova L.A., Kovalchuk T.V. Problems and prospects of environmental safety of mining regions [Problemy i perspektivy bezopasnosti gornodobyvayushchikh regionov]. Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2021. No. 2–1. Pp. 275–286. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-275-286. (rus)

2. Nguyen T.T.H. The current situation with industrial and household waste in vietnam and other countries of the world [Tekushchaya situatsiya po primeneniyu s proizvodstvennymi i bytovymi otkhodami vo V'yetname i drugih stranakh mira]. Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya. 2020. Vol. 1. No. 7. Pp. 146–151. DOI: 10.34684/ek.up.p.r.2020.07.01.020. (rus)

3. Antonova T.L., Evsikova E.V. Bases of legal regulation of handling with production and household waste and administrative responsibility for their violation [Osnovy pravovogo regulirovaniya obrashcheniy s proizvodstvennymi i bytovymi otkhodami i administrativnaya otvetstvennost' za ikh narusheniye]. Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Juridical science. 2020. Vol. 6 (72). No. 1. Pp. 402–418. (rus)
4. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.Kh., Djumaniyazov Z.B., Boltabayev D.Z., Xujiyazov Sh.X., Ruzimov Yo.S. Influence of waste glass powder on the properties of ceramic slab based on less rock [Vliyaniye poroshka otkhodov stekla na svoystva keramicheskoy bruschatki na osnove lessovoy porody]. Glass and Ceramics. 2024. Vol. 97. No. 3 (1155). Pp. 30–36. DOI: 10.14489/glc.2024.03.pp.030-036. (rus)
5. Bondarenko N.I., Basov V.O., Datsenko A.O. Development of binding compositions using glass waste [Razrabotka sostavov vyazhushchikh s ispol'zovaniyem steklootkhodov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 1. Pp. 83–89. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-83-89. (rus)
6. Min'ko N.I., Dobrinskaya O.A., Bulgakov A.S. Technological features of using secondary products in the production of silicate materials // Glass Physics and Chemistry. 2018. Vol. 44. No. 3. Pp. 238–243. DOI: 10.1134/S1087659618030082.
7. Krakhmatova V.Y., Zakharov A.I., Andreev D.V., Krivoshechepov A.F. Methods of additive technologies for the manufacture of ceramic products. Glass and Ceramics. 2019. Vol. 75. No. 11–12. Pp. 479–484. DOI: 10.1007/s10717-019-00116-3
8. Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Kovylova Y.V., Datsenko A.O. On the possibility of obtaining unfritted glazes for ceramic tiles with the use of secondary sources of raw materials [O vozmozhnosti polucheniya nefritovannykh glazurey dlya keramicheskoy plitki s primeneniym vtorichnykh istochnikov syr'ya]. Herald of Technological University. 2023. Vol. 26. No. 4. Pp. 29–32. DOI: 10.55421/1998-7072_2023_26_4_29. (rus)
9. Petreykina N.S., Polutina E.S., Yarovaya O.V., Vartanyan M.A., Belyakov A.V. Rheological behaviour of concentrated water dispersions based on fine calcium-phosphate powders [Reologicheskiye svoystva kontsentrirrovannykh vodnykh suspenziy na osnove vysokodispersnykh kal'tsiyfosfatnykh poroshkov]. Advances in Chemistry and Chemical Technology. 2014. Vol. 28. No. 8 (157). Pp. 74–76. (rus)
10. Akinshin D.V., Paramonova N.D., Rosokhina L.A., Vartanyan M.A., Yarovaya O.V. Rheological behaviour of concentrated water dispersions based on aluminium oxide [Reologicheskiye svoystva kontsentrirrovannykh vodnykh suspenziy na osnove oksida alyuminiya]. Advances in Chemistry and Chemical Technology. 2017. Vol. 31. No. 3 (184). Pp. 7–9. (rus)
11. Zdorenko N.M., Min'ko N.I., Bessmertnyi V.S., Simachev A.V. Synergism of organo-mineral deflocculators in ceramic slips. Glass and Ceramics. 2014. Vol. 71. No. 1–2. Pp. 68–70. DOI:10.1007/s10717-014-9619-9.
12. Slyusar O.A., Zdorenko N.M. Modifying complex additives for kaolinic suspensions [Modifitsiruyushchiye kompleksnyye dobavki dlya kaolinovykh suspenziy]. Perspektivnye materialy. 2014. No. 1. Pp. 44–48. (rus)
13. Slyusar A.A., Slyusar O.A., Zdorenko N.M. Rheological properties and critical structure-forming concentration of kaolin suspensions with complex additives. Glass and Ceramics. 2008. Vol. 65. No. 7–8. Pp. 285–286. DOI: 10.1007/s10717-008-9060-z.
14. Slyusar A.A., Zdorenko N.M., Gorobets A.V. On the influence of a complex thinning additive on the colloidal-chemical properties of kaolin suspensions [O vliyani kompleksnoy razzhizhayushchey dobavki na kolloidno-khimicheskiye svoystva suspenziy kaolina]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2008. No. 4. Pp. 89–90. (rus)
15. Slyusar' A.A., Slyusar' O.A., Zdorenko N.M. Complex thinning additions for ceramic slips. Glass and Ceramics. 2009. Vol. 66. No. 7–8. Pp. 297–298. DOI: 10.1007/s10717-009-9187-6.
16. Pish I.V., Klimosh Yu.A., Gabalov E.V. Influence of thinning additives on the rheological properties of ceramic slips [Vliyaniye razzhizhayushchikh dobavok na reologicheskiye svoystva keramicheskikh shlikerov]. Proceedings of BSTU. 2013. No. 3. Pp. 106–109. (rus)
17. Mozgovoi G.V., Butman M.F., Kozlovskaya G.P., Nikolaeva E.V. Effect of complex thinning composition based on oxyethylidenediphosphonic acid, liquid glass, and soda on the structural-mechanical properties of a clay suspension. Glass and Ceramics. 2011. Vol. 68. No. 7–8. Pp. 267–269. DOI: 10.1007/s10717-011-9369-x
18. Kotova E.V., Mozgovoi G.V., Kozlovskaya G.P., Butman M.F. Complex thinner based on soda, liquid glass and oxyethylidenediphosphonic acid in ceramic casting technology. Glass and Ceramics. 2014. Vol. 71. No. 1–2. Pp. 71–74. DOI: 10.1007/s10717-014-9620-3

Information about the author

Bondarenko, Nadezhda I., PhD, Assistant professor. E-mail: bondarenko-71@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Basov, Vladislav O., Master student. E-mail: jeigjb@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Bondarenko, Diana O., PhD, Assistant professor. E-mail: di_bondarenko@mail.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_vadjik1975@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Lukin Evgeny S., DSc, Professor. E-mail: lukin.e.s@muctr.ru. D.I. Mendeleev Russian Chemical Technical University, Russia, 125047, Moscow, Miuskaya Ploshchad, 9.

Pivinskiy Alexander E., Postgraduate student. E-mail: pivinskiy_aleed@edu.bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 09.09.2024

Для цитирования:

Бондаренко Н.И., Басов В.О., Бондаренко Д.О., Дороганов В.А., Лукин Е.С., Пивинский А.Э. Влияние дефлокулянтов на реологические характеристики отходов керамогранита. 2024. № 12. С. 82–92. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-82-92

For citation:

Bondarenko N.I., Basov V.O., Bondarenko D.O., Doroganov V.A., Lukin E.S., Pivinskiy A.E. Influence of defloculants on the rheological characteristics of ceramogranite waste. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 82–92. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-82-92

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-93-105

¹Качаев А.Е., ²Севостьянов В.С.¹Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: doctor_cement@mail.ru

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ДЕЗИНТЕГРАТОРОМ НА ТРЕНИЕ, ПРИ ДВИЖЕНИИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО СЛОЯ МАТЕРИАЛА В ПОМОЛЬНОЙ КАМЕРЕ МЕЛЬНИЦЫ

Аннотация. Теоретические исследования в области расчета параметров мощности мельниц дезинтеграторного типа являются актуальными. Связано это с необходимостью их инженерного обоснования для последующего сравнения с результатами экспериментальных исследований измельчителей подобного типа. В процессе разработки методики расчета мощности, потребляемой дезинтегратором на трение, при движении относительного слоя материала внутри помольной камеры, были использованы прямые математические методы моделирования для определения силовых и энергетических параметров агрегата. Математическое моделирование процесса трения относительного слоя материала о рабочие поверхности помольной камеры проводилось на основании известных исследований о трении. Разработана и предложена к использованию методика определения величины мощности для оригинальной конструкции мельницы дезинтеграторного типа, расходуемой на трение при движении относительного слоя материала по рабочим поверхностям помольной камеры мельницы в отдельности для каждого ротора. Обозначены и выделены основные конструктивные параметры камеры помола мельницы, которые влияют на формирование показателя мощности мельницы, расходуемой ею на сопротивление трению двухфазного потока по основным поверхностям камеры помола дезинтегратора. Математически установлено, что конструктивно-технологические параметры оригинальной конструкции помольной камеры мельницы, ее скоростные режимы вращения роторов и кинематические параметры двухфазного потока находятся во взаимосвязи с энергетическими показателями ее работы. Представлены графические зависимости мощностей, потребляемых роторами дезинтеграторной мельницы на трение, от скоростных параметров вращения роторов при фиксированных значениях конструктивных параметров. На основании проведенного анализа расчета параметров мощностей, расходуемых дезинтегратором на трение материала о рабочие поверхности его помольной камеры, рекомендовано использовать представленный подход для расчета аналогичных показателей мощности и для других конструктивных решений роторных мельниц. Использование данной методики расчета в прогнозе продолжительности работы мельницы дезинтеграторного типа позволит сократить износ рабочих поверхностей помольной камеры, тем самым, повысив надежность при эксплуатации агрегата.

Ключевые слова: дезинтеграторная мельница, мощность, трение, помольная камера, момент трения, ротор.

Введение. Наиболее важным вопросом в промышленности строительных материалов остается износ технологического оборудования. В помольных, смесительных, формующих установках при производстве строительных материалов наблюдается изнашивание рабочих поверхностей, ударных частей, лопастей и др. [1–2]. Сдерживающим фактором в развитии помольного, смесительного и гранулирующего оборудования является намот металлических материалов в объеме готового продукта. Конструктивные особенности различных устройств смесителей и измельчителей постоянно совершенствуются на предмет обеспечения надежности работы таких агрегатов и повышения качества готового продукта [3].

Контактные напряжения на границе взаимодействия частицы материала с рабочим элементом измельчителя, или, например, лопастью роторного смесителя, позволяют оценивать величину износа в зависимости от энергетических параметров работы оборудования [4]. Однако, следует понимать, что оригинальные конструкции помольных агрегатов для различных технологических процессов промышленности строительных материалов по-разному испытывают нагрузки на трение. В зависимости от конструктивных особенностей измельчителя, его назначения и сложности технологического исполнения результат оценки его износа будет различным: при ультратонком помоле

($S_{уд} = 4000\text{--}6000 \text{ см}^2/\text{кг}$) величина износа контактных, рабочих поверхностей резко возрастает [5] при средней твердости измельчаемого материала по шкале Мооса 5–7 единиц, при грубом помоле (например, известняка до $S_{уд} = 1500\text{--}2000 \text{ см}^2/\text{кг}$) показатель износа в два раза ниже по сравнению с вышеуказанным условием [6].

В работе технологического оборудования очень важно учитывать условия процессов трения частиц материала по их рабочим и контактным поверхностям. Особенно износостойкими показателями для технологических процессов измельчения различных материалов должны обладать мельницы. Оценка процессов, связанных с износом материалов, из которых выполнены внутренние детали и узлы мельниц, необходима для прогнозирования сроков эффективной работы помольных агрегатов, а также объема качественной готовой продукции на единицу металлоемкости оборудования [7].

В зависимости от сложности конструктивного исполнения технологического оборудования меняются показатели его надежности, в том числе и физического износа контактных, рабочих поверхностей. В дезинтеграторной мельнице [8], показанной на рис. 1, сконструирована оригинальная конструкция помольной камеры. Ее отличительной особенностью является закрытое

конструктивное исполнение, обеспечивающее внутреннюю циркуляцию воздушно-материального потока [9]. Конструкции роторов мельницы, образующие помольную камеру, показаны на рис. 2.



Рис. 1. Дезинтеграторная мельница

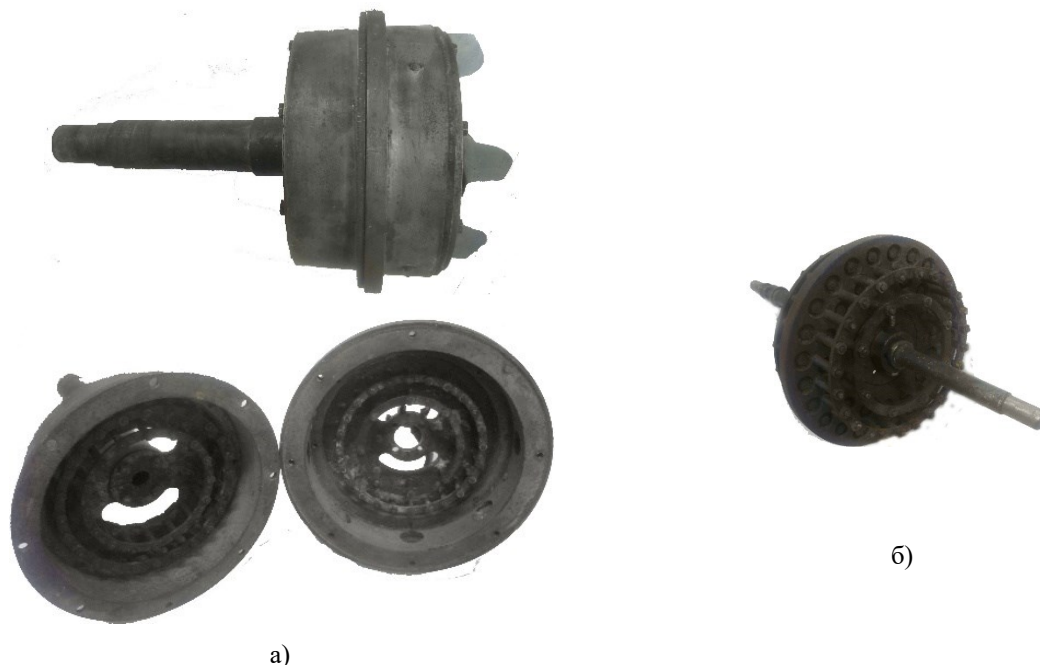


Рис. 2. Конструкции роторов дезинтеграторной мельницы, образующие помольную камеру:
а) – внешний ротор; б) – внутренний ротор.

Целью настоящего исследования является разработка методики определения величины мощности для оригинальной конструкции мельницы дезинтеграторного типа, расходуемой на

трение при движении относительного слоя материала по рабочим поверхностям помольной камеры мельницы в отдельности для каждого ротора.

Разработка такой методики расчета позволит определить количество энергии, которая потребляется мельницей при нагрузках трения, действующих внутри помольной камеры. Алгоритм расчета мощности, которая потребляется дезинтеграторной мельницей на трение слоя материала о рабочие поверхности помольной камеры, может быть использован для составления подобных расчетов относительно аналогичных конструктивных решений роторных мельниц. Определение мощности, расходуемой дезинтегратором на трение, позволит спрогнозировать износ рабочих поверхностей помольной камеры и тем самым,

повысить надежность и долговечность работы агрегата.

Методы и оборудование. При разработке методики расчета величины мощности, необходимой для преодоления трения воздушно-материальным потоком относительной высоты о рабочие поверхности помольной камеры в качестве объекта исследования использовался экспериментальный образец дезинтеграторной мельницы, показанный на рис. 1. Конструктивное исполнение помольной камеры дезинтеграторного агрегата показано на рис. 3.

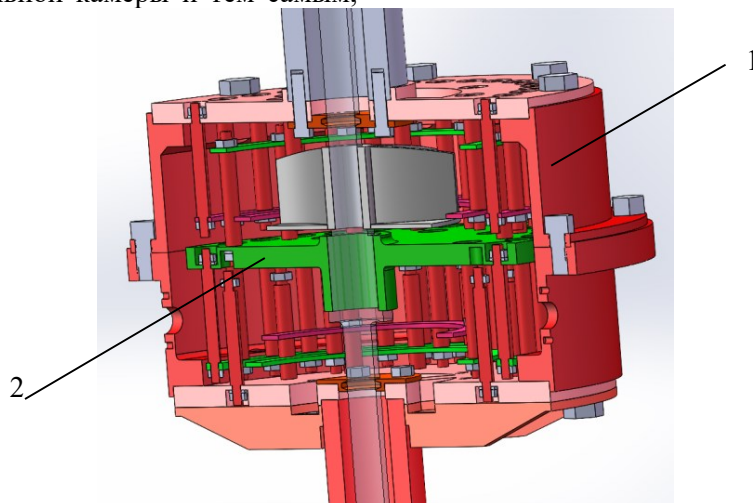


Рис. 3. Конструкция камеры помола дезинтеграторного измельчителя:
1 – внешний ротор; 2 – внутренний ротор.

Методика определения показателей мощности, необходимой для преодоления трения воздушно-материальным потоком внутри помольной камеры мельницы, использует прямые методы математического моделирования процессов. В методике используются результаты известных исследований по трению материалов о различные вращающиеся криволинейные поверхности [10-13].

Основная часть. Явление трения в дезинтеграторах является одной из важнейших причин, которая сдерживает широкое использование дезинтеграторных технологий измельчения в промышленности строительных материалов. Небольшие по размерам (например, по сравнению с молотковыми мельницами) ударные элементы различного профиля интенсивно изнашиваются и снижают надежность работы агрегата. Поэтому необходимо оценить количество энергии, которое тратится мельницей на трение двухфазного потока по контактным поверхностям помольной камеры измельчителя.

Двухфазный поток во вращательно-вихревом движении внутри помольной камеры мельницы вступает во взаимодействие с ударными элементами роторов и различными контактными поверхностями, принадлежащими камере помола

мельницы. При этом необходимо отметить, что форма ударных элементов, скоростные параметры вращения роторов, плотность двухфазного потока также оказывают влияние на величину мощности мельницы, которая потребляется ею на преодоление сопротивления всех силовых факторов трения.

На рабочие, контактные поверхности и ударные элементы помольной камеры измельчителя, представленной на рис. 3, — на внешний и на внутренний роторы — воздействуют силовые факторы трения воздушно-материального потока с дисперсными частицами. Вид этих взаимодействий и определяет характер трения двухфазного потока по различным криволинейным поверхностям.

В процессе взаимодействия воздушно-материального потока с рабочими поверхностями помольной камеры в местах контакта возникают различные силовые воздействия (ударные, сдвиговые и др.), одним из которых является воздействие трения, оказываемое со стороны частиц измельчаемого материала. Для нашего расчета мощности представим суммарную силу трения как сумму обобщенных силовых характеристик процесса трения, которые создаются и действуют на цилиндрические поверхности каждого из роторов внутри помольной камеры — $P_{б.внут}$ — и на

торцевые поверхности роторов – $P_{т.внут.}$. С акцентируем внимание на том, что на торцевых поверхностях роторов по спиральной траектории устанавливаются ударные элементы, например, круглого (или произвольного) поперечного сечения. Геометрическое сечение ударных элементов определяется в зависимости от физико-механических характеристик измельчаемого материала. Силовой фактор трения двухфазного потока от-

носительно торцевой поверхности внешнего ротора имеет вид обобщенной характеристики совместного действия сил $P'_{т.тр.}$ и $P''_{т.тр.}$. Силовые факторы $P'_{т.тр.}$ и $P''_{т.тр.}$, соответственно, характеризуют процессы определенного воздействия двухфазного потока о торцевую площадь нижнего диска внешнего ротора и сложного обтекания вращающихся ударных элементов роторов двухфазным потоком.

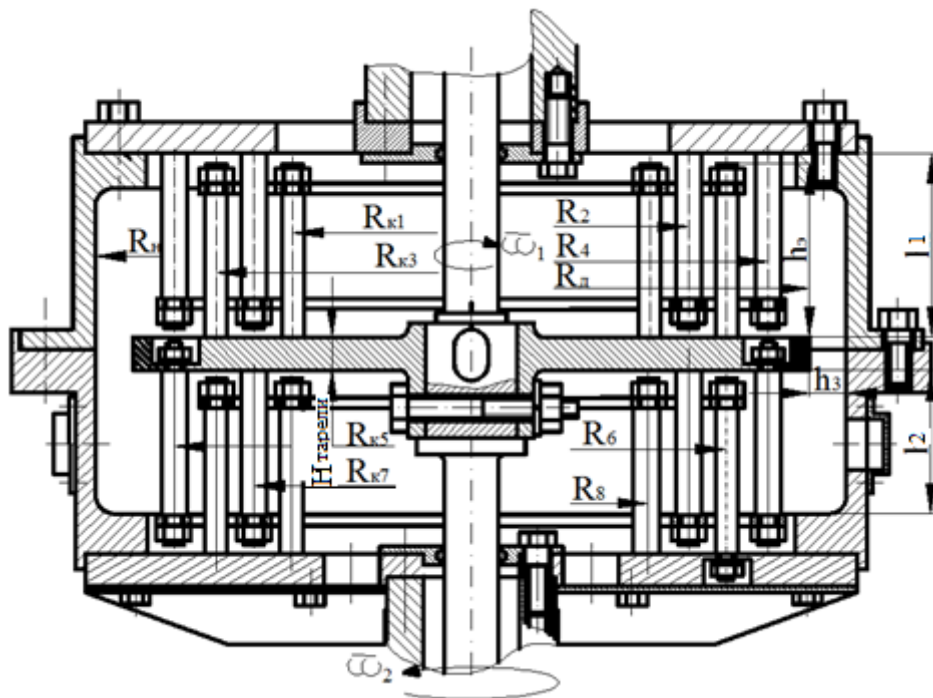


Рис. 4. Схема для расчета мощности мельницы, которая расходуется ею на сопротивление двухфазным потоком трению по контактным поверхностям камеры помола

Для сбора силовых нагрузок, действующих со стороны двухфазного потока на поверхности камеры помола, необходимо определиться с характером силовых нагрузок. Силовое равенство можно заключить в следящий вид:

$$\sum P_{тр.1} = \sum P_{б.внут.1} + \sum P_{т.внут.1} = P_{б.внут.1} + P'_{т.тр.1} + P''_{т.тр.1}. \quad (1)$$

Принимаем индекс 1 – для обозначения наружного ротора, индекс 2 – для внутреннего ротора.

Рассмотрим параметры трения, связанные с наружным ротором (индекс 1).

Определим силовой фактор трения двухфазного потока, который направлен на изнашивание цилиндрической поверхности наружного ротора. Причем его направление определяется с боковой стороны. Значит, с учетом результатов исследований в работе [14] выражение для определения данного силового фактора трения будет выглядеть следующим образом:

$$P_{б.внут.1} = \zeta \cdot \frac{\rho \varphi \cdot W_n^2}{2} \cdot A_{б.н.}, \quad (2)$$

где $A_{б.н.}$ – значение контактной поверхности наружного ротора, m^2 ; W_n – относительная тангенциальная скорость движения по окружности внутренней цилиндрической поверхности наружного ротора, m/c (данный параметр рассчитывается с помощью параметров кинематики трения частицы материала о вращающуюся цилиндрическую поверхность [15]); ζ – коэффициент аэродинамического сопротивления, выбор коэффициента осуществляется с учетом результатов работы [15], и для нашей методики может быть представлен в виде следующей математической функции:

$$\zeta = f(Re, G), \quad (3)$$

здесь G – критерий поверхностного подобия геометрии помольной камеры, характеризуется соотношением оптимального зазора Z между ударными элементами роторов к внутреннему размеру $D_{вн}$ наружного ротора:

$$G = \frac{Z}{D_{вн}}. \quad (4)$$

Re – автомодельный критерий Рейнольдса для нашего рассматриваемого случая. По результатам работы [16] получаем следующее выражение для числа Re в автомодельной области:

$$Re = \frac{\Omega_1 \cdot D_{вн}^2}{2\mu} \cdot \rho_\phi, \quad (5)$$

где Ω_1 – численная характеристика угловой скорости наружного ротора, $рад/с$; μ – динамический коэффициент вязкости двухфазного потока, определяемый по методике в [17], $кг/м \cdot с$. Рассчитывается Ω_1 из режимов работы агрегата для различных измельчаемых материалов и связана со скоростными параметрами вращения ротора.

Для выражения (2) важно верно определить W_n . Это параметр связан с относительной тангенциальной скоростью движения по криволинейной поверхности, которую образует наружный ротор. Относительную тангенциальную скорость движения W_n определить можно из известного выражения [18]:

$$W_n = \Omega_1 \cdot R_{б.нар}, \quad (6)$$

где $R_{б.нар}$ – радиальный размер от оси инерции наружного ротора до его внутренней цилиндрической поверхности до, $м$.

Параметр, связанный с размером площади контактной поверхности обозначим через обобщенную величину площади цилиндрической поверхности наружного ротора, которая находится внутри помольной камеры. Рассчитаем ее по уравнению [20]:

$$A_{б.н.} = 2\pi \cdot R_{б.нар} \cdot l_0, \quad (7)$$

здесь h_0 – вертикальный габарит оригинальной конструкции помольной камеры, определяется величиной высоты наружного ротора, $м$. Определить его можно как сумму геометрических параметров высот верхней и нижней частей роторов, которые образуют помольную камеру мельницы [21-22]:

$$l_0 = l_1 + l_2 + d_{диска} \approx 2,2h_3 + d_{диска}, \quad (8)$$

где $d_{диска}$ – высота диска (тарели), который входит в состав внутреннего ротора, $м$; l_1, l_2 – вертикальные длины верхней и нижней частей рабочего объема помольной камеры мельницы, $м$. Вышеуказанные параметры геометрически рассчитываются из условия, что $l_1 = l_2 \approx 1,1h_3$; h_3 – высота ударного элемента, например, круглой формы, $м$.

Теперь необходимо произвести математические преобразования выражения (2) настоящей методики, для этого модифицируем его предложенными выражениями (6) и (7). Тогда получим, что:

$$P_{б.внут.1} = \pi \cdot \Omega_1 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot l_0 \cdot R_{б.нар}^3. \quad (9)$$

Для алгебраической конфигурации отнесем высоту помольной камеры l_0 , представляющую габаритным размером внутренней поверхности наружного ротора, к размеру внутреннего диаметра $D_в$, получим соотношение в виде [23]:

$$C_1 = \frac{l_0}{D_в}. \quad (10)$$

С учетом соотношения (10) расчетное выражение (9) для определения $P_{б.внут.1}$ будет иметь вид:

$$P_{б.внут.1} = 0,125\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot D_в^4 \cdot C_1. \quad (11)$$

Для определения характеристик мощности представим момент силового фактора $P_{б.внут.1}$ для оси инерции наружного ротора в следующем виде (до множим уравнение (11) на плечо $R_{б.нар}$):

$$M_{б.внут.1} = 0,125\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot D_в^5 \cdot C_1. \quad (12)$$

Аналогичным путем можем рассчитать составляющие силовые факторы для торцевой силы трения $P_{т.внут.1}$. По представленной выше методике расчета составляющих силовых факторов для боковой и торцевой сил, действующих на поверхности контакта помольной камеры, находим силу трения $P'_{т.мп.1}$ – двухфазного потока о торцевую поверхность нижней части наружного ротора дезинтеграторной мельницы.

Представим силовой фактор трения $P'_{т.мп.1}$ двухфазного потока по аналогии с уравнением (2) в следующем виде (этот фактор оказывает воздействие на торцевую поверхность нижней плоской части наружного ротора):

$$dP'_{т.мп.1} = \frac{1}{2} \cdot \zeta \cdot \rho_\phi \cdot W_{н.ч}^2 \cdot dA'_{мп}, \quad (13)$$

где $W_{н.ч}$ – скоростная характеристика любой элементарной площадки нижней плоской части наружного ротора в его вращательном движении, $м/с$, определяется представленным выше выражением (6); $dA'_{мп}$ – бесконечно малая площадка трения воздушной фазы с частицами о нижнюю плоскую часть наружного ротора, $м^2$, в данной методике рассчитывается по аналогичному формуле (7) выражению и в интегральном виде выглядит так:

$$\int A'_{мп} = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} R dR, \quad (14)$$

здесь R – величина расстояния расположения любой элементарной поверхности нижней плоской части наружного ротора до оси его вращения, $м$.

На основании вышеизложенного для выражения (13) выполним алгебраические преобразования, после чего выражение будет иметь вид:

$$dP'_{m.mp.1} = 2\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot R^3 dR. \quad (15)$$

Выведем уравнение для определения момента силового фактора $dP'_{m.mp.1}$ относительно оси инерции нижней плоской части наружного ротора, которое нам в нашей методике будет необходимо для определения параметров мощности. Оно будет иметь следующий вид (до множим $dP'_{m.mp.1}$ на плечо R):

$$dM'_{m.mp.1} = R \cdot dP'_{m.mp.1} = 2\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot R^4 dR. \quad (16)$$

Окончательно представим выражение (16) доступное к расчетной работе с подстановками, выполненными выше, относительно всей торцевой поверхности нижней плоской части наружного ротора в виде:

$$M'_{m.mp.1} = \frac{\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot D_6^5}{80}. \quad (17)$$

Аналогичным образом в методике расчета теперь необходимо определить вторую составляющую суммарного силового фактора трения $P''_{m.mp.}$, который действует посредством оказываемым двухфазным потоком давлением в рабочем объеме камеры помола на торцевую поверхность наружного ротора и на контактные поверхности ударных элементов мельницы.

Теперь для $P''_{m.mp.}$ на основании вышеизложенной методики для удовлетворения приведенного выше равенства (2) элементарный силовой фактор трения $P''_{m.mp.1}$ потока энергоносителя с частицами измельчаемого материала, который направленно воздействует на единичный ударный элемент z -четного ряда ротора, рассчитывается по формуле:

$$dP''_{m.mp.1} = \frac{1}{2} \zeta \cdot \rho_\phi \cdot W_z^2 \cdot dA''_{mp}, \quad (18)$$

$$M''_{m.mp.1} = 0,75\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot (R_2^3 n_2 + R_4^3 n_4 + R_6^3 n_6 + R_8^3 n_8) \cdot \frac{d_3}{2} \cdot h_3. \quad (22)$$

После определения всех составляющих моментов рассчитаем обобщенный момент суммарного силового фактора трения $P_{m.mp.1}$ по выражению алгебраической суммы следующих величин:

$$\begin{aligned} \sum M_{m.mp.1} = M_{\delta,внут.1} + M'_{m.mp.1} + M''_{m.mp.1} = & (0,125\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot D_6^5 \cdot C_1) + \left(\frac{\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot D_6^5}{80} \right) + \\ & + \left(0,75\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot (R_2^3 n_2 + R_4^3 n_4 + R_6^3 n_6 + R_8^3 n_8) \cdot \frac{d_3}{2} \cdot h_3 \right). \end{aligned} \quad (23)$$

После математических преобразований (23) окончательно получим:

$$\sum M_{m.mp.1} = 0,25\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \left[\frac{D_6^5}{20} \cdot \left(1 + 5 \frac{l_0}{D_6} \right) + 1,5d_3 \cdot h_3 (R_2^3 n_2 + R_4^3 n_4 + R_6^3 n_6 + R_8^3 n_8) \right]. \quad (24)$$

где W_z – окружная скорость движения ударного элемента z -четного ряда наружного ротора, м/с, рассчитываемая по аналогии с выражением (6) настоящей методики; dA''_{mp} – бесконечно малая площадка трения двухфазного потока внутри помольной камеры о контактные поверхности ударного элемента, например, круглого поперечного сечения, z -четного ряда наружного ротора, m^2 . Данный параметр для ударного элемента можно определить из выражения:

$$dA''_{mp} = 0,75\pi \cdot \frac{d_3}{2} \cdot h_3, \quad (19)$$

d_3 – диаметр ударного элемента, например, круглой формы, м.

Теперь мы можем проинтегрировать выражение (18), после чего получим выражение для определения силы трения на условном ряду ударных элементов:

$$P''_{m.mp.1} = 0,75\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot R_z^2 \cdot \frac{d_3}{2} \cdot h_3, \quad (20)$$

где R_z – расстояние от оси установки ударных элементов z – четного ряда ротора до центра его инерции (вращения), м.

В методике важно определить четные ряды ударных элементов, которые располагаются на том или ином роторе. Эти значения необходимо ввести в выражение (20). Тогда с учетом определенного количества ударных элементов n_z в z – четном ряду, просуммировав их, окончательно получим модифицированное выражение в виде:

$$\begin{aligned} P''_{m.mp.1} = 0,75\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot (R_2^2 n_2 + R_4^2 n_4 + \\ + R_6^2 n_6 + R_8^2 n_8) \cdot \frac{d_3}{2} \cdot h_3. \end{aligned} \quad (21)$$

Для нашей методики определения мощности, потребляемой дезинтегратором на трение, при движении относительного слоя материала в помольной камере мельницы, определяем момент силы $P''_{m.mp.1}$ относительно оси инерции наружного ротора в окончательном виде:

После определения всех необходимых составляющих мощности сил трения, которая тра-

тится на преодоление взаимодействия слоя материала с поверхностями наружного ротора, можем записать выражение для $N_{mp,1}$:

$$N_{mp,1} = \sum M_{mp,1} \cdot \Omega_1 = 0,25\pi \cdot \Omega_1^3 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \left[\frac{D_6^5}{20} \cdot \left(1 + 5 \frac{l_0}{D_6} \right) + 1,5d_3 \cdot h_3 (R_2^3 n_2 + R_4^3 n_4 + R_6^3 n_6 + R_8^3 n_8) \right]. \quad (25)$$

Выражение (25) устанавливает зависимость мощности, которая тратится на трение двухфазного потока по поверхностям наружного ротора, от конструктивно-технологических характеристик помольной камеры мельницы, кинематических особенностей движения двухфазного потока в объеме оригинальной конструкции помольной камеры агрегата. Полученное выражение (25) позволяет рассчитывать оптимальные показатели работы проектируемого по данной конструктивной схеме агрегата во взаимосвязи с

конструктивными элементами мельницы и масштабировать данную конструкцию мельницы для различных измельчаемых материалов с различной необходимой производительностью по готовому продукту.

В совершенной аналогии, установленной выше, относительно выражения (1), суммарный силовой фактор трения $P_{mp,2}$, который воздействует на любую элементарную площадь поверхности внутреннего ротора, определится так:

$$\sum P_{mp,2} = \sum P_{б.внут.2} + \sum P_{т.внут.2} = P_{б.внут.2} + P'_{т.мп.2} + P''_{т.мп.2}. \quad (26)$$

Для определения боковой составляющей силы трения $P_{б.внут.2}$ на внутреннем роторе согласно рис. 4 и представленному в методике расчета выражению (9) после соответствующих математических преобразований будем иметь:

$$P_{б.внут.2} = \pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot R_m^3 \cdot d_m, \quad (27)$$

где Ω_2 – угловая характеристика скорости вращения внутреннего ротора в помольной камере мельницы, рад/с; d_m – диаметр тарели внутреннего ротора мельницы, м; R_m – радиус центральной тарелки внутреннего ротора дезинтеграторной мельницы, м.

Для упрощения математических выражений выразим высоту тарели внутреннего ротора тарели внутреннего ротора $H_{тарели}$ через диаметральный размер тарели D_m , обозначив все это через:

$$C_2 = \frac{H_{тарели}}{D_m}. \quad (28)$$

После преобразований выражение (27) по аналогии с (11) будет выглядеть так:

$$dM'_{т.мп.2} = dP'_{т.мп.2} \cdot R_i = 2\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot R_m^4 dR_i, \quad (32)$$

где R_i – плечо элементарной силы трения $dP'_{т.мп.2}$, полученной в выражении (31), от точки приложения нагрузки до оси вращения внутреннего ротора, м.

Проинтегрируем выражение (32), тогда получим, что момент $M'_{т.мп.2}$ учтенной торцевой площади поверхности тарели внутреннего ротора по аналогии с методикой получения выражения (17) будет равен:

$$M'_{т.мп.2} = 0,0125\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot D_m^5. \quad (33)$$

$$P_{б.внут.2} = 0,125\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot D_m^4 \cdot C_2. \quad (29)$$

В соответствии с вышеуказанной методикой момент силы трения $P_{б.внут.2}$ относительно оси инерции внутреннего ротора определяется из аналогичного (12) выражения:

$$M_{б.внут.2} = 0,0625\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot D_m^5 \cdot C_2. \quad (30)$$

По такой же аналогии с выражениями (13 - 14) элементарная сила трения двухфазного потока, оказывающая воздействие на элементарную торцевую площадь поверхности тарели внутреннего ротора дезинтеграторной мельницы, по выражению (2) представленной методики запишется так:

$$dP'_{т.мп.2} = 2\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot R_m^3 dR. \quad (31)$$

Нам для расчетов необходимо определить момент силового фактора $P'_{т.мп.2}$ относительно оси инерции вращающейся тарели внешнего ротора. Делаем это по аналогии с выражением (16):

Для выражения (26) рассчитать вторую составляющую суммарного силового фактора трения $P''_{т.мп.2}$, действующего на торцевую площадь поверхности тарели внутреннего ротора возможно исходя из выражений (18 - 19). Тогда получим, что:

$$P''_{т.мп.2} = 0,75\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot L_u^2 \cdot \frac{d_2}{2} \cdot h_3, \quad (34)$$

где L_n – длина спирали по ее дуге от первого ударного элемента до конечного, м. По такой спирали

располагаются на роторе только ударные элементы u -нечетных рядов. Для этого параметра важно отметить, что длина дуги спирали L_n находится в функциональной зависимости с радиусом ее кривизны [24-25].

$$P''_{m,mp,2} = 0,75\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot \frac{d_2}{2} \cdot h_2 \cdot (L_1^2 m_1 + L_3^2 m_3 + L_5^2 m_5 + L_7^2 m_7). \quad (35)$$

Момент силового фактора $P''_{m,mp,2}$ для оси инерции внутреннего ротора запишется в виде:

$$M''_{m,mp,2} = 0,75\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot \frac{d_2}{2} \cdot h_2 \cdot (L_1^3 m_1 + L_3^3 m_3 + L_5^3 m_5 + L_7^3 m_7). \quad (36)$$

Значит суммарный момент обобщенного силового фактора трения $P_{mp,2}$ представится в виде суммы:

$$\sum M_{mp,2} = M_{б.внут,2} + M'_{m,mp,2} + M''_{m,mp,2} = (0,0625\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot D_m^5 \cdot C_2) + (0,0125\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot D_m^5) + \left(0,75\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \cdot \frac{d_2}{2} \cdot h_2 \cdot (L_1^3 m_1 + L_3^3 m_3 + L_5^3 m_5 + L_7^3 m_7)\right). \quad (37)$$

Аналитически преобразуем уравнение (37), получаем:

$$\sum M_{mp,2} = 0,25\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \left[\frac{D_m^5}{20} \cdot \left(1 + 5 \frac{H_{марелу}}{D_m}\right) + 1,5d_2 \cdot h_2 (L_1^3 z_1 + L_3^3 z_3 + L_5^3 z_5 + L_7^3 z_7) \right]. \quad (38)$$

Определим величину мощности, которая расходуется мельницей на трение при движении

Теперь нам необходимо определить для выражения (34) через введение в него количества ударных элементов m_z в u – нечетных рядах величину $P''_{m,mp,2}$:

относительного слоя материала по рабочим поверхностям внутреннего ротора по обобщенной формуле:

$$N_{mp,2} = \sum M_{mp,2} \cdot \Omega_2 = 0,25\pi \cdot \Omega_2^3 \cdot \rho_\phi \cdot \zeta \left[\frac{D_m^5}{20} \cdot \left(1 + 5 \frac{H_{марелу}}{D_m}\right) + 1,5d_2 \cdot h_2 (L_1^3 z_1 + L_3^3 z_3 + L_5^3 z_5 + L_7^3 z_7) \right]. \quad (39)$$

Результатом аналитических исследований стала разработанная методика определения величины мощности для оригинальной конструкции мельницы дезинтеграторного типа, расходуемой на трение при движении относительного слоя материала по рабочим поверхностям помольной камеры мельницы в отдельности для каждого ротора. Представленные в настоящей методике выражения (25) и (39) получены аналитически и способствуют отражению численных результатов расчета параметров мощностей трения, которые вызываются двухфазным потоком внутри камеры в результате трения о ее контактные рабочие поверхности. Представленные в методике окончательные выражения (25) и (39) помогают численно рассчитать величину мощности каждого из роторов дезинтегратора, которая затрачивается им на сопротивление всевозможным силовым характеристикам трения во время движения двухфазного потока внутри оригинальной конструкции помольной камеры агрегата.

Аналитические выражения (25) и (39) показывают свою зависимость не только от конструктивно-технологических параметров работы мельницы, но и устанавливают определенную связь в зависимости от физико-механических характеристик двухфазного потока и его кинематических параметров.

Графическая интерпретация численных расчетов мощностей роторов $N_{mp,1}$ и $N_{mp,2}$ в зависимости от угловой скорости вращения каждого из них показана на рис. 5. Величины моментов трения $M_{mp,1}$ и $M_{mp,2}$, полученных в выражениях (24) и (38) соответственно, определяют особенности контакта двухфазного потока с поверхностями помольной камеры: это зависит и от профиля ударных элементов, и от аэродинамического сопротивления объема помольной камеры; при этом существенное влияние на момент трения каждого из роторов оказывает геометрия расположения ударных элементов и кинематические параметры двухфазного потока.

Методика определения мощностей трения для наружного и внутреннего роторов отработана и графически представлена на рис. 5. По предложенной методике произведен численный расчет всех параметров, учтенных при ее разработке.

В соответствии с функциональной зависимостью, показанной на рис. 5, анализ параметров мощности трения настоящей методики численно показывает, что для наружного ротора мощность трения – $N_{mp,1}$ составляет 1425 Вт - при $\Omega_1 = 628$ рад/с (соответствует частоте вращения ротора $n_1 = 6000$ мин⁻¹); максимальное значение для

внутреннего ротора мощность трения – $N_{тр.2}$ составляет 1020 Вт – при также $\Omega_2 = 628$ рад/с (соответствует частоте вращения ротора $n_1 = 6000$ мин⁻¹). Зависимость мощности трения от угловой

скорости вращения роторов – линейная. Это связано с различными величинами $M_{тр.1}$ и $M_{тр.2}$, а также с линейно меняющейся угловой скоростью вращения роторов.

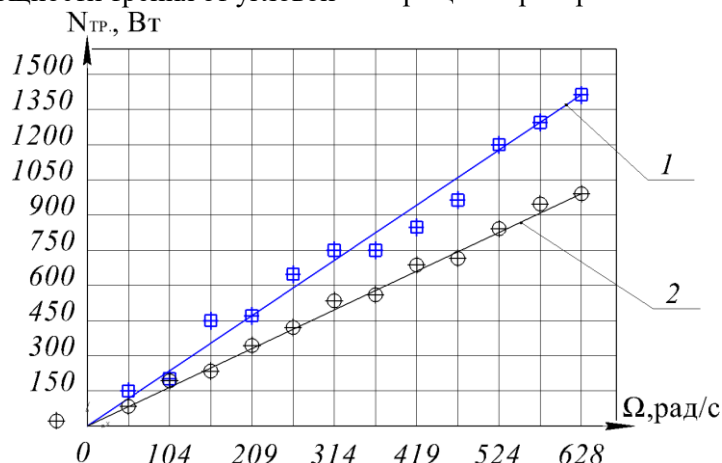


Рис. 5. Аппроксимированные функциональные зависимости потребляемой дезинтегратором мощности трения $N_{тр.}$ от угловой скорости вращения Ω его роторов: 1 – $N_{тр.1}$, Вт; 2 – $N_{тр.2}$, Вт.

Выводы. В результате аналитических исследований разработана и предложена к использованию методика определения величины мощности для оригинальной конструкции мельницы дезинтеграторного типа, расходуемой на трение при движении относительного слоя материала по рабочим поверхностям помольной камеры мельницы в отдельности для каждого ротора. Обозначены и выделены основные конструктивные параметры камеры помола мельницы, которые влияют на формирование показателя мощности мельницы, расходуемой ею на сопротивление трению двухфазного потока по основным поверхностям камеры помола дезинтегратора. Математически установлено, что конструктивные и технологические параметры оригинальной конструкции помольной камеры мельницы, ее скоростные режимы вращения роторов, а также кинематические параметры двухфазного потока находятся во взаимосвязи с энергетическими показателями ее работы. Представлены графические зависимости мощностей, потребляемых роторами дезинтеграторной мельницы на трение, от скоростных параметров вращения роторов при фиксированных значениях конструктивных параметров.

На основании проведенного анализа расчета параметров мощностей, расходуемых дезинтегратором на трение материала о рабочие поверхности его помольной камеры, рекомендовано использовать представленный подход для расчета аналогичных показателей мощности и для других конструктивных решений роторных мельниц. Использование данной методики расчета в прогнозе продолжительности работы мельницы дезинтеграторного типа позволит сократить износ

рабочих поверхностей помольной камеры, тем самым, повысив надежность агрегата при его эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дружинина Т.Я., Гронь В.А. Факторы абразивного износа и методы повышения износостойкости элементов футеровки барабанных мельниц // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 4(48). С. 60–65.
2. Бальмонт Т.М., Гуюмджян П.П., Бальмонт Д.С. Износ ударных элементов ступенчатой мельницы // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2009. № 1. С. 57–60.
3. Шаталов А.В., Тимофеев В.А., Шаталов В.А. Определение основных параметров процесса измельчения в помольном комплексе ПВИ-БМ // Наукоемкие технологии и инновации: электронный сборник научных докладов Международной научно-практической конференции, Белгород, 06–07 октября 2016 года. Том Часть 4. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. С. 259–262.
4. Качаев А.Е., Севостьянов В.С., Королев И.Г. Дезинтегатор с ударно-сдвиговым воздействием на измельчаемый материал // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. № 1. С. 102–105.
5. Семикопенко И.А., Воронов В.П., Пензев П.П. Дезинтегатор с эффективной камерой помола // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 8(620). С. 83–88.

6. Гольшев Л.В., Мысак И.С. Определение потерь металла из-за износа шаров и брони барабана шаровой барабанной мельницы // Энергетик. 2008. № 4. С. 35–36.
7. Сиваченко Л.А., Моисеенко А.Б., Шаройкина Е.А. Создание рессорно-стержневых технологических аппаратов на основе интенсификации контактных взаимодействий их рабочих элементов // Материалы, технологии, инструменты. 2009. Т. 14, № 3. С. 115–119.
8. Пат. № 2377070. МПК7 В 02 С 13/22. Дезинтегратор // Гридчин А.М., Севостьянов В.С., Глаголев Е.С., Качаев А.Е. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», ООО «ТК-РЕЦИКЛ». №2008118079/03. Заявл. 06.05. 2008; опубл. 27.12.2009.
9. Севостьянов В.С., Качаев А.Е., Бойчук И.П., Кузнецова И.А. Теоретические исследования процессов в роторной мельнице с комбинированным воздействием на измельчаемый материал // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 9. С. 122–129. DOI: 10.12737/article_59a93b0aa409c9.96285097.
10. Пестренин В.М., Пестренина И.В., Ландик Л.В. Плоские нестандартные задачи для составного клина, одна из образующих которого скользит без трения вдоль жесткой поверхности // Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015), Алушта, 24–31 мая 2015 года. Алушта: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2015. С. 321–323.
11. Лаптев А.Г., Фарахов Т.М. Модели трения в турбулентных потоках при обтекании различных поверхностей // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 23. С. 82–86.
12. Сергеев Н.В., Лактионов Р.Е. Теоретические исследования изменения коэффициента трения при взаимодействии контактирующих поверхностей с добавкой АРВК // Евразийское Научное Объединение. 2021. № 1-2(71). С. 125–129.
13. Веттегрень В.И., Пономарев А.В., Соболев Г.А. Изменение строения поверхности гетерогенного нанокристаллического тела (песчаника) при трении // Физика твердого тела. 2017. Т. 59, № 3. С. 569–574. DOI: 10.21883/FTT.2017.03.44172.319.
14. Гарабажиу А.А., Левданский А.Э. Аэродинамика движения частиц измельчаемого материала в рабочей камере роторно-центробежной мельницы // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 3. Химия и технология неорганических веществ. 1999. № 7. С. 15–27.
15. Турубаев Р.Р., Шваб А.В. Моделирование аэродинамики закрученного турбулентного течения и процесса классификации частиц в вихревой камере. //Инженерно-физический журнал. 2022. Т. 95, № 5. С. 1248–1256.
16. Шиляев М.И., Шиляев А.М. Моделирование процесса пылеулавливания в прямооточном циклоне. 1. Аэродинамика и коэффициент диффузии частиц в циклонной камере // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 2. С. 157–170.
17. Шваб А.В., Евсеев Н. С. Исследование аэродинамики турбулентного закрученного течения в центробежном аппарате. // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 7-2. С. 144–148.
18. Дмитриева Е.В., Плешивцев В. С. Учебное пособие по физике. Механика. Владим. гос. ун-т. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. 144 с.
19. Orekhova T.N., Nosov O.A., Prokopenko V.S., Kachaev A.E. Complex modeling of technological processes in pneumatic mixers for production of dry construction mixtures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. 022084. DOI 10.1088/1757-899X/327/2/022084.
20. Сафрай В.М. Справочник по высшей математике: с примерами решения задач: для студентов вузов. Москва: Элит, 2004. 356 с.
21. Боровский Д.Н., Сенько Р.А., Гребенчук П.С. Моделирование аэродинамики в центробежно-шаровой мельнице с классификационной камерой // Горная механика и машиностроение. 2022. № 3. С. 89–94.
22. Ханин С.И., Мордовская О.С., Ханина Е.Г. Технологические возможности повышения эффективности работы шаровых мельниц. // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник научных статей / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Том XVI.: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2017. С. 279–282.
23. Митрофанов О.В. Актуальные задачи и основные соотношения для исследований композитных панелей несимметричной структуры с учетом геометрической нелинейности // Естественные и технические науки. 2021. № 2(153). С. 140–144. DOI 10.25633/ETN.2021.02.06
24. Яблонев А. Л. Расчет длины дуги контакта деформированного пневматического колеса с торфяной залежью и площади их контакта

// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 9. С. 45–47.

25. Анахаев К.Н., Амшонов Б.Х., Анахаев К.К. К расчету длины геофизических объектов

гиперболического очертания // Природообустройство. 2021. № 4. С. 85–89. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-4-85-89

Информация об авторах

Качаев Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительного производства. E-mail: doctor_cement@mail.ru. Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета. Россия, 140402, Московская область, г. Коломна, ул. Октябрьской революции, дом 408.

Севостьянов Владимир Семенович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: tkmm@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 12.07.2024 г.

© Качаев А.Е., Севостьянов В.С., 2024

¹Kachaev A.E., ²Sevostyanov V.S.

¹Kolomna Institute (branch) of Moscow Polytechnic University,

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

*E-mail: doctor_cement@mail.ru

CALCULATION OF THE POWER CONSUMED BY THE DISINTEGRATOR FOR FRICTION WHEN MOVEMENT OF THE RELATIVE LAYER OF MATERIAL IN THE GRINDING CHAMBER OF THE MILL

Abstract. Theoretical research in the field of calculating the power parameters of disintegrator-type mills is relevant. This is due to the need for their engineering justification for subsequent comparison with the results of experimental studies of grinders of a similar class. In the process of developing a methodology for calculating the power consumed by the disintegrator for friction during the movement of a relative layer of material inside the grinding chamber, direct mathematical modeling methods were used to determine the power and energy parameters of the unit. Mathematical modeling of the process of friction of a relative layer of material on the working surfaces of the grinding chamber was carried out on the basis of well-known studies on friction. A method for calculating the power consumed by a disintegrator for friction during the movement of a relative layer of material in the grinding chamber of a mill is proposed. The main design parameters that influence the formation of the mill power indicator, consumed by it for friction of the material against the working surfaces of the grinding chamber, have been determined. A mathematical relationship has been established between the design and technological parameters of the grinding chamber of the mill and the speed modes of rotation of the rotors with the energy indicators of the operation of the disintegrator mill. Graphical dependences of the powers consumed by the rotors of a disintegrator mill for friction on the speed parameters of rotation of the rotors at fixed values of design parameters are presented. Based on the analysis of the calculation of power parameters consumed by the disintegrator for friction of the material against the working surfaces of its grinding chamber, it is recommended to use the presented approach to calculate similar power indicators for other design solutions of rotary mills. The use of this calculation method in predicting the operating time of a disintegrator-type mill will reduce wear on the working surfaces of the grinding chamber, thereby increasing the reliability of the unit's operation.

Keywords: disintegrator mill, power, friction, grinding chamber, friction moment, rotor.

REFERENCES

1. Druzhinina T.Ya., Gron V.A. Factors of abrasive wear and methods for increasing the wear resistance of lining elements of drum mills [Faktoy abrazivnogo iznosa i metody povysheniya iznosostoykosti elementov futerovki barabannykh mel'nits]. Modern technologies. System analysis. Modeling. 2015. No. 4(48). Pp. 60–65. (rus)

2. Balmont T.M., Guyumdzhyan P.P., Balmont D.S. Wear of impact elements of a step mill [Iznos udarnykh elementov stupenchatoy mel'nitsy]. Modern high-tech technologies. Regional application. 2009. No. 1. Pp. 57–60. (rus)

3. Shatalov A.V., Timofeev V.A., Shatalov V.A. Determination of the main parameters of the grinding process in the PVI-BM grinding complex

[Opredeleniye osnovnykh parametrov protsessa izmel'cheniya v pomol'nom komplekse PVI-BM]. High-tech technologies and innovations: electronic collection of scientific reports of the International Scientific and Practical Conference. Vol. Part 4. Belgorod: Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. 2016. Pp. 259–262. (rus)

4. Kachaev A.E., Sevostyanov V.S., Korolev I.G. Disintegrator with shock-shear action on the crushed material [Dezintegrator s udarno-sdvigovym vozdeystviyem na izmel'chayemyy material]. Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhova. 2010. No. 1. Pp. 102–105. (rus)

5. Semikopenko I. A., Voronov V. P., Penzev P. P. Disintegrator with an effective grinding chamber [Dezintegrator s effektivnoy kameroy pomola]. News of higher educational institutions. Construction. 2010. No. 8(620). Pp. 83–88. (rus)

6. Golyshev L.V., Mysak I.S. Determination of metal losses due to wear of balls and drum armor of a ball drum mill [Opredeleniye poter' metalla iz-za iznosa sharov i broni barabana sharovoy barabannoy mel'nitsy]. Energetik. 2008. No. 4. Pp. 35–36. (rus)

7. Sivachenko L.A., Moiseenko A.B., Sharoykina E.A. Creation of spring-rod technological devices based on the intensification of contact interactions of their working elements [Sozdaniye resorno-sterzhnevnykh tekhnologicheskikh apparatov na osnove intensivatsii kontaktnykh vzaimodeystviy ikh rabochikh elementov]. Materials, technologies, tools. 2009. Vol. 14, No. 3. Pp. 115–119. (rus)

8. Gridchin A.M., Sevost'yanov V.S., Glagolev E.S., Kachaev A.E. Disintegrator. Patent RF, no. 2377070, 2009. (rus)

9. Sevostyanov V.S., Kachaev A.E., Boychuk I.P., Kuznetsova I.A. Theoretical studies of processes in a rotary mill with a combined effect on the crushed material [Teoreticheskiye issledovaniya protsessov v rotornoy mel'nitse s kombinirovannym vozdeystviyem na izmel'chayemyy material]. Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhova. 2017. No. 9. Pp. 122–129. DOI: 10.12737/article_59a93b0aa409c9.96285097. (rus)

10. Pestrenin V.M., Pestrenina I.V., Landik L.V. Plane non-standard problems for a composite wedge, one of the generatrices of which slides without friction along a rigid surface [Ploskiye nestandartnyye zadachi dlya sostavnogo klina, odna iz obrazuyushchikh kotorogo skol'zit bez treniya vdol' zhestkoy poverkhnosti]. Proceedings of the XIX International Conference on Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems (VMSPPS' 2015), Alushta, May 24–31, 2015. Alushta: Moscow Aviation Institute (National Research University), 2015, Pp. 321–323. (rus)

11. Laptev A.G., Farakhov T.M. Models of friction in turbulent flows around various surfaces [Modeli treniya v turbulentnykh potokakh pri obtekanii razlichnykh poverkhnostey]. Bulletin of the Kazan Technological University. 2013. Vol. 16. No. 23. Pp. 82–86. (rus)

12. Sergeev N.V., Laktionov R.E. Theoretical studies of changes in the coefficient of friction during the interaction of contacting surfaces with the ARVK additive [Teoreticheskiye issledovaniya izmeneniya koeffitsiyenta treniya pri vzaimodeystvii kontaktiruyushchikh poverkhnostey s dobavkoy ARVK]. Eurasian Scientific Association. 2021. No. 1-2(71). Pp. 125–129. (rus)

13. Vettegren V.I., Ponomarev A.V., Sobolev G.A. Change in the structure of the surface of a heterogeneous nanocrystalline body (sandstone) during friction [Izmeneniye stroyeniya poverkhnosti geterogennogo nanokristallicheskogo tela (peschanika) pri trenii]. Solid State Physics. 2017. Vol. 59. No. 3. Pp. 569–574. DOI 10.21883/FTT.2017.03.44172.319. (rus)

14. Garabazhiu A.A., Levdansky A.E. Aerodynamics of the movement of particles of crushed material in the working chamber of a rotary centrifugal mill [Aerodinamika dvizheniya chastits izmel'chayemogo materiala v rabochey kamere rotorno-tsentrifugalnoy mel'nitsy]. Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series No 3. Chemistry and technology of inorganic substances. 1999. No. 7. Pp. 15–27. (rus)

15. Turubaev R.R., Shvab A.V. Modeling the aerodynamics of swirling turbulent flow and the process of particle classification in a vortex chamber [Modelirovaniye aerodinamiki zakruchennogo turbulentnogo techeniya i protsessa klassifikatsii chastits v vikhrevoy kamere]. Engineering and Physical Journal. 2022. Vol. 95. No. 5. Pp. 1248–1256. (rus)

16. TShilyaev M.I., Shilyaev A.M. Modeling of the dust collection process in a direct-flow cyclone. 1. Aerodynamics and particle diffusion coefficient in a cyclone chamber [Modelirovaniye protsessa pyleulavlivaniya v pryamotochnom tsiklone. 1. Aerodinamika i koeffitsiyent diffuzii chastits v tsiklonnoy kamere.] Thermophysics and aeromechanics. 2003. Vol. 10. No. 2. Pp. 157–170. (rus)

17. Shvab A.V., Evseev N.S. Study of the aerodynamics of turbulent swirling flow in a centrifugal apparatus [Issledovaniye aerodinamiki turbulentnogo zakruchennogo potoka v tsentrifugalnom apparate]. News of universities. Physics. 2012. Vol. 55. No. 7-2. Pp. 144–148. (rus)

18. Dmitrieva E.V., Pleshivtsev V.S. Textbook on physics. Mechanics [Uchebnoye posobiye po fizike. Mekhanika]. Vladim. state u-nt. Vladimir: Vladim Publishing House. state Univ. 2009. 144 p. (rus)

19. Orekhova T.N., Nosov O.A., Prokopenko V. S., Kachaev A. E. Complex modeling of technological processes in pneumatic mixers for production of dry construction mixtures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. 022084. DOI 10.1088/1757-899X/327/2/022084.

20. Safray V.M. Handbook of higher mathematics: with examples of problem solving: for university students [Spravochnik po vysshey matematike: s primerami resheniya zadach: dlya studentov vuzov]. Moscow: Elit. 2004. 356 p. (rus)

21. Borovsky D.N., Senko R.A., Grebenchuk P.S. Modeling of aerodynamics in a centrifugal ball mill with a classification chamber [Modelirovaniye aerodinamiki v tsentrobezhno-sharovoy mel'nitse s klassifikatsionnoy kameroy]. Mining mechanics and mechanical engineering. 2022. No. 3. Pp. 89–94. (rus)

22. Khanin S.I., Mordovskaya O.S., Khanina E.G. Technological possibilities for increasing the efficiency of ball mills [ekhnologicheskkiye vozmozhnosti povysheniya effektivnosti raboty sharovykh mel'nits]. Energy-saving technological complexes and equipment for the production of building materials: Interuniversity collection of scientific articles. Belgorod State Technological University.

V.G. Shukhova. Volume XVI.: Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova, 2017. Pp. 279–282. (rus)

23. Mitrofanov O.V. Current problems and basic relationships for studying composite panels of asymmetric structure taking into account geometric nonlinearity [Aktual'nyye zadachi i osnovnyye sootnosheniya dlya issledovaniy kompozitnykh paneley nesimmetrichnoy struktury s uchetom geometricheskoy nelineynosti]. Natural and technical sciences. 2021. No. 2(153). Pp. 140–144. DOI 10.25633/ETN.2021.02.06. (rus)

24. Yablonev A.L. Calculation of the length of the arc of contact of a deformed pneumatic wheel with a peat deposit and the area of their contact [Raschet dliny dugi kontakta deformirovannogo pnevmaticheskogo kolesa s torfyanoy zalezhu i ploshchadi ikh kontakta]. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2010. No. 9. Pp. 45–47. (rus)

25. Anakhaev K.N., Amshokov B.Kh., Anakhaev K.K. Towards the calculation of the length of geophysical objects of hyperbolic outline [K raschetu dliny geofizicheskikh ob'yektov giperbolicheskogo ochertaniya]. Nature Management. 2021. No. 4. Pp. 85–89. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-4-85-89. (rus)

Information about the author

Kachaev, Aleksandr E. PhD, Head of the Department of Construction Production. E-mail: doctor_cement@mail.ru. Kolomna Institute (branch) of Moscow Polytechnic University. Russia, 140402, Moscow region, Kolomna, st. October Revolution, building 408.

Sevostyanov, Vladimir S. Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technological Complexes, Machines and Mechanisms. E-mail: tkmm@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 12.07.2024

Для цитирования:

Качаев А.Е., Севостьянов В.С. Расчет мощности, потребляемой дезинтегратором на трение, при движении относительного слоя материала в помольной камере мельницы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 12. С. 93–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-93-105

For citation:

Kachaev A.E., Sevostyanov V.S. Calculation of the power consumed by the disintegrator for friction when movement of the relative layer of material in the grinding chamber of the mill. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 93–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-93-105

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Аннотация. Статья посвящена проблеме утилизации изношенных автомобильных шин и резинотехнических изделий (РТИ), что представляет собой серьезную экологическую угрозу. В условиях увеличения числа автомобилей в России и, соответственно, роста отходов, особенно шин, необходимы эффективные методы их переработки.

В статье описывается процесс удаления бортового кольца из шин различных. В процессе проведения эксперимента была изучена эффективность извлечения бортового металлического кольца из резиновой оболочки грузовых и крупногабаритных шин с использованием специализированного гидравлического оборудования. Эксперимент был направлен на определение необходимого усилия для извлечения бортового кольца, что является ключевым этапом в переработке использованных шин. Проведённые эксперименты позволили установить зависимости между усилием, необходимым для извлечения бортового кольца, и его характеристиками.

Полученные данные могут быть использованы для разработки более эффективных методов переработки и создания оборудования, которое позволит оптимизировать процесс утилизации. Результаты демонстрируют, что значительная часть усилия расходуется на преодоление адгезии между металлической проволокой и резиновой оболочкой, что важно учитывать при разработке оборудования для переработки. Выводы исследования подчеркивают необходимость улучшения технологий переработки шин и их более безопасной утилизации.

Ключевые слова: утилизация резино-технических изделий (РТИ), переработка шин, крупногабаритные шины (КГШ).

Введение. В условиях стремительного развития автомобильной промышленности и увеличения числа транспортных средств по всему миру наблюдается экспоненциальный рост объёма отходов, включая изношенные шины и резинотехнические изделия (далее - РТИ). Отработанные покрышки и другие резиновые изделия чаще всего попадают не на перерабатывающие предприятия, а на свалки, где они занимают значительное пространство и могут привести к загрязнению почвы и водных ресурсов, нанося ущерб природе [1-5].

В соответствии с Федеральным классификационным каталогом отходов [6], использованные шины относятся к IV классу опасности – малоопасные. Данный тип отходов после загрязнения окружающей среды требует короткого срока восстановления, но при больших объемах и длительном хранении, существует риск возгорания отработанных покрышек. Вещества, которые выделяются при горении резиновых изделий, принадлежат к I и II классу опасности. Они могут причинить серьезный вред здоровью человека и окружающей среде.

По исследованию Невядомской А.И. [7] к 2015 году, количество отработанных шин достигало порядка 900 тысяч тонн в год (рис. 1). Примерно половина из них является шинами со зна-

чительными габаритами: грузовые, шины специального назначения и крупногабаритные шины. В 2022 году в России объём резинотехнических отходов, включая использованные шины, оставался значительным, с общим объёмом, превышающим 1 миллион тонн в год. По данным Росприроднадзора, шины и другие резинотехнические изделия образуют значительную долю отходов IV класса опасности.

В Российской Федерации обращение с отходами, включая переработку использованных шин, регулируется рядом нормативно-правовых актов. В соответствии с Федеральным законом № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» [9] деятельность по сбору, транспортировке, обработке, утилизации, обезвреживанию и размещению отходов I-IV классов опасности подлежит лицензированию. Этот закон устанавливает определенные требования к хранению, утилизации и транспортированию отходов и к лицам, осуществляющим данную деятельность.

К основным методам утилизации резинотехнических изделий относят пиролиз, сжигание, регенерацию резины и механическая переработка. Каждый из этих методов имеет свои плюсы и минусы, и выбор конкретного способа зависит от экономической целесообразности, доступных технологий и экологических стандартов. Меха-

ническая переработка резинотехнических изделий (РТИ) в резиновую крошку пользуется популярностью среди предпринимателей благодаря её технологической и экономической выгоде. Это

связано с наличием широкого спектра оборудования в различных ценовых сегментах. Количество необходимого оборудования может варьироваться в зависимости от состава, типоразмера и конструкции шины [10–12].

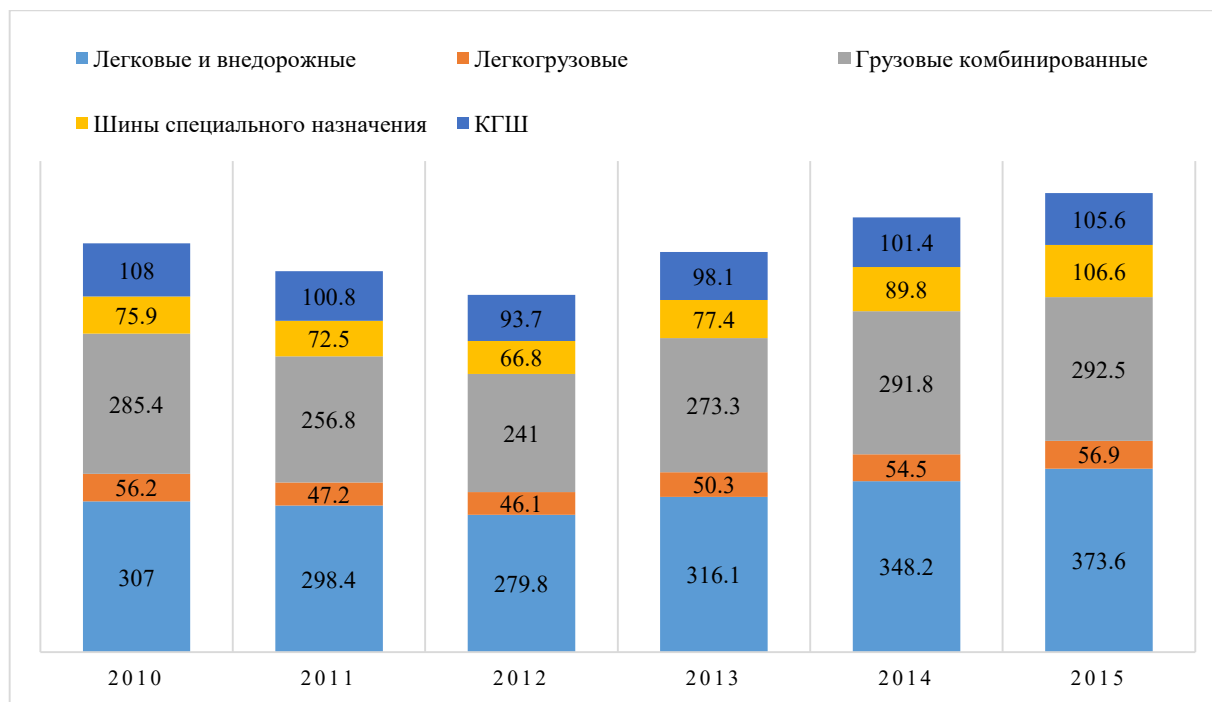


Рис. 1. Общий объем отработанных шин в РФ за 2010–2015 гг., тыс. тонн. [7]

Размер и эксплуатационные параметры шины влияют на состав её компонентов. Чем больше шина, тем меньше металла в её составе и больше резины и текстиля. Легковые и небольшие грузовые шины, как правило, оснащены цельнометаллическим кордом и бортовым кольцом, которое соответствует диаметру проволоки корда. Это позволяет измельчать их в один этап без предварительной обработки, отправляя шину сразу на измельчение, где происходит разделение на резиновую крошку и металлолом [13].

Для утилизации грузовых и крупногабаритных шин путем переработки, такой как механическое измельчение или термическое разложение, необходима предварительная обработка. В зависимости от размера шины – это может включать нарезание на чипсы и/или удаление бортового кольца. Удаление бортового кольца обычно осуществляется с помощью специального оборудования, которое извлекает металлическую проволоку из борта покрышки [14].

Основная часть. Процесс удаления бортового кольца схематично можно разложить на несколько составляющих, показанных на рис. 2. Колесо 3 поступает в рабочее пространство оборудования и вешается на крюк 1. Рабочее движение начинается с захвата крюком 1 бортового кольца 4, после чего резиновый борт колеса 5

упирается в мишень 2 (рис. 2, а). После достижения силы, необходимой для извлечения бортового кольца, крюк 1 постепенно вытягивает бортовое кольцо 4 (рисунок 2, б) через мишень оборудования. Рабочий цикл заканчивается при полном извлечении бортового колеса из борта покрышки.

Важной характеристикой, от которой зависят габариты и масса конструкции, а также электродвигатель или насосная станция оборудования для извлечения бортового кольца, является усилие необходимое для извлечения бортового кольца.

В начале работы установки возникает пик усилия, необходимого для извлечения бортового кольца. При удалении бортового кольца из слоя с одинаковой площадью, разрезаемой резиновой оболочки рабочее усилие выравнивается. Далее рабочее усилие постепенно возрастает в процессе удаления и на окончательной стадии после полного удаления бортового кольца резко падает до значений холостого хода. [15]

Для определения необходимого усилия для извлечения бортового кольца из борта грузовых и крупногабаритных шин, был проведен промышленный эксперимент с применением специализированного гидравлического оборудования. В качестве устройства для измерения давления в рабочей полости гидроцилиндра использовался

манометр ДМ02-100-1-М Кл 1.5, устанавливается на входе масла в гидроцилиндр. Диапазон показаний 0–250 кгс/см² (0–25 МПа), погрешность измерения $1,5 \pm 1,5$ кгс/см². Гидроцилиндр имеет внутренний диаметр $D=190$ мм и диаметр

штока $d=140$ мм. Подробное описание конструкции и методики сбора данных описаны в [15].

Эксперимент проводился с использованием 11 различных типоразмеров грузовых и крупногабаритных шин, характеристики которых приведены в таблице 1.

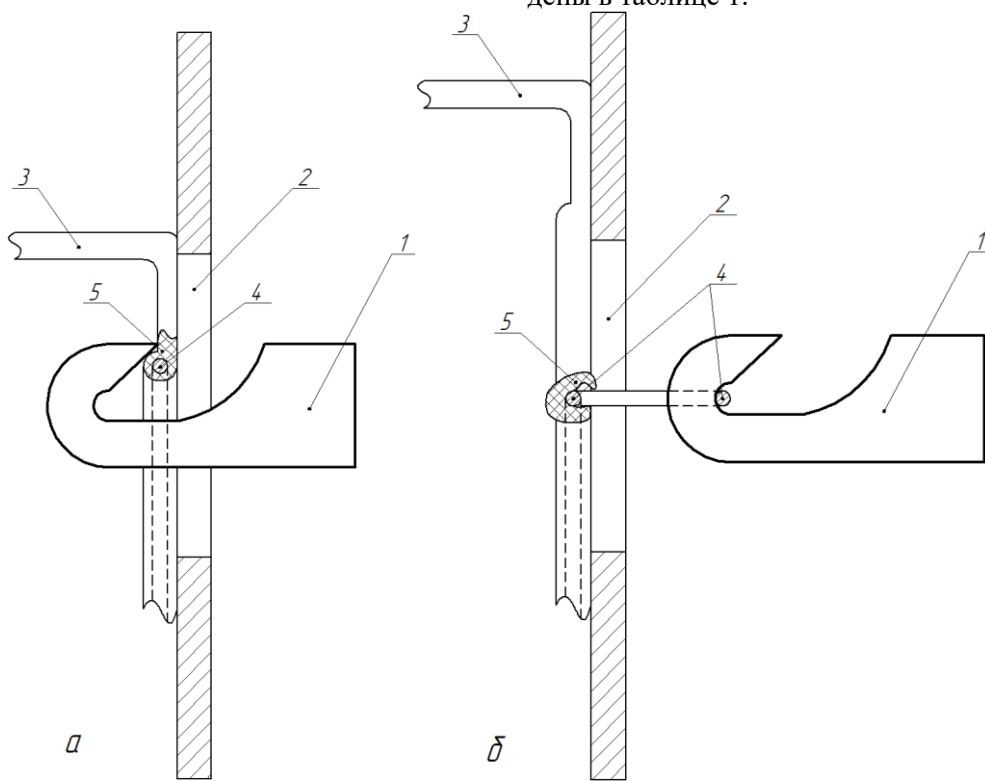


Рис. 2. Процесс выдергивания бортового кольца из шины

Таблица 1

Характеристики утилизируемых шин

№	Шина	Внешний диаметр, мм	Посадочный диаметр шины, мм	Площадь бортового кольца, мм ²	P_{max} , кгс/см ²	Макс. сила извлечения, кН	Кол-во дублир. опытов, шт
1	265/70 R19.5	871	495,3	208	147,5	187,470	2
2	385/55 R22.5	997	571,5	223	150	190,647	2
3	315/70 R22.5	1024	571,5	218	155	197,002	4
4	11 R22.5	1062	571,5	207	152,5	193,825	4
5	385/65 R22.5	1078	571,5	234	153,75	195,414	4
6	315/80 R22.5	1080	571,5	420	170	216,067	2
7	11.00 R20	1082	508	198	150	190,647	2
8	360/70 R24	1154	609,6	222	145	184,292	2
9	14.00-20 Я-307	1220	508	455	190	241,487	1
10	17.5 – 25 L-3	1350	635	357	132,5	168,405	2
11	18.4 - 26	1425	660,4	362	142,5	181,115	2

Исследуемые шины можно условно разделить на 3 группы по величине максимальной силы извлечения. 1я группа: диапазон 180 кН – 200 кН; 2я группа: свыше 200 кН; к 3ей группе

относятся шины № 10 и № 11 с надрезом бортовой части по диаметру бортового кольца, максимальная сила извлечения: 165 кН – 185 кН.

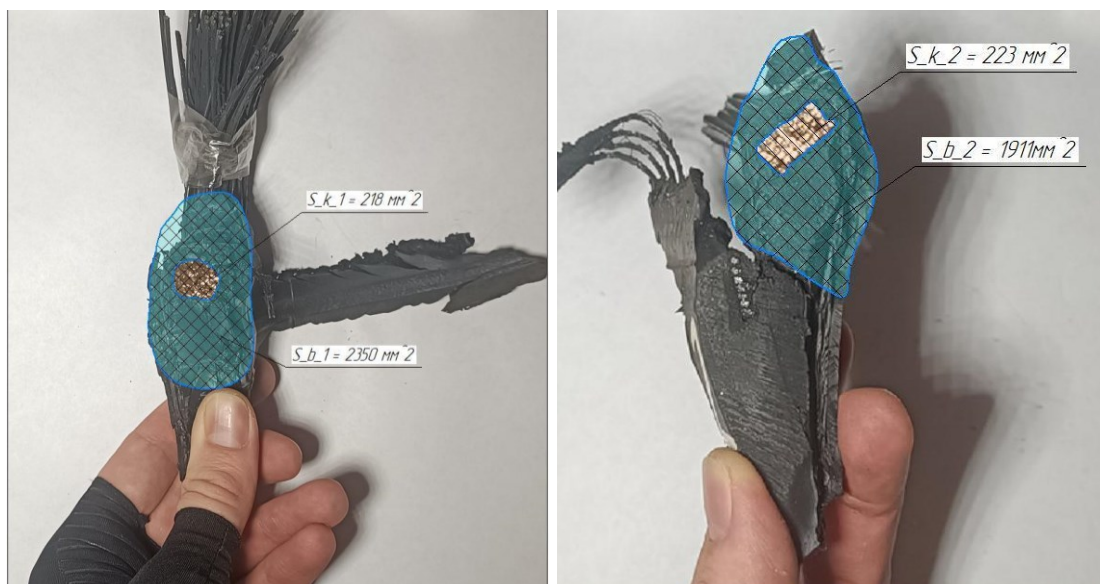


Рис. 3 Основание борта шин 1й группы

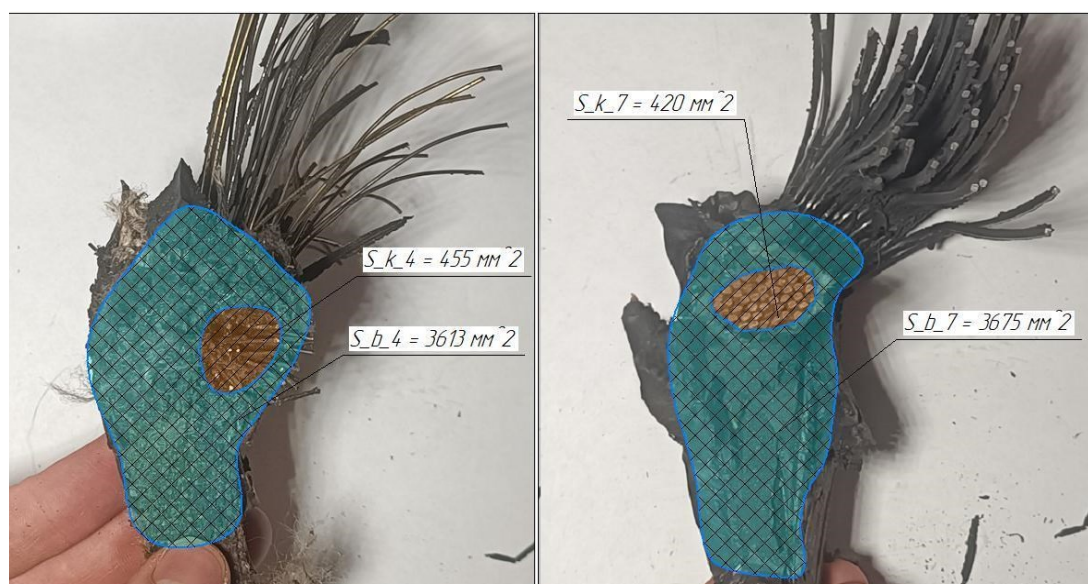


Рис. 4. Основание борта шин 2й группы

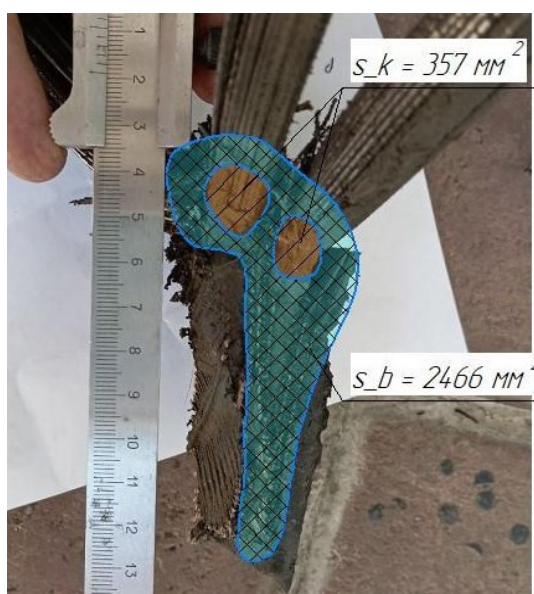


Рис. 5. Основание борта шин 3й группы

На рис. 3, рис. 4 и рис. 5 представлены основания бортов шин 1, 2 и 3 группы, соответственно, с указанием типоразмера утилизируемой шины, площади металлического бортового кольца S_k и площади резиновой оболочки S_b .

Диаграммы зависимости рабочего давления в гидроцилиндре от времени для групп 1, 2 и 3 представлены на рис. 6 и рис. 7.

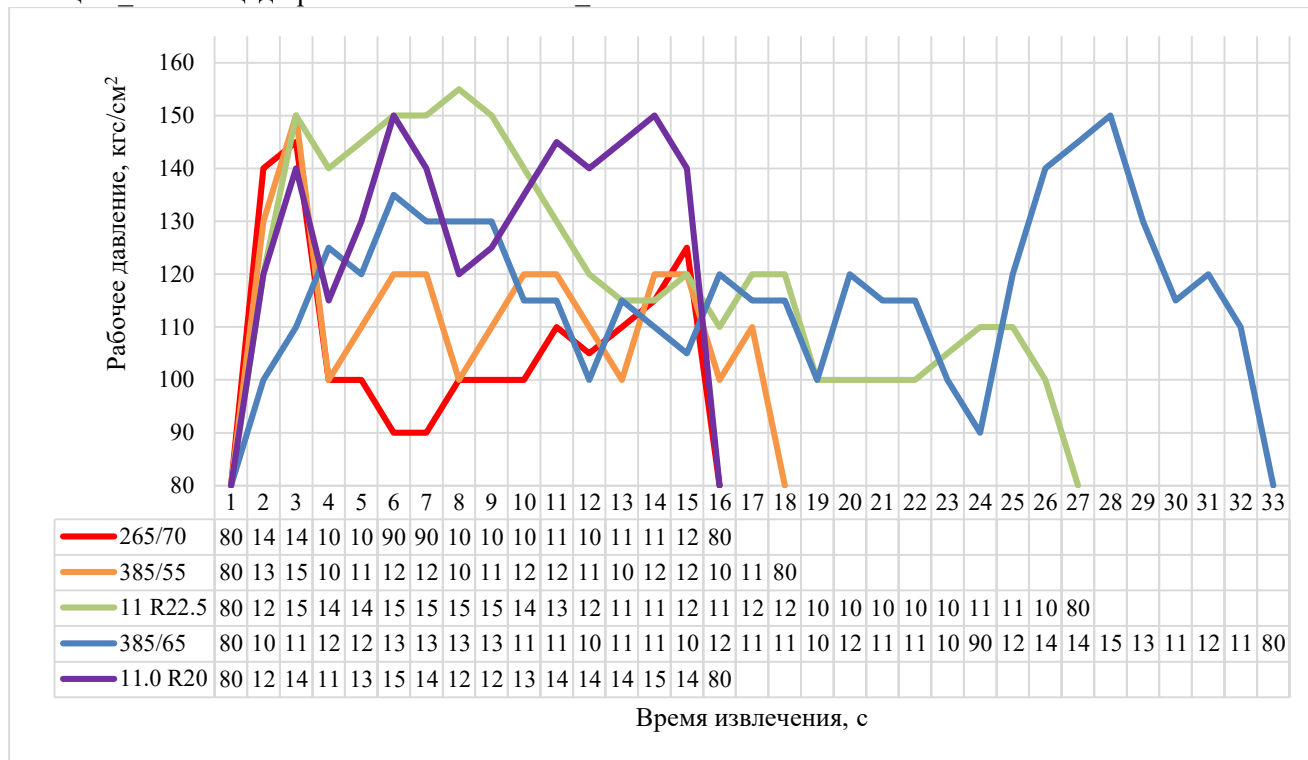


Рис. 6. Диаграммы изменения давления в системе при извлечении бортового кольца из шин 1 группы

На рис. 6 показаны графики изменения рабочего давления в гидравлической системе в процессе извлечения бортового металлического кольца шин 1й группы. У шин 265/70 R22.5, 385/55 R22.5, 11 R22.5, 11 R20 присутствует ярко выраженный начальный пик рабочего давления в 140-150 кгс/см², возникший на 2-3 сек с начала работы гидропривода. Это связано с большой площадью разрываемой резиновой оболочки борта колеса. При извлечении бортового кольца из шины 385/65 R22.5 в начальный момент тоже присутствует пик рабочего давления, но он происходит значительно позже, на 5-6 сек и достигает отметки в 135 кгс/см². Далее при продолжении извлечения на некоторых шинах (265/70 R22.5, 385/55 R22.5, 385/65 R22.5) происходит спад рабочего давления в системе, так как площадь резиновой оболочки борта колеса уменьшается и остаётся постоянной вплоть до окончания процесса извлечения. При извлечении бортового кольца из шин 11 R22.5, 11 R20 рабочее давление системы не спадает и какое-то время поддерживает максимальное значение в 140-150 кгс/см². В конце извлечения бортового кольца у шин 265/70 R22.5, 385/65 R22.5, 11 R20 присутствует финальный пик рабочего давления. Финальный пик всегда сопровождается резким сбросом рабочего

давления до значения холостого хода системы (80 кгс/см²)/

На рис. 7 представлены графики изменения рабочего давления в системе во времени при извлечении бортового металлического кольца шин 2й и 3й группы.

Ко 2й группе относятся КГШ шины 315/80 R22.5 и 14-20 Я. Отличие данных шин от 1й группы в том, что максимальное значение рабочего давления достигает 170 кгс/см² и выше. Также для данной группы шин характерны периодические всплески рабочего давления, достигающие до 160-190 кгс/см², после чего рабочее давление устремляется вниз практически до значения холостого хода (80-100 кгс/см²). Такие всплески связаны с тем, что бортовое металлическое кольцо КГШ может не до конца извлекаться из резинового борта и застрять в мишени упорной плиты, что может послужить причиной для разрыва бортового кольца, поэтому оператор оборудования сбрасывал давление в системе до значения холостого хода, а затем снова нагнетал его до максимального.

Группа 3 включает в себя покрышки 17.5 – 25 L-3 и 18.4 – 26, габаритные размеры которых превышают размеры покрышек из группы 2. Но в исследуемых покрышках был выполнен надрез бортовой части колеса по диаметру бортового

кольца. В процессе извлечения бортового кольца из шин 3й группы также присутствуют начальные и конечные пики рабочего давления в системе, при чём начальный пик имеет большее

значение рабочего давления и достигает 140–150 кгс/см², конечные пики достигают 125–135 кгс/см².

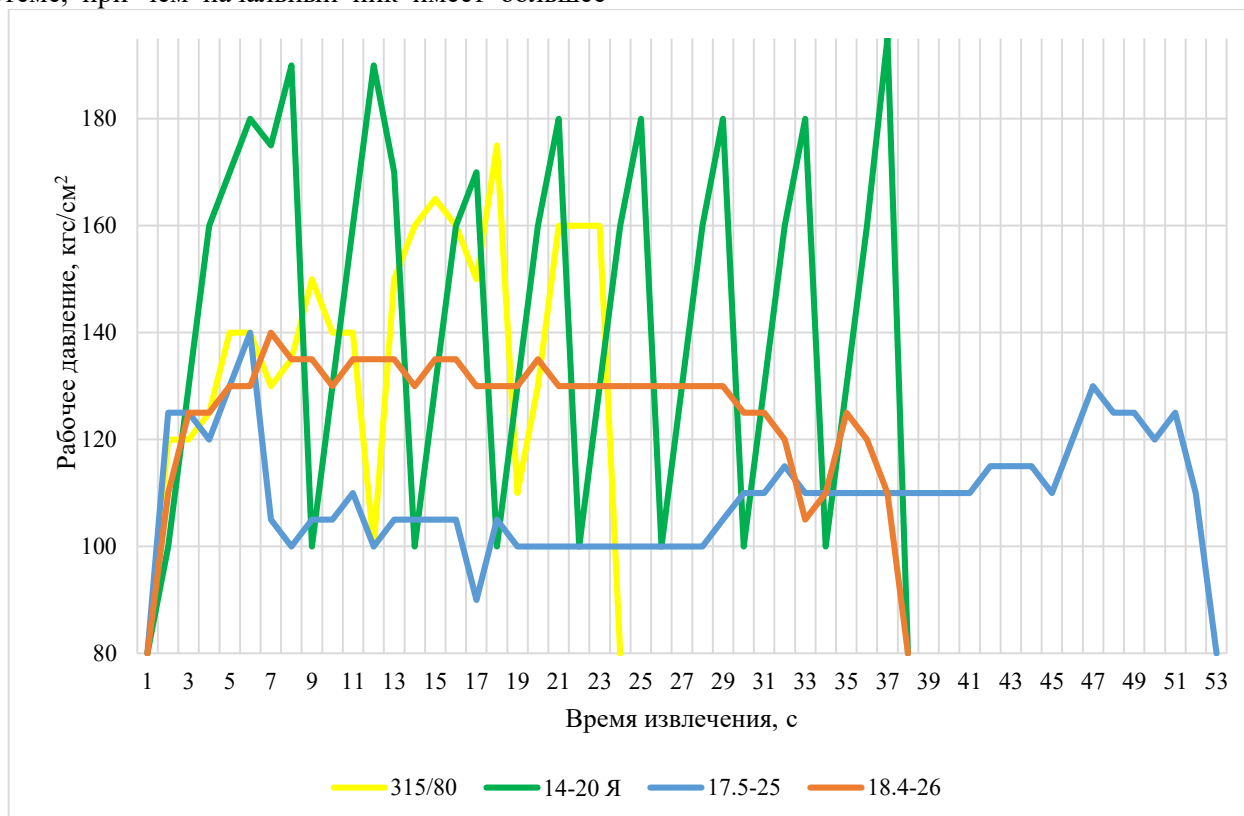


Рис. 7. Диаграммы изменения давления в системе при извлечении бортового кольца из шин групп 2 и 3

В бортовых кольцах обычно используется стальная проволока высокой прочности, так как она обеспечивает надежную фиксацию шины на ободе колеса. Марка проволоки может варьироваться в зависимости от требований производителя и типа шины, но чаще всего применяются проволоки из углеродистой стали с высоким пределом прочности, высокими адгезионными параметрами для прочной связи крепления проволоки с резиновой оболочкой и антикоррозийными покрытиями для увеличения срока службы. Спецификации на бортовые кольца могут включать ГО-СТы, такие как 14959-2016, 1071-81 или 26366-84 для стальной проволоки.

В общем случае усилие необходимое для извлечение бортового кольца можно представить следующей формулой:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 < P_0 \quad (1)$$

где P — усилие необходимое для извлечения бортового кольца, Н;

P_1 — усилие, необходимое для преодоления адгезии между стальной проволокой и резиновой оболочкой, Н;

P_2 — усилие, необходимое для разрыва резиновой оболочки бортовой части колеса, Н;

P_3 — усилие, затрачиваемое на деформацию бортового колеса, Н;

P_4 — усилие, затрачиваемое на преодоления силы трения и других вредных факторов, Н;

P_0 — усилие, суммарное разрывное усилие всех проволок в бортовом кольце, Н.

В процессе извлечения бортового кольца необходимо не превышать усилие, которое может привести к разрыванию бортового кольца, которое затрудняет дальнейшую переработку. Бортовое кольцо покрышки состоит из n шт. стальных проволок и резины, которая скрепляет проволоки между собой. Соответственно суммарное разрывное усилие P_0 всех проволок в бортовом кольце вычисляют по результатам испытания на растяжение по формуле (2):

$$P_0 = K_p \sum_{i=1}^n P_z \quad (2)$$

где n — количество испытанных проволок;

P_z — разрывное усилие одной проволоки, Н;

K_p — коэффициент упрочнения бортового кольца резиновым слоем [1-1.25];

Расчетное разрывное усилие проволоки определяется по формуле (3):

$$P_z = \sigma_{пч} \cdot A \quad (3)$$

где $\sigma_{пч}$ – предел прочности стальной проволоки, Па;

A – площадь поперечного сечения проволоки, м^2 ;

Так как бортовое кольцо состоит из замкнутых проволок одного диаметра, то подставляя формулу (3) в (2) усилие необходимое для разрывания бортового кольца (P_o) можно представить в виде уравнения (4):

$$P_o = K_p \cdot \sigma_{пч} \cdot A \cdot z = K_p \cdot \sigma_{пч} \cdot A_{бк} \quad (4)$$

где z – кол-во проволок в бортовом кольце;

$A_{бк}$ – площадь поперечного сечения бортового кольца, м^2 ;

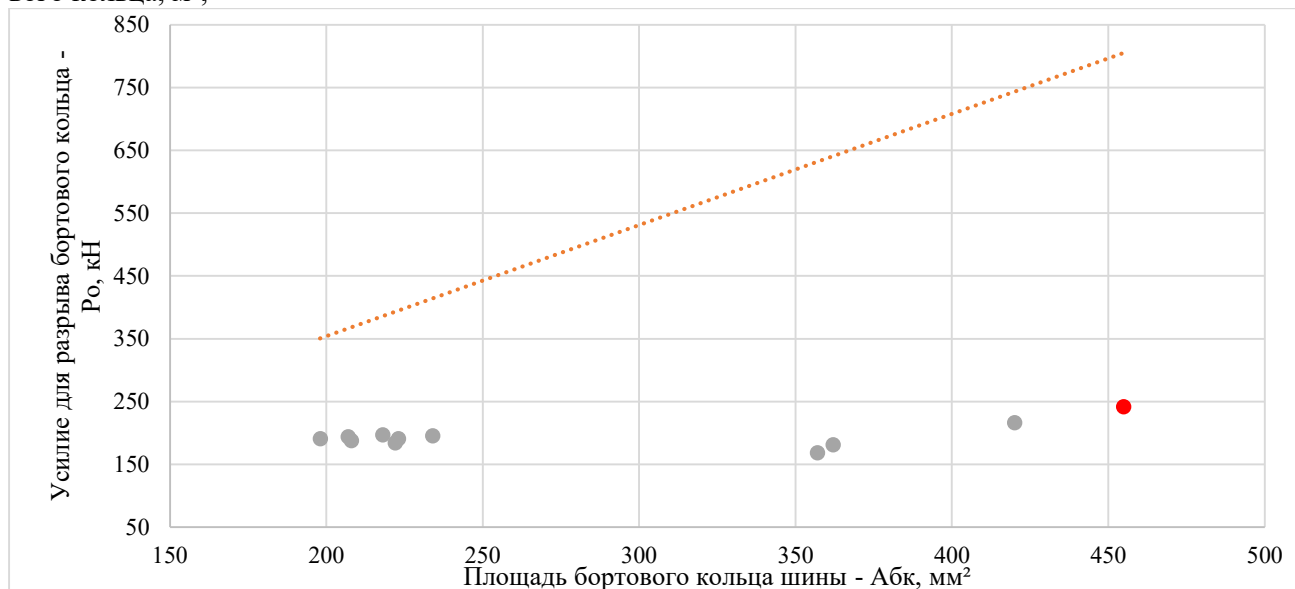


Рис. 8. Диаграмма зависимости необходимого усилия для разрыва бортового кольца от площади бортового кольца КГШ

Как видно из рис. 8 максимальное усилие при извлечении бортового кольца не доходит до нижнего предела прочности проволоки, но при извлечении бортового кольца из крупногабаритной шины 14.00-20 Я-307 (опыт №9, табл. 1) (рис. 8) с внешним диаметром 1220 мм без диаметрального надреза рабочее давление достигло максимальной точки в 195 кгс/см² в гидроцилиндре, после чего произошёл разрыв металлического бортового кольца в месте «протягивания» бортового кольца через мишень упорной плиты устройства. Это обусловлено тем, что резиновый борт покрышки с металлической проволокой внутри застрял в отверстии мишени оборудования, что привело к разрыву кольца.

Процесс извлечения бортового металлического кольца из резиновой оболочки представляет собой сложную задачу как с физической, так и с геометрической точки зрения. Силу, необходимую для извлечения, можно разложить на несколько составляющих (1). Одна из них — это

Согласно ГОСТ 26366-84 предел прочности для проволоки 1Л/1ЛА составляет [1770–2060] МПа. Подставляя данное значение в (4), получим график зависимости разрывного усилия (P_o) от площади сечения бортового кольца ($A_{бк}$), представленный на рис. 8.

Линией обозначен нижний предел необходимого усилия для разрыва проволоки бортового кольца в зависимости от площади поперечного сечения. Точками указаны значения максимального усилия, приложенных к крюку при извлечении бортового кольца в утилизируемых шинах (табл. 1).

сила, которая требуется для преодоления адгезионной прочности между резиновым слоем и металлической проволокой:

$$P_1 = \sigma_c \cdot A_k = \sigma_c \cdot \pi \cdot d \cdot l \quad (5)$$

где σ_c –сдвиговое напряжение, Па;

A_k – площадь поверхности соприкосновения проволоки с резиновой оболочкой, м^2 ;

d – толщина бортового кольца, м

l – длина участка контакта бортового кольца и резиновой оболочки, м;

По ГОСТ 26366-84 прочность связи металлической проволоки, диаметром 1 мм, с резиновой оболочкой, шириной 10 мм, составляет 206 Н. Подставляя данные в (4), можно вычислить сдвиговое напряжение:

$$\sigma_c = \frac{P_1}{\pi \cdot d \cdot l} = \frac{206}{\pi \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 6,5 \text{ МПа} \quad (6)$$

Величина усилия, необходимого на преодоление адгезии, прямо пропорциональна площади поверхности контакта металлической проволоки с резиновым бортом. При извлечении бортового

кольца, площадь контакта постоянно меняется, так как бортовое кольцо изгибается в двух местах и процесс отслоения резины с металлическим кордом проходит не равномерно, а скачками.

При извлечении бортового кольца из шин 3й группы, был проведён диаметральный разрез бортовой части колеса, таким образом усилием (P_2), необходимым для разрыва резиновой обо-

лочку можно пренебречь. Для компенсации усилий P_3 и P_4 , введём поправочный коэффициент K , равный 0,9. Таким образом, уравнение 1 будет иметь вид:

$$P = P_1 \cdot K \quad (7)$$

На рис. 9 изображено усилие для преодоления адгезионной прочности во времени для исследуемых шин 3ей группы.

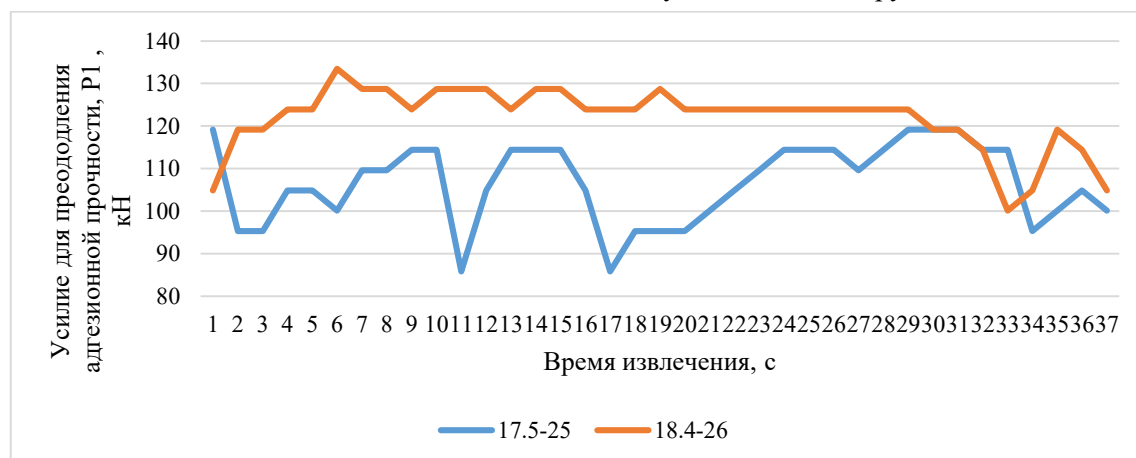


Рис. 9. Усилие, необходимое для преодоления адгезии между стальной проволокой и резиновой оболочкой во времени для колёс 3-й группы

Сравнивая процессы при извлечении бортовых колец из колёс схожих по техническим характеристикам 18.4-26 группы 3 и 315/80 группы 2, можно сделать вывод, что на преодоление адгезии между металлом и резиновым слоем уходит около 60 % от общего усилия.

Выводы. В данной статье была представлена комплексная оценка процесса извлечения бортового металлического кольца из резиновой оболочки грузовых и крупногабаритных шин. Путём экспериментальных исследований установлены ключевые факторы, влияющие на эффективность этого процесса, такие как характеристики шин, их типоразмеры и особенности конструкции. Результаты эксперимента продемонстрировали, что наличие адгезии между резиновым бортом и металлическим кольцом требует значительных усилий для преодоления, что подчеркивает важность оптимизации технологии извлечения. Полученные данные могут быть использованы для дальнейших исследований и разработки более эффективных методов утилизации шин, что, в свою очередь, способствует сокращению негативного воздействия на окружающую среду.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шаховец С.Е., Курлянд С.К., Сиротинкин Н.В., Рюткянен Е.А. О состоянии макромолекулярной структуры протекторных резин в течение эксплуатации и переработки шин // Известия СПбГТИ (ТУ). 2019. №51 (77) С. 39–41.

2. Grinchuk P.S., Fisenko S.P. Heat Exchange with Air and Temperature Profile of a Moving Oversize Tire // J Eng Phys Thermophy 2016. №89. Pp. 1369–1373. DOI:10.1007/s10891-016-1503-8
3. Федосеев И. В, Баркан М. Ш., Прохоцкий Ю. М, Ласкина Н.Е., Логинова А.Ю. Технология утилизации отработанных резинотехнических изделий // Экологические системы и приборы. 2013. № 8. С. 32–39.
4. Goryunov S., Khoreshok A., Grigoryeva N., Preis E., Alitkina O. The research of operational temperatures of dump trucks tires // E3S Web of Conferences. The conference proceedings Sustainable Development of Eurasian Mining Regions: electronic edition. 2019. DOI:10.1051/e3sconf/201913401014
5. Zhetesova G.S., Dandybaev E.S., Zhunuspekov D.S., Zhekibaeva K.K. Improvement of the organization of maintenance and repair of dumpcars // Material and Mechanical Engineering Technology. 2020. № 1. Pp. 33–38 DOI:10.17580/gzh.2022.04.15
6. Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 № 242 (ред. от 02.11.2018) Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов (с изм. и доп., вступ. в силу с 04.10.2021).
7. Невядомская А. И., Дериглазов А. А. Утилизация и переработка шин в крошку // Молодой ученый. 2014. № 17 (76). С. 310–313.
8. Перлина Ж.В., Марьев В.А., Шувалов Ю.А. Переработка использованных шин: международный опыт // Твердые бытовые отходы. 2012. № 12(78). С. 58–63

9. Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» (Принят ГД РФ 22.05.1998, действующая редакция)

10. Bochkaryov Y., Ishkov A. The operational reliability of quarry dump trucks belaz-7540 in the placer deposits // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Pp. 325–332. DOI: 10.5593/sgem2020/1.2/s03.042

11. Лучин И.В., Кравченко И.М., Конкин М.Ю. Методика расчёта процесса разрушения изношенных автомобильных шин и резино-технических изделий при утилизации // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014 №8.4. С. 11–15.

12. Кострова З.А., Михеев А.В., Бушуева М.Е., Беляков В.В., Митяков С.Н. Утилизация пневматических и безвоздушных шин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. № 3(114). С. 120–130.

13. Чуев К.В., Кравченко В.М., Мутовалов Э.А. Основные виды утилизации резинотехнических изделий // Образование. Наука. Производство: Сборник докладов XV Международного молодежного форума, Белгород, 23–24 октября 2023 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. С. 49–52.

14. Пат. 201698, Российская Федерация, МПК В29В 17/02. Установка для удаления троса из боковой части шины при утилизации: / В.Я. Дуганов, Н.А. Архипова, К.В. Чуев, Ю.А. Чуева; заявитель ФГБОУ ВО «БГТУ им. Шухова» № 2020133204 : заявл. 08.10.2020 : опубл. 28.12.2020

15. Дуганов В.Я., Дуюн Т.А., Чуев К.В., Архипова Н.А., Кравченко В.М., Чуева Ю.А. Проблемы утилизации крупногабаритных автомобильных шин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 11. С. 103–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-103-112.

Информация об авторах

Чуев Кирилл Витальевич, аспирант кафедры технология машиностроения. E-mail: kirill.chuev@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Поступила 15.10.2024 г.

© Чуев К.В., 2024

Chuev K.V.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

E-mail: kirill.chuev@gmail.com

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF EXTRACTING METAL COMPONENTS FROM RUBBER PRODUCTS

Abstract. The article is devoted to the problem of recycling of worn-out automobile tires and rubber products, which is a serious environmental threat. With the increasing number of cars in Russia and, consequently, the growth of waste, especially tires, effective methods of recycling them are needed. The article describes the process of removing the side ring from tires of various sizes using hydraulic equipment. In the course of the experiment, the efficiency of extracting the side metal ring from the rubber shell of cargo and large-sized tires was studied using specialized hydraulic equipment. The experiment was aimed at determining the necessary effort to remove the side ring, which is a key step in recycling used tires. The experiments carried out made it possible to establish the relationship between the force required to remove the side ring and its characteristics. The results demonstrate that a significant part of the effort is spent on overcoming the adhesion between the metal wire and the rubber shell, which is important to take into account when designing equipment for metal recycling. The study's findings highlight the need for improved tire recycling technologies and safer tire recycling.

Keywords: recycling of rubber products, tire recycling, large-size tires.

REFERENCES

1. Shahovec S.E., Kurlyand S.K., Sirotinkin N.V., Rytukyanen E.A. On the state of the macromolecular structure of tread rubbers during the operation and processing of tires [O sostoyanii makromolekulyarnoy struktury protektornykh rezin v

techenie eksploatacii i pererabotki shin]. Izvestiya SPbGTI (TU). 2019. No. 51 (77) Pp. 39–41. (rus)

2. Grinchuk P.S., Fisenko S.P. Heat Exchange with Air and Temperature Profile of a Moving Oversize Tire. J Eng Phys Thermophy 2016. No. 89. Pp. 1369–1373. DOI:10.1007/s10891-016-1503-8.

3. Fedoseev I.V., Barkan M.Sh., Prohockiy Yu.M., Laskina N.E., Loginova A.Yu. Technology of utilization of used rubber products [Tehnologiya utilizatsii otrabotannykh rezinotekhnicheskikh izdeliy] *Ekologicheskie sistemy i pribory*. 2013. No. 8. Pp. 32–39. (rus)
4. Goryunov S., Khoreshok A., Grigoryeva N., Preis E., Alitkina O. The research of operational temperatures of dump trucks tires. E3S Web of Conferences. The conference proceedings Sustainable Development of Eurasian Mining Regions: electronic edition. 2019.
5. Zhetesova G.S., Dandybaev E.S., Zhunuspekov D.S., Zhekibaeva K.K. Improvement of the organization of maintenance and repair of dump-cars. *Material and Mechanical Engineering Technology*. 2020. No. 1. Pp. 33–38. DOI:10.17580/gzh.2022.04.15.
6. Prikaz Rosprirodnadzora ot 22.05.2017 No. 242 (red. ot 02.11.2018) Ob utverzhdenii Federal'nogo klassifikatsionnogo kataloga othodov (s izm. i dop., vstup. v silu s 04.10.2021). (rus)
7. Nevyadomskaya A.I., Deriglazov A.A. Recycling and recycling of tires into crumbs [Utilizatsiya i pererabotka shin v kroshku] *Molodoy uchenyy*. 2014. No. 17 (76). Pp. 310–313. (rus)
8. Perlina Zh.V., Mar'ev V.A., Shuvalov Yu.A. Pererabotka ispol'zovannykh shin: mezhdunarodnyy opyt [Pererabotka ispol'zovannykh shin: mezhdunarodnyy opyt]. *Tverdye bytovye othody*. 2012. No. 12(78). Pp. 58–63
9. Nevyadomskaya A.I., Deriglazov A.A. Utilizatsiya i pererabotka shin v kroshku. *Molodoy uchenyy*. 2014. No. 17 (76). Pp. 310–313. (rus)
10. Federal'nyy zakon ot 24.06.1998 No. 89-FZ «Ob othodakh proizvodstva i potrebleniya» (Prinyat GD RF 22.05.1998, deystvuyushchaya redakciya)
11. Bochkaryov Y., Ishkov A. The operational reliability of quarry dump trucks belaz-7540 in the placer deposits. 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Pp. 325 – 332.
12. Luchin I.V., Kravchenko I.M., Konkin M.Yu. Method of calculating the process of destruction of worn-out automobile tires and rubber-technical products during recycling [Metodika rascheta processa razrusheniya iznoshennykh avtomobil'nykh shin i rezino-tehnicheskikh izdeliy pri utilizatsii] *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2014 No. 8.4. Pp. 11–15. (rus)
13. Kostrova Z.A., Miheev A.V., Bushueva M.E., Belyakov V.V., Mityakov S.N. Recycling of pneumatic and airless tires [Utilizatsiya pnevmaticheskikh i bezvozdukhnykh shin]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2016. No. 3(114). Pp. 120–130. (rus)
14. Chuev K.V., Kravchenko V.M., Mutovalov, E.A. Main types of recycling of rubber products [Osnovnye vidy utilizatsii rezinotekhnicheskikh izdeliy] *Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo: Sbornik dokladov XV Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma*, Belgorod, 23–24 oktyabrya 2023 goda. Belgorod: Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet im. V.G. Shukhova, 2023. Pp. 49–52. (rus)
15. Duganov V.Ya., Arhipova N.A., Chuev K.V., Chueva Yu.A. Ustanovka dlya udaleniya trosy iz bokovoy chasti shiny pri utilizatsii. Patent RF, no. 201698, 2020
16. Duganov V.Ya., Duyun T.A., Chuev K.V., Arhipova N.A., Kravchenok V.M., Chueva Yu.A. Problems of recycling large car tires [Problemy utilizatsii krupnogabaritnykh avtomobil'nykh shin]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov* 2023. No. 11. Pp. 103–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-103-112. (rus)

Information about the author

Chuev, Kirill V. Postgraduate student. E-mail: kirill.chuev@gmail.com Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 15.10.2024

Для цитирования:

Чуев К.В. Технологические аспекты извлечения металлических компонентов из резинотехнических изделий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 12. С. 106–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-106-115

For citation:

Chuev K.V. Technological aspects of extracting metal components from rubber products. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 12. Pp. 106–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-106-115

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-116-124

^{1,*}Бестужева О.В., ²Бондаренко Ю.А., ²Баранов Д.С., ²Романович А.А.¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,

*E-mail: bestuzheva@bsu.edu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕМОНТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

Аннотация. Работоспособность и надежность узлов особо тяжелого оборудования добывающей, горной, химической и др. промышленности зависит от точности и качества монтажа оборудования, проведения профилактических ремонтов, выявления изношенных узлов и деталей и их своевременной замены. Зачастую для измельчения сырья применяются трубные мельницы, в процессе эксплуатации которых происходит повышенный износ сопрягаемых деталей, возникающий из-за наследственных дефектов, проявляющихся вследствие нарушений исполнения технологического процесса изготовления вала, а именно обработки ответственной поверхности - цилиндрической цапфы. При сильной деформации цилиндрической цапфы необходима замена подшипникового узла и проведение ремонтных работ. Для определения параметров ротационного резания, геометрии и положения режущих инструментов, выявления аналитических взаимосвязей между технологическими условиями обработки и подлежащими оптимизации рабочими режимами задаются технические ограничения при применении токарных нестационарных станков, определяется площадь среза и линия пересечения восстанавливаемой и инструментальной поверхностей. Приводится система уравнений, описывающая линию пересечения поверхности восстанавливаемой детали и поверхности инструмента. Определяется площадь поверхности среза инструментом за один проход. Рассчитывается площадь срезаемого металла при обработке конической поверхности.

Ключевые слова: цементная промышленность, повышение работоспособности оборудования, износ цапфы валов трубной мельницы, параметры ротационного резания.

Введение. На различных предприятиях, которые относятся к предприятиям, специализирующимся на выпуск продукции для строительной сферы, в частности на предприятиях цементной промышленности, находится в эксплуатации оборудование, в состав которого входят детали и узлы с большими габаритными размерами. Например, при выпуске различной продукции в добывающей, горной, химической и других применяются на предприятиях машины и оборудование, которые имеют массу от 300 до 1800 тонн, в частности такое как помольные мельницы, вращающиеся печи и т.д.

Габаритные размеры этих изделий являются одним из основных факторов, устанавливающих технологические возможности изготовления оборудования, в состав которого они входят, а также циклы производства и монтажа конструкций, совокупность проблем транспортировки к месту эксплуатации и др. И повышение работоспособности этого оборудования также зависит от точности и качества его монтажа, проведения профилактических ремонтов, выявления изношенных узлов и деталей и их своевременная замена.

Конструктивные особенности деталей и узлов больших габаритов, а также технические требования, предъявляемые к ним различны [1]. Одним из важнейших показателей роста производи-

тельности работы оборудования данного вида является его надежность, которая зависит от многих факторов, и в значительной степени от зависящая от своевременного ремонта и технического обслуживания, для которого возможно применение специального станочного оборудования, которое разрешит восстановить, утраченную в процессе эксплуатации этого оборудования работоспособность, снизить время проведения ремонтов [2–5].

Методика. На сегодняшний день в нашей стране функционируют около 60 предприятий цементной промышленности, при этом выпуск продукции на этих предприятиях находится в пределах 80 млн. тонн в год. На этих цементных заводах имеется в наличии высокопроизводительное технологическое оборудование, которое необходимо для производства цемента с высокими показателями, в частности используются мельницы непрерывного действия сухого и мокрого помола, работающие в открытом или закрытом цикле. Наиболее часто для измельчения сырья применяют шаровые мельницы, в которых помол материала происходит внутри полого вращающегося барабана. Если длина барабана мельницы в 4–5 раз больше его диаметра, то такую мельницу принято называть трубной.

Конструктивные особенности трубных мельниц различных типоразмеров аналогичны

(рис. 1), можно выделить из узлов: барабан, загрузочное и разгрузочное устройства, опорные цапфовые подшипниковые узлы, которые воспринимают нагрузки от барабана мельницы и содержащихся в нем мелющих тел, и материала, привод, в состав которого входит электродвигатель и редуктор.



Рис. 1. Шаровая трубная мельница

В связи с тем, что в результате исполнения технологического процесса изготовления одной из основных деталей, которая входит в опорные цапфовые подшипниковые узлы, цапфы, могут возникнуть нарушения в этих техпроцессах, которые приводят к появлению некоторых наследственных дефектов (Рис. 2 2). В процессе эксплуатации шаровой трубной мельницы в цапфах валов эти дефекты могут приводить к появлению износа рабочей поверхности сопряжения этих деталей, что в последствии приводит в потери цилиндричности цапфы, а сама цапфа приобретает форму близкую к усеченному конусу или седловидность, катеноиду и др. В результате этого возникает необходимость заменить подшипниковый узел, для чего мельницу надо останавливать и проводить ремонтные работы с применением станочных модулей и ротационного резания [6–8].



Рис. 2. Изношенная цапфа, подготовленная к ремонту

Применение приставных станков для восстановления, изношенных в процессе эксплуатации

крупногабаритных деталей, которые входят в состав, например, такого промышленного оборудования как цементные вращающиеся печи и трубные помольные мельницы, приводит к тому, что следует рассмотреть комплекс различных технологических и конструктивных задач, в связи с тем, что процесс восстановления таких деталей имеет существенные отличия от процесса восстановления изделий на стационарных станках. На первом этапе возникает проблема установления вероятности устранения изношенной поверхности детали приставным станком. Также возникает вопрос возможности ремонтного восстановления детали без демонтажа ее с промышленного оборудования [9]. На следующем этапе необходимо определиться с местом установки приставного станка на поверхности восстанавливаемой детали, с учетом того, что месторасположение станка оказывает значительное влияние на достижение заданной точности и шероховатости ремонтируемого изделия, т.е. формообразующие движения должны обеспечить данные требования. Еще одна из проблем, которую следует решить при рассматриваемом способе восстановления, заключается в том, что привод, от которого выполняется вращение изделия располагается не на станке, а вращающий момент передает через систему валов и редукторов [10]. Конструктивные особенности станка заключаются в том, что он имеет продольную и поперечную подачи, при том, что частота вращения изделия не зависит от станочного оборудования, а от промежуточной системы привода вращения этого изделия от двигателя.

В процессе эксплуатации промышленного оборудования, различные его детали подвергаются постепенным износным процессам, к этим деталям можно отнести, например, бандаж печного оборудования, сушильных барабанов, цапфы и валы прокатных станов, листоформовочных машин, бумагоделательных машин, помольных агрегатов, имеющих ремонтируемые наружные поверхности вращения. Также подлежат обработке внутренние поверхности вращения, такие как загрузочные и разгрузочные цапфы шаровых трубных мельниц, гильзы гидроцилиндров большого диаметра, горловины, работающих под давлением, крупногабаритных цистерн и сосудов. Восстановления без демонтажа с агрегата также требуют торцевые поверхности разнообразных фланцев валов, торцов крупногабаритных труб под сварку и труб, работающих в составе агрегатов под давлением, торцы бандаж печного оборудования цементной промышленности и барабанов под гидростатом. Для восстановления и ремонта изношенных отверстий применяют нестационарные сверильные станки

[11], которые позволяют восстановить работоспособность фланцевых соединений валов, например, цапф загрузочных и разгрузочных узлов трубных мельниц, венцовых шестерен цементных печей и других фланцевых соединений различного оборудования. Для ремонта зубчатых колес печных агрегатов, торцевых поверхностей их сварных бандажей, для восстановления конструктивно различных шпоночных и шлицевых соединений, для снятия усиления сварных швов разработаны нестационарные фрезерные станки. Для обеспечения требуемой точности и шероховатости восстановленных крупногабаритных поверхностей деталей любой конфигурации во многих случаях требуется в технологический процесс восстановления и ремонта вводить операцию шлифования, которая проводится также с применением нестационарных шлифовальных станков. Следовательно, нестационарные станки могут иметь разнообразную компоновку, иметь различное назначение, применяться для выполнения разных технологических операций. Поэтому уже на этапе проектирования такого станочного оборудования решается комплекс задач. Во-первых, необходимо установить точную геометрическую конфигурацию детали, требующей ремонтного восстановления, рассмотреть величины отклонений размеров изношенной детали относительно первоначальных размеров, а также установленные нормативно-технической документацией технические требования, требования по точности и шероховатости поверхности изделия. Следует установить и обосновать выбор метода и способа восстановления поверхности износа детали с обеспечением соблюдения технических условий, определить возможность доступа при обработке к восстанавливаемой поверхности детали без снятия ее с рабочего агрегата. Далее необходимо рассмотреть исполнительные движения станка (определить формообразующие движения приставного станка в зависимости от метода и способа обработки поверхности восстанавливаемой детали) и провести анализ и обоснование выбора, применяемого для ремонтной обработки инструмента с целью обеспечения требований для восстановления работоспособности агрегата. Следует сформировать служебное назначение станка, так как станки такого типа разрабатываются под обработку установленных деталей, которые функционируют в заданных конкретных условиях. Надо рассмотреть траекторию движения (структурную схему) применяемого инструмента и необходимость, и возможность настройки на следующий инструмент для обеспечения установленных точности и шероховатости поверхности. Рассчитать погреш-

ность базирования станка относительно восстанавливаемой поверхности изделий с целью обеспечения наименьшей погрешности при формообразовании, определить динамические особенности станка и рассмотреть взаимосвязи между статической настройкой обрабатываемого оборудования и формообразующими движениями. Следует определить методы компенсации возникающих погрешностей установки в процессе восстановления и влияние особенностей перемещения ремонтируемого изделия на изменение его положения в пространстве относительно применяемого инструмента.

Определяются технические ограничения (интервалы допустимых значений), которые выявляют аналитическую взаимосвязь между технологическими условиями обработки и подлежащими оптимизации рабочими режимами. Не допускается несоблюдение ограничений и выход за установленные верхние и нижние предельные отклонения параметра характеристик станка, применяемого инструмента и ремонтируемого изделия.

Технические ограничения при применении токарных нестационарных станков следующие: максимально допустимые значения скорости резания, которые обеспечивают заданное стружкообразование и оптимальную схему износа инструмента; максимально допустимые значения подачи, которые обеспечивают заданное стружкообразование и оптимальную схему износа инструмента; верхние и нижние предельные отклонения от установленной подачи (минимальная заданная подача и максимальная заданная подача); предельно допустимое значение глубины резания для обеспечения установленной нормативно-технической документацией шероховатости поверхности; верхние и нижние предельные отклонения от установленного допустимого отношения толщины стружки к ее ширине (минимальное заданное отношение и максимальное заданное отношение); максимальное значение припуска, который можно снять за один проход и максимальное значение общего припуска на обработку; период стойкости инструмента, за который может быть определена форма износа должен быть минимальным; максимально допустимые значения момента на шпинделе станка, отклонения положения неизменно закрепленной детали и нагружения режущей кромки инструмента.

Общие технические ограничения: статические (которые зависят от упругости и жесткости обрабатываемой детали и станка), динамические (которые зависят от колебаний в системе станок – приспособление – инструмент – заготовка), тер-

мические (которые зависят от температурных колебаний) прочность, упругость и деформация. Общие геометрические ограничения: аналитические и графические зависимости от конфигурации, полученных размеров и точности изготовления заготовки, от геометрии применяемого режущего инструмента и всеми параметрами, связанными с ним, от длины обработки, от биения, закрепления заготовки в приспособлении. Также на нестационарные станки имеются ограничения по нагрузкам, например, по силе зажима, по частоте вращения шпинделя, по мощности и крутящему моменту.

К основным техническим ограничениям, которые выявляют аналитическую взаимосвязь между технологическими условиями обработки и подлежащими оптимизации рабочими режимами, относят шероховатость поверхности ремонтируемого изделия (необходимый уровень этого ограничения зависит от конкретных технологических целей, которые только по определению допустимой шероховатости можно разделить на черновую и чистовую обработку), упругие перемещения восстанавливаемого изделия, ограничение силы зажима и ограниченная область применения эмпирически найденных зависимостей для процесса резания.

Восстанавливать работоспособность крупногабаритных изделий, у которых в процессе работы оборудования возникли дефекты, повреждения и износные отказы можно несколькими способами. Один из способов характеризуется большим ремонтным периодом, который связан с тем, что оборудование, на котором установлено поврежденное изделие, должно быть остановлено, технологический процесс выпуска продукции прекращается. Изношенное изделие демонтируют с этого оборудования, транспортируют на машиностроительные предприятия, которые имеют станочное оборудование для обработки крупногабаритных деталей. Изделие восстанавливается, а потом транспортируется на предприятие и монтируется обратно на оборудование. Способ восстановления изделий на месте их эксплуатации без демонтажа с оборудования с применением приставных станков имеет преимущества, одним из которых является меньший ремонтный период.

Согласно рабочему чертежу детали - цапфа, которая входит в состав погрузочного и разгрузочного узлов помольных агрегатов, должна иметь шероховатость рабочей поверхности Ra-2,5, определяемую эксплуатационными требованиями. Если эту поверхность обрабатывать призматическим резцом, то требуемую шероховатость не достичь и поэтому следует после токарной обработки провести операцию шлифования

поверхности. Введение в технологический процесс ремонта изделия дополнительной операции значительно увеличивает трудоемкость и себестоимость проведения ремонта. Требуемую шероховатость поверхности без применения операции шлифования можно обеспечить, используя ротационное резание. Этот способ обработки имеет ряд преимуществ: в связи с тем, что резец постоянно вращается (вращение или принудительное или самовращение), то процесс характеризуется незначительным линейным износом, который при этом не накапливается как при резании с применением призматических резцов, на обычном постоянном участке режущей кромки инструмента, а распределяется по всей поверхности резания равномерно; так как в процессе обработки каждый участок режущей кромки инструмента постоянно меняется, то этим обеспечиваются оптимальные условия теплоотвода от работающих участков в режущую чашку инструмента, которая имеет имеющую значительный радиус кривизны; непрерывное вращение инструмента во время работы обеспечивает большую протяженность круговой режущей кромки ротационного резца, характеризующее постоянное прерывание и незначительный период времени работы каждого его участка, позволяя тем самым осуществлять охлаждение лезвия во время холостого пробега, при этом температура в зоне резания уменьшается на величину до 40 % и уменьшается истинная скорость резания по сравнению со скоростью главного движения. В зоне резания наблюдается невысокая температура и это позволяет увеличивать скорость восстановления детали и производительность. При применении ротационных резцов можно допускать увеличение скорости резания, а это в конечном счете приводит к повышению производительности при выполнении ремонтных работ. Если рассмотреть основные закономерности и особенности, работоспособность и надежность чашечных резцов, условия стружкообразования при выполнении операции, то эти свойства обуславливают кинематические параметры ротационного резания. Стойкость ротационных резцов повышается в десятки раз по сравнению с призматическими резцами при последовательном повышении режимов резания, чему способствует снижение сил трения между режущей кромкой ротационного инструмента и обрабатываемой поверхностью изделия. Применение таких резцов позволяет исключить операцию шлифования, в связи с тем, что микрорельеф обработанной поверхности изделия характеризуется округленными вершинами и впадинами микронеровностей и большей в 1,3 раза по сравнению с обработкой призматическим резцом.

ческими резцами опорной длиной профиля поверхности [12, 13]. Округленный микрорельеф впадин и выступов увеличивает износостойкость восстановленной поверхности. Размерная стойкость таких резцов выше, чем традиционных, этот фактор является важным при обработки крупногабаритных деталей, так как точность восстановленных поверхностей деталей, которая установлена в нормативно-технической документации, при применении призматических резцов не может быть достигнута, в связи с тем, что период стойкости таких резцов не обеспечивает завершение одного полного рабочего хода, а процесс восстановления ротационным резанием проводится без смены режущего инструмента. При высокой размерной стойкости ротационного инструмента обеспечивается геометрическая точность валов большой длины, создается наклеп восстановленной поверхности изделия, поэтому нет необходимости в технологический процесс вводить операцию накатки. Все перечисленные особенности ротационного резания позволяют сделать вывод, что для обеспечения заданной нормативно-технической документацией шероховатости, точности, а также для повышения производительности ремонтных работ, получения наклепа обработанной поверхности, желательно при восстановительной обработке крупногабаритных деталей применять чашечные резцы.

При использовании таких резцов на обработанной поверхности образуется характерный микрорельеф, который зависит от радиуса режущей чашки, наклона ротационного инструмента относительно восстанавливаемой поверхности, а

также от способа ее вращения (самовращение или принудительное вращение) [14, 15].

Основная часть. Чтобы определить параметры ротационного резания, геометрические параметры резца, такие как угол поворота оси режущей чашки в горизонтальной плоскости, размеры чашечного резца, угол установки резца была рассмотрена действительная площадь среза. Она получается при пересечении конуса режущей чашки и поверхности детали, имеющей различные формы. Схема расположения резца относительно обрабатываемой поверхности (рис. 3) в форме конуса, расчетная схема расположения режущей чашки относительно восстанавливаемой детали с износом в виде конуса (рис. 4).

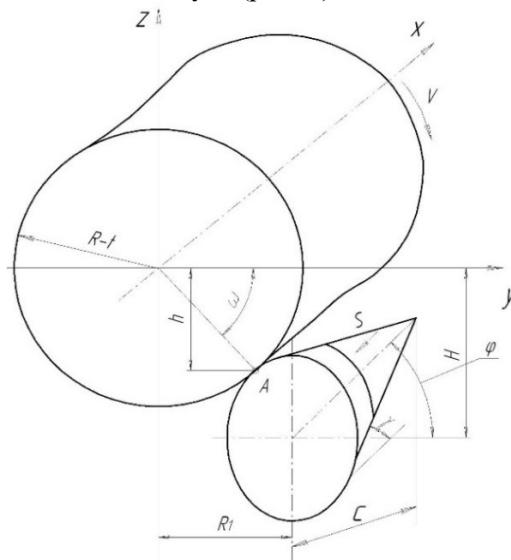


Рис. 3. Расположение режущей чашки относительно обрабатываемой поверхности

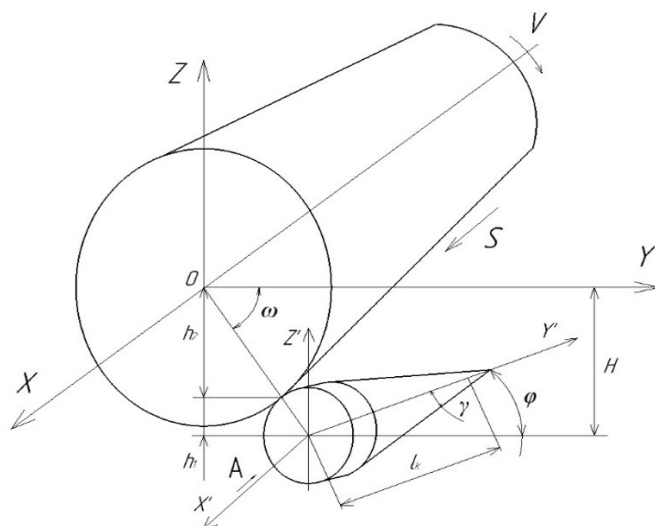
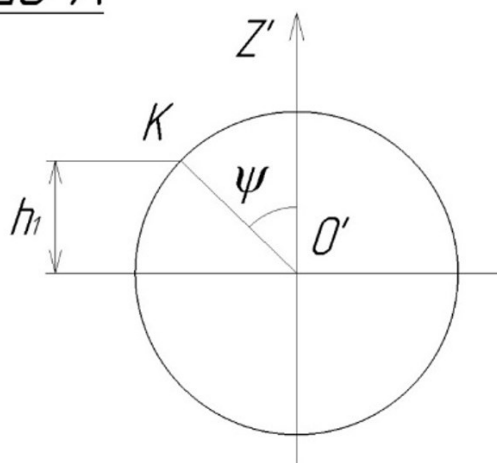


Рис. 4. Расчетная схема расположения режущей чашки относительно обрабатываемой детали. Площадь среза определяется по формуле:

$$z = \left(\frac{r^2(y + r \cdot \sin\varphi - R \cdot \cos\omega + t - r \cdot \operatorname{ctg}\gamma \cdot \cos\varphi)^2 -}{-c^2(x - r \cdot \cos\varphi - (R \cdot \cos\omega - t) \cdot \operatorname{tg}\varphi - r \cdot \operatorname{ctg}\gamma \cdot \sin\varphi)^2} \right) 0.5c^{-1} - H \quad (1)$$

Упростив выражение, получим:

Вид А



$$R = m \cdot c \cdot h \left(\frac{x - \frac{l}{2}}{d} \right) \quad (2)$$

$$R' = \frac{m \cdot c \cdot h \left(\frac{x - \frac{l}{2}}{d} \right) \cos \omega - t}{\cos \varphi} \quad (3)$$

Таким образом:

$$P = \int_{R_1 = m \cdot c \cdot h \left(\frac{x - \frac{l}{2}}{d} \right) \cos \omega - t}^{R_2 = m \cdot c \cdot h \left(\frac{x - \frac{l}{2}}{d} \right) \cos \omega} dy \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2} dx \quad (4)$$

Далее рассмотрим вариант обработки изношенной конической поверхности изделия.

Закономерность изменения величины радиуса контакта резца и обрабатываемой поверхности устанавливаем при использовании схемы (Рис. 5 5).

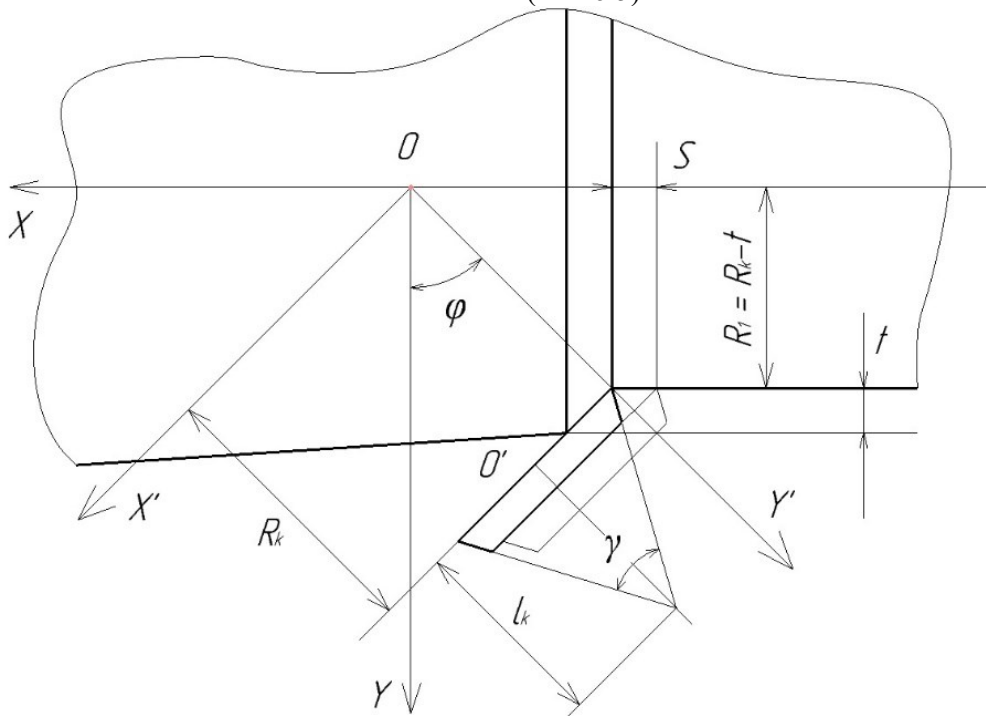


Рис. 5. Расчетная схема для определения параметров при обработке конической поверхности

Система уравнений, описывающая линию пересечения поверхности восстанавливаемой детали и поверхности инструмента:

$$\begin{cases} \frac{y^2}{R_0^2} + \frac{z^2}{R_0^2} = \frac{\left(x + \frac{L \cdot R_0}{R_0 - r_0} \right)^2}{\left(\frac{L \cdot R_0}{R_0 - r_0} \right)^2}; \\ \left(x - r \cdot \cos \varphi \left(\left(R_0 - \frac{R_0 - r_0}{L} \cdot \varepsilon \right) \cos \omega - t \right) \operatorname{tg} \varphi - r \cdot \operatorname{ctg} \gamma \cdot \sin \varphi \right)^2 + \\ + \left(z + \left(R_0 - \frac{R_0 - r_0}{L} \cdot \varepsilon \right) \sin \omega + \frac{r}{1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \omega}{\sin^2 \varphi}} \right)^2 = \\ = \left(y + r \cdot \sin \varphi - \left(R_0 - \frac{R_0 - r_0}{L} \cdot \varepsilon \right) \cos \omega + t - r \cdot \operatorname{ctg} \gamma \cdot \cos \varphi \right)^2 \operatorname{tg}^2 \gamma \end{cases} \quad (5)$$

Тогда:

$$y = \pm \sqrt{\frac{\left(x + \frac{L \cdot R_0}{R_0 - r_0} \right)^2}{\frac{L^2}{(R_0^2 - r_0^2)^2}} - z^2} \quad (6)$$

Получим:

$$\left[x - r \cos \varphi - \left(\left(R_0 - \frac{R_0 - r_0}{L} \varepsilon \right) \cos \omega - t \right) \operatorname{tg} \varphi - r \cdot \operatorname{ctg} \gamma \cdot \sin \varphi \right]^2 + \left[z + \left(R_0 - \frac{R_0 - r_0}{L} \varepsilon \right) \sin \omega + \frac{r}{\sqrt{1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \omega}{\sin^2 \varphi}}} \right]^2 = \left[\sqrt{\frac{\left(x + \frac{L \cdot R_0}{R_0 - r_0} \right)^2}{L^2} - z^2 + r \cdot \sin \varphi - \frac{\left(R_0 - \frac{R_0 - r_0}{L} \varepsilon \right) \cos \omega + t - r \cdot \operatorname{ctg} \gamma \cdot \cos \varphi}{(R_0 - r_0)^2}} \right]^2 \operatorname{tg}^2 \gamma \quad (7)$$

Площадь поверхности среза инструментом за один проход определяется по формуле:

$$S = \int_{R_0}^{r_0} dy \int_0^{x_1} \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dz}{dy} \right)^2} dx \quad (8)$$

Окончательно площадь срезаемого слоя металла при обработке конической поверхности можно рассчитать по формуле:

$$S = \int_{R_0}^{r_0} dy \int_0^{x_1} \sqrt{1 + \frac{B_1(x) + B_2(y) \operatorname{tg}^2 \gamma}{B_2(y) - B_1(x)}} dx \quad (9)$$

Выводы

1. Выявлено, что к износу опорных деталей барабанов трубных мельниц, приводят отступления от технологических процессов изготовления деталей, ошибки, связанные с монтажными работами агрегатов, работа оборудования в агрессивной абразивной среде, вибрации, несоответствие металла требованиям конструкторской документации.

2. Установлено, что одним из оптимальных вариантов ремонта, является восстановление работоспособности таких агрегатов в процессе эксплуатации оборудования.

3. Установлено, что на основании анализа изменения геометрических размеров, нарушения конструктивных и технологических параметров рабочих поверхностей, величины биения в сопряжениях появляется возможность прогнозирования времени и объема ремонтных работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Маркова О.В., Антонов С.И. Технологии ремонта некоторых узлов вращающихся цементных печей и их модернизация // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 5. С. 193–197.
2. Банит Ф.Г., Крижановский Г.С., Якубович. Б.И. Эксплуатация, ремонт и монтаж оборудования промышленности строительных материалов. М.: Стройиздат, 1971. 368 с.
3. Боганов А.И. Механическое оборудование цементных заводов. М.: Машгиз, 1961. 384 с.
4. Вальтер Г.Д. Цемент. М.: Стройиздат, 1982. 464 с.

5. Дроздов Н.Е. Эксплуатация, ремонт и испытание оборудования строительных материалов. М.: Высшая школа, 1979. 312 с.

6. Бестужева О.В., Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А. Экспериментальное исследование восстановления поверхности вращения крупногабаритных деталей промышленного оборудования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 122–127.

7. Банит Ф.Г., Нивицкий О.А. Механическое оборудование цементных заводов. М.: Машиностроение, 1975. 318 с.

8. Сапожников М.Я. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. М.: Высшая школа, 1971. 311 с.

9. Пат. 89830, Российская Федерация, МПК7 В23В5/00. Станок для обработки внутренних поверхностей цапф помольных мельниц / Т.М. Санина, Ю.А. Бондаренко, М.А. Федоренко; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова; №2009132048/22; заявл. 25.08.2009, опубл. 20.12.2009, Бюл. № 35. 1 с.

10. Fedorenko M.A., Bondarenko J.A., Pogonin A.A. Impact of oscillations of shafts on machining accuracy using non-stationary machines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Processing Equipment. 2018. Vol. 327 (4). 042030. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042030

11. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Погонин А.А., Бестужева О.В. Обеспечение точности при сверлении отверстий во фланцевых соединениях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 5. С. 104–110. DOI:10.12737/article_5af5a7330752d2.61639267

12. Ермаков Ю.М. О развитии способов ротационного резания. М.: ВНИИТЭМР, 1989. 56 с.

13. Землянский В.А. Геометрия износа режущей кромки ротационного резца. // Сб. «Резание и инструмент». Вып. 3. Харьков. Изд-во ХГУ. 1970. С. 3–4.

14. Ящерицын П.И., Борисенко А.В., Дригвин И.Г., Лебедев В.Я. Ротационное резание материалов. Минск.: Наука и техника, 1987. 228 с.

15. Ящерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в

машиностроении. Минск.: Наука и техника, 1977. 255 с.

Информация об авторах:

Бестужева Ольга Васильевна, кандидат технических наук, доцент. Email: bestuzheva@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

Бондаренко Юлия Анатольевна, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения. E-mail: kds2002@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Баранов Денис Сергеевич, ассистент кафедры технологии машиностроения. E-mail: den-3218@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Романович Алексей Алексеевич, профессор, доктор технических наук кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: Alexejrom@yandex.ru, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 27.08.2024 г.

© Бестужева О.В., Бондаренко Ю.А., Баранов Д.С., Романович А.А., 2024

^{1,*}*Bestuzheva O.V.*, ²*Bondarenko Yu.A.*, ²*Baranov D.S.*, ²*Romanovich A.A.*

¹*Belgorod State National Research University*

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

^{*}*E-mail: bestuzheva@bsu.edu.ru*

STUDY OF REPAIR RESTORATION OF SURFACES OF REVOLUTION OF VARIOUS CONFIGURATIONS OF LARGE DIAMETER

Abstract. The performance and reliability of units of particularly heavy equipment in the mining, quarrying, chemical and other industries depend on the accuracy and quality of equipment installation, preventive maintenance, detection of worn-out units and parts and their timely replacement. Tube mills are often used to grind raw materials. During operation, they cause increased wear of mating parts due to hereditary defects that occur as a result of violations in the execution of the technological process of shaft manufacturing, namely, machining of the critical surface - the cylindrical journal. In case of severe deformation of the cylindrical journal, it is necessary to replace the bearing unit and carry out repair work. To determine the parameters of rotary cutting, geometry and position of cutting tools, to identify analytical relationships between the technological conditions of processing and the operating modes subject to optimization, technical limitations are set when using non-stationary turning machines, the cutting area and the intersection line of the restored and tool surfaces are determined. A system of equations is provided that describes the intersection line of the surface of the restored part and the tool surface. The area of the surface cut by the tool in one pass is determined. The area of metal to be cut when processing a conical surface is calculated.

Keywords: cement industry, increasing equipment performance, wear of the journal of the tube mill shafts, rotary cutting parameters.

REFERENCES

1. Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A., Markova O.V., Antonov S.I. Repair technologies for some units of rotary cement kilns and their modernization [Tekhnologii remonta nekotorykh uzlov vrashchayushchihsy cementnykh pechej i ih modernizaciya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. No. 5. Pp. 193–197. (rus)

2. Banit F.G., Krizhanovsky G.S., Yakubovich B.I. Operation, repair and installation of equipment for the building materials industry [Ekspluatatsiya, remont i montazh oborudovaniya promyshlennosti stroitel'nykh materialov]. Moscow: Stroyizdat, 1971.

368 p. (rus)

3. Boganov A.I. Mechanical equipment of cement plants [Mekhanicheskoe oborudovanie cementnykh zavodov]. Moscow: Mashgiz, 1961. 384 p. (rus)

4. Walter G.D. Cement [Cement]. M.: Stroyizdat, 1982. 464 p. (rus)

5. Drozdov N.E. Operation, repair and testing of construction materials equipment [Ekspluatatsiya, remont i ispytanie oborudovaniya stroitel'nykh materialov]. Moscow: Higher School, 1979. 312 p. (rus)

6. Bestuzheva O.V., Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A. Experimental study of restoration of the surface of rotation of large-sized parts of industrial equipment [Eksperimental'noe issledovanie

vosstanovleniya poverhnosti vrashcheniya krupnogabaritnykh detalej promyshlennogo oborudovaniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 11. Pp. 122–127. (rus)

7. Banit F.G., Nivizhsky O.A. Mechanical equipment of cement plants [Mekhanicheskoe oborudovanie cementnykh zavodov]. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 318 p. (rus)

8. 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. 311 p. (rus)

9. Sanina T.M., Bondarenko Yu.A., Fedorenko M.A. Machine for processing internal surfaces of grinding mill journals. Patent RF, no. 2009132048/22, 2009.

10. Fedorenko, M.A., Bondarenko, J.A., Pogonin A.A. Impact of oscillations of shafts on machining accuracy using non-stationary machines. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Processing Equipment. 2018. Vol. 327 (4). 042030. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042030

11. Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A., Pogonin A.A., Bestuzheva O.V. Ensuring accuracy

when drilling holes in flange connections [Obespechenie tochnosti pri sverlenii otverstij vo flancevykh soedineniyah]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 5. Pp. 104–110. DOI:10.12737/article_5af5a7330752d2.61639267 (rus)

12. Ermakov Yu.M. On the development of rotary cutting methods. [O razvitii sposobov rotatsionnogo rezaniya]. Moscow: VNIITEMR, 1989. 56 p. (rus)

13. Zemlyansky V.A. Geometry of wear of the cutting edge of a rotary cutter. Collection "Cutting and Tool". [Geometriya iznosa rezhushchej kromki rotatsionnogo rezca. Sb. «Rezanie i instrument»]. Issue 3. Kharkov. Publishing house of Kharkov State University. 1970. Pp. 3–4. (rus)

14. Yashcheritsyn P.I., Borisenko A.V., Drivotin I.G., Lebedev V.Ya. Rotary cutting of materials [Rotatsionnoe rezanie materialov]. Minsk: Science and Technology, 1987. 228 p. (rus)

15. Yashcheritsyn P.I., Ryzhov E.V., Averchenkov V.I. Technological heredity in mechanical engineering. [Tekhnologicheskaya nasledstvennost' v mashinostroenii]. Minsk: Science and Technology, 1977. 255 p.

Information about the authors

Bestuzheva, Olga V. PhD. E-mail: bestuzheva@bsu.edu.ru. Belgorod State National Research University. Russia, 308015, Belgorod, Pobedy St., 85.

Bondarenko, Yulia A. DSc, Professor. E-mail: kds2002@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Baranov, Denis S. Assistant. E-mail: den-3218@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

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

Received 27.08.2024

Для цитирования:

Бестужева О.В., Бондаренко Ю.А., Баранов Д.С., Романович А.А. Исследование ремонтного восстановления поверхностей вращения различной конфигурации большого диаметра // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 12. С. 116–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-116-124

For citation:

Bestuzheva O.V., Bondarenko Yu.A., Baranov D.S., Romanovich A.A. Study of repair restoration of surfaces of revolution of various configurations of large diameter. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 116–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-116-124

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-125-141

Капырин К.И., Катунин А.А., Трясцин А.П.Мценский филиал Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева,***E-mail: kostik72@inbox.ru*

ВАЛКОВАЯ ШТАМПОВКА КАК МЕТОД ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Аннотация. Статья носит обзорный и ознакомительный характер, в ней приводится краткое описание наиболее известных (классических) методов интенсивной пластической деформации (ИПД) и метода валковой штамповки. Приводятся сведения, позволяющие в дальнейшем рассматривать валковую штамповку, как один из методов ИПД. Показаны отличия в реализации двух направлений валковой штамповки – с изменением формы и без изменения. Первое недостижимо практически ни одним из известных классических способов ИПД, которые могут применяться лишь для производства наноструктурированных заготовок будущих изделий. При упрочняющей валковой штамповке дробление зерна и высокий градиент напряжений достигается за счёт локализации очага пластической деформации в условиях гидростатического сжатия. Благодаря этому оказывается возможным получение заданных градиентных механических свойств и ультрамелкозернистой структуры. Этим способом можно упрочнять цилиндрические наружные и/или внутренние поверхности деталей с созданием в них градиентной ультрамелкозернистой структуры.

Называются некоторые причины, как вполне очевидные, так неочевидные, сдерживающие широкое практическое применение технологий ИПД. Первые связаны со сложностью технической реализации, к числу вторых авторы статьи относят необходимость качественного пересмотра технико-экономической концепции производства и коммерческой реализации.

Во второй части статьи даётся краткое описание методики корректного определения закона упрочнения при ИПД, учитывающего влияние полос сдвига на макроуровне.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, валковая штамповка, упрочнение, ультрамелкозернистая структура, закон упрочнения при ИПД, полосы сдвига.

Введение. Под интенсивной пластической деформации (ИПД) понимается создание наноструктурированных и ультрамелкозернистых металлических структур повышенной прочности, многократно превышающей исходную (при использовании ИПД-обработки может быть увеличена в несколько раз). Вместе с прочностью повышаются и другие важные механические характеристики (ударная вязкость, выносливость и т.д.), но пластичность, в подавляющем большинстве случаев, уменьшается. При обработке в холодном состоянии падает электропроводность и снижается коррозионная стойкость.

Основное развитие технология ИПД получила лишь в начале 90-х в Уфе, когда на одной международной научной конференции была показана возможность создания ультрамелкозернистых структур способом равноканального углового прессования (РКУ) [1]. Результаты оказались известны широкой публике и началось бурное развитие данной технологии. Тогда, в середине 90-х годов была создана совместная британо-японская лаборатория по исследованию технологии кручения под высоким давлением (КВД), или иначе "Интенсивная пластическая деформация кручением" (ИПДК), и других способов ИПД. Возглавил лабораторию проф. Лонгдон (Langdon T.G.). Впоследствии был образован и международный

комитет по ИПД, возглавляемый проф. Р.З. Валиевым, который почти 30 лет назад и задал главный импульс всему направлению. Со временем появились способы винтовой экструзии (ВЭ), метод «Песочные часы» (ПЧ), многократная всесторонняя ковка (ВК), аккумулирующая (или связывающая) прокатка (СП), многократный изгиб с выпрямлением (МИВ), различные модификации, например, «Конформ» (*Conform*), представляющая собой комбинацию РКУ с прокаткой, прессованием или выдавливанием (экструзией). Интересным выглядит способ, совместно предложенный уфимскими учёными из УГАТУ и УФИЦ РАН, сочетающий в себе аккумулирующую прокатку и кручение под высоким давлением, получивший название «Аккумулирующая интенсивная пластическая деформация кручением» [2; 3]. По сравнению с общеизвестным КВД этот способ позволяет получить значительно большее измельчение зерна, вплоть до получения ОМС-структур (объёмное металлическое стекло). По определённым причинам этот способ пока не получил должного внимания со стороны исследователей. К технологиям ИПД относят также многократно повторяющееся выдавливание в закрытом штампе из цилиндрической заготовки по схеме «заготовка – стакан – стержень – заготовка...» [4, 5], но этот метод не нашёл пока широкой известности у исследователей. Сущность основных (классических)

способов ИПД (рис. 1) представлена в целом ряде работ, например, в обзорах [6, 7].

На рис. 2 показаны детали, полученные с применением различных методов ИПД. Это спецкреплёж из стали, титановых и алюминиевых сплавов

(а, б, в), медицинские наноструктурированные импланты (г), втулки из углеродистой стали (д), поршни из наноструктурированного алюминиевого сплава (е).

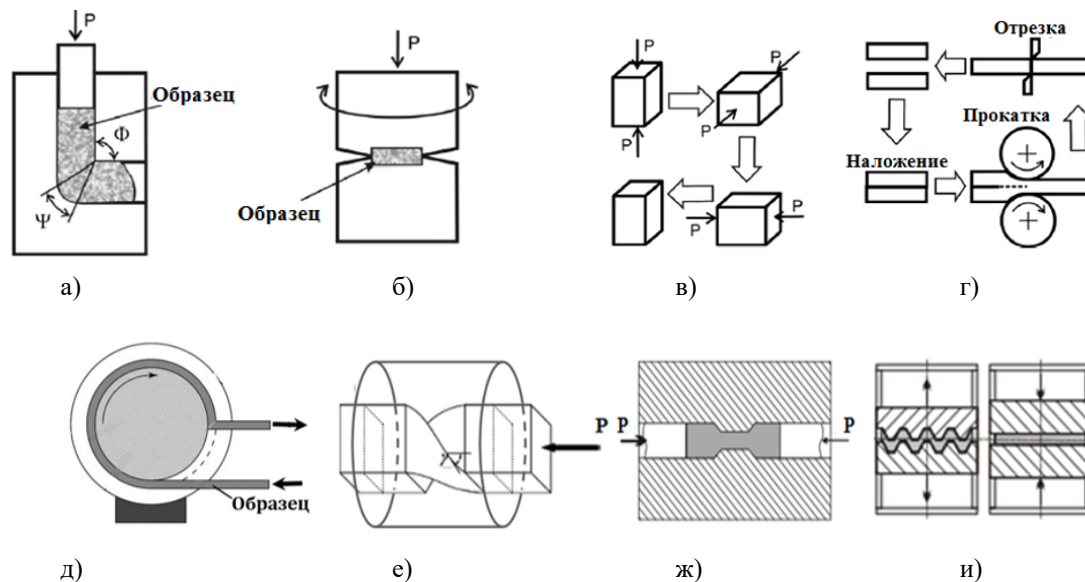


Рис. 1. Схемы классических процессов ИПД [6, 7]:

а) Равноканально-угловое прессования, б) кручение под высоким давлением, в) связывающая прокатка, г) метод «Конформ», д) винтовая экструзия, е) метод «Песочные часы», ж) многократный изгиб с выпрямлением

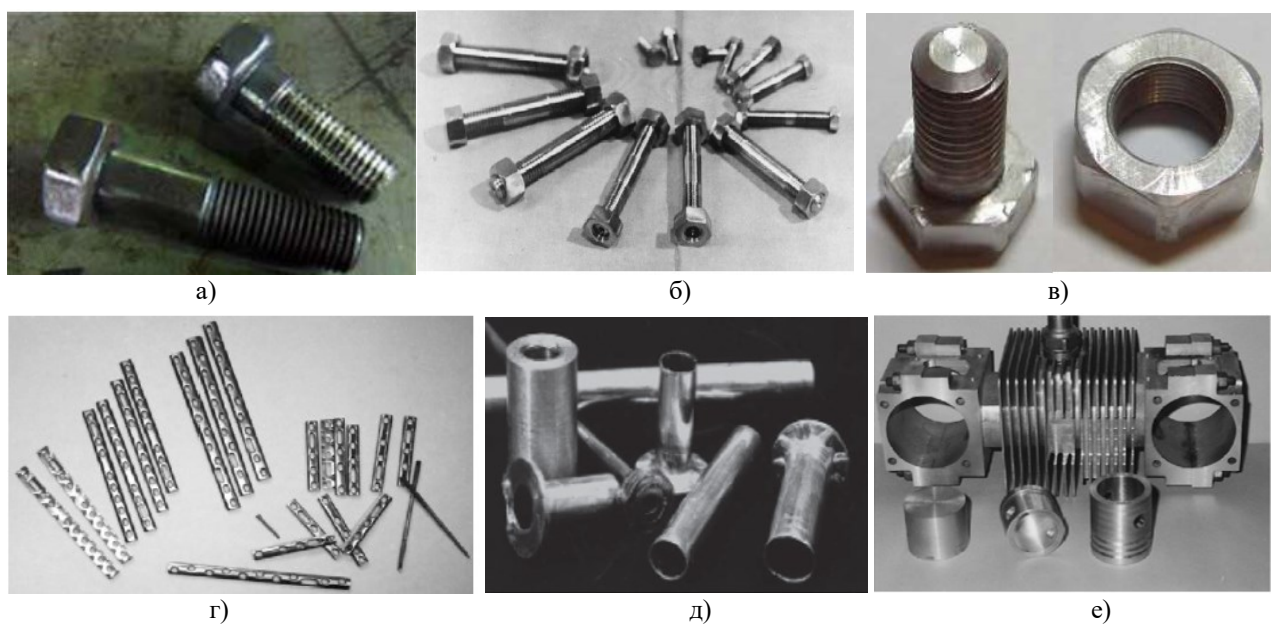


Рис. 2. Детали с УМЗ структурой, полученные ИПД-обработкой:

а) высокопрочный крепеж из титанового сплава [8], б) болты с классом прочности 6.6 и 8.8 из сталей 20 и 45 [9], в) спецкреплёж из сплава АД1 [4], г) импланты конструкции корсета позвоночника из чистого наноструктурированного титана [10], д) втулки из углеродистой стали [11], е) поршни из алюминиевого сплава Al-Mg-Li [12]

Несмотря на достоинства на первый взгляд может показаться, что при всех преимуществах ИПД её широкое практическое применение станет обычным делом, чего, однако, пока не случилось. Подробно останавливаться на причинах этого в

данной статье мы не будем. Можно лишь указать на главные из них: во-первых, для получения градиентной ультрамелкозернистой структуры с высокими прочностными показателями требуется создание очень высоких давлений (до 5-6 ГПа и

выше), что значительно увеличивает нагрузку на инструмент и приводит к его быстрому износу, во-вторых, отсутствие доступной и удобной технической литературы не позволяет инженерам разрабатывать конкретные технологические процессы, и в-третьих, необходим качественный пересмотр всей технико-экономической концепции производства и коммерческой реализации подобных изделий. Ещё одно препятствие связано с нежеланием или боязнью производителей менять давно отлаженные технологические цепочки. На сегодняшний день практическое применение технологии ИПД нашли лишь электротехнической промышленности для изготовления медных шин и кабелей методом «Конформ» и в медицине: наноструктурированные импланты (зубные, позвоночные и др.) обладают лучшей приживляемостью в организме человека.

Основная часть. Наряду с уже ставшими традиционными существуют и другие, менее известные для широкого круга исследователей способы ИПД. Одним из них является *валковая штамповка* (ВШ). Метод основан на совмещении двух процессов: монотонного осевого сжатия и обкатки боковой поверхности роликами

или приводными валками [13, 14, 15]. В результате такого нагружения создаётся комплексное локальное воздействие на очаг пластической деформации, значительное гидростатическое сжатие в деформируемом (локализованном) объёме и высокий градиент напряжений.

Валковая штамповка делится на два направления и может быть формоизменяющей и упрочняющей. Схемы осуществления представлены на рис. 3.

Формоизменяющая валковая штамповка (слева) позволяет изготавливать практически готовые осесимметричные детали (типа стаканов, втулок и т.п.) минуя стадию ИПД-обработки исходной заготовки традиционными методами. Это недостижимо практически ни одним из известных классических способов ИПД (за исключением многократного выдавливания, [4, 5]), которые могут применяться лишь для производства наноструктурированных заготовок будущих изделий, а не самих изделий. Получение градиентной микроструктуры создаётся за счёт многоциклового локальной обработки боковой поверхности изделия за один проход пуансона прошивки.

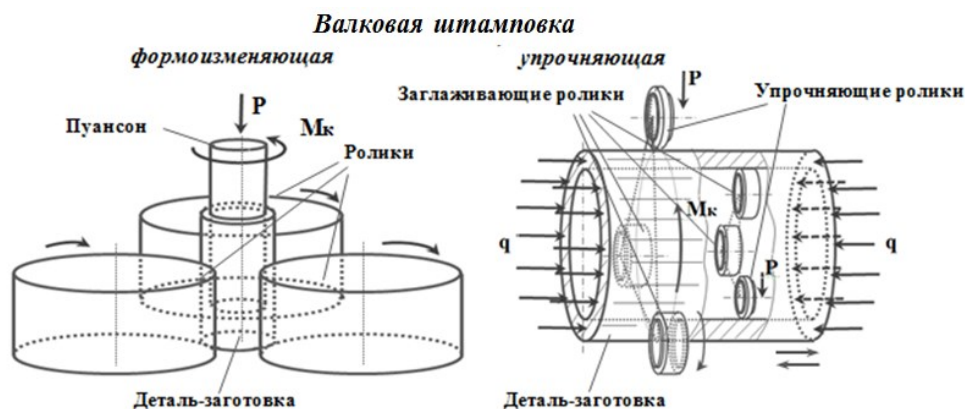


Рис. 3. Схемы валковой штамповки

Исходная заготовка, цилиндр, устанавливается в роликовую матрицу, включается привод вращения пуансона и нижней опоры, на которую опирается заготовка, а формообразование осуществляется при одновременном действии двух процессов – прошивки и поперечной прокатки. В случае осуществления привода вращения не от пуансона и упора, крутящий момент прикладывается к боковой поверхности заготовки приводными валками, при этом напряжённо-деформированное состояние таких процессов будет отличаться [15].

Фото экспериментальных образцов, полученных формоизменяющей ВШ показаны на рис. 4, а, д. Для образцов, изображённых на рис. 4 размеры составляют:

а) диаметр заготовки – 25 мм, диаметр пуансона – 20 мм, высота заготовки – 30 мм, высота детали – 75 мм;

б, в, г) диаметр заготовки – 30 мм, диаметр пуансона – 22 мм, высота заготовки – 32 мм, высота фланца – 15 мм;

д) диаметр заготовки – 30 мм, диаметр пуансона – 22 мм, ролики с калибрующим участком в верхней части.

При использовании способа многократного выдавливания в закрытых штампах по маршруту "стакан – стержень – цилиндр – стакан – стержень – ... и т.д.) [4, 5] также возможно получение подобных деталей (рис. 5), однако, в отличие от валковой штамповки для получения мелкозернистой структуры здесь требуется много большее количество проходов. К тому же, очевидно, что

деформирующее усилие будет значительно выше: ориентировочно в пять-шесть раз (рис. 6).

Давление гидростатического сжатия, соответственно, так же.

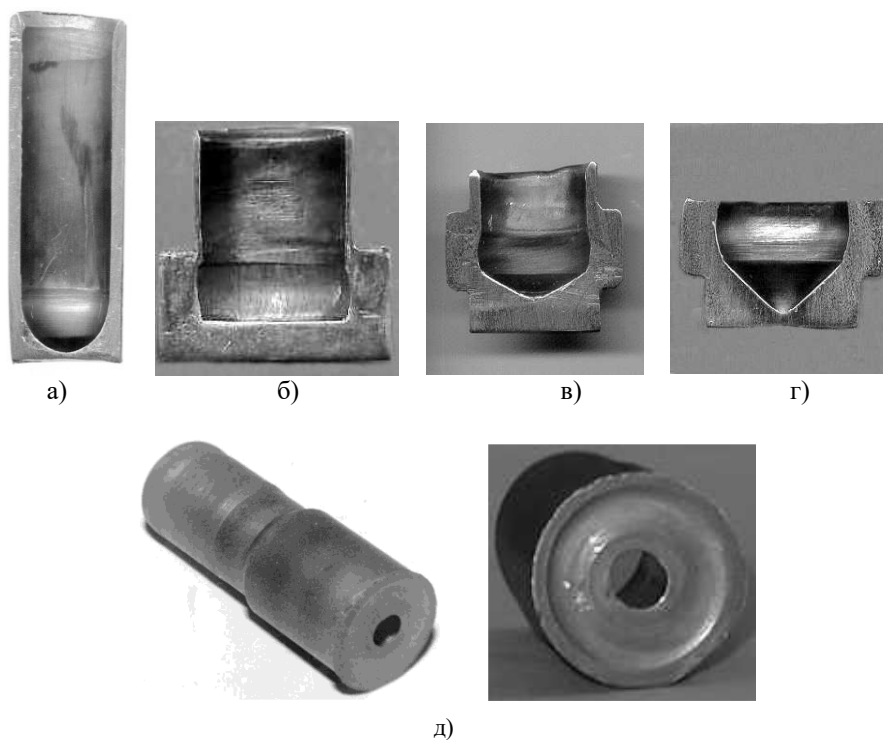


Рис. 4. Образцы деталей, полученные формоизменяющей валковой штамповкой за один переход: а) стакан с высокой стенкой, б, в, г) с фланцем, д) со сквозным осевым отверстием [14]



Рис. 5. Образец, подвергнутый обработке методом многократного выдавливания [4, 5]: а) исходная заготовка, б) стакан, в) стержень с утолщением (получен из б); г) образец, полученный после завершения цикла выдавливания (приобретает форму исходной заготовки)

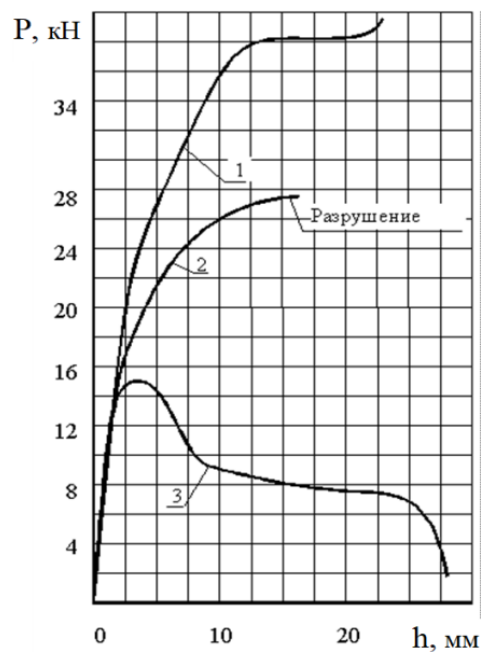


Рис. 6. Диаграммы нагружения [16]:

- 1) при обратном выдавливании,
- 2) при открытой прошивке,
- 3) при формоизменяющей валковой штамповке

Фото образца (рис. 4, д) иллюстрирует возможность получать на одной позиции обработки детали со сквозным осевым отверстием за счёт утяжки материала под действием радиальных

растягивающих напряжений. Подробно вопрос рассмотрен в [15, 17]. Схема процесса показана на рис. 7.

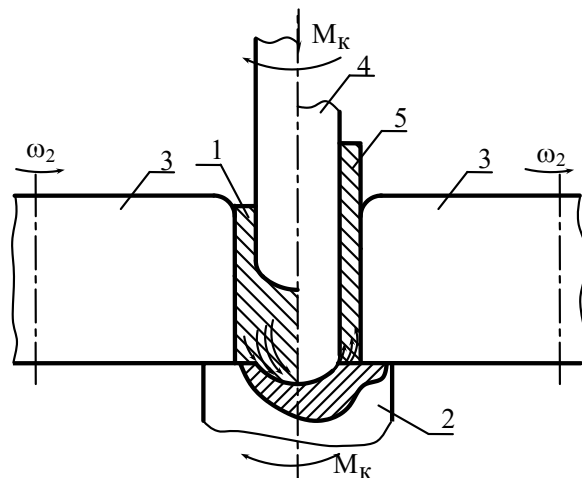


Рис. 7. Схема к способу штамповки деталей со сквозным осевым отверстием:
1) заготовка в начальный деформирования, 2) упор с глухой сферической полостью,
3) ролики, 4)) пуансон, 5) заготовка в конечный момент деформирования

Для изготовления ступенчатых деталей и втулок со сквозным осевым отверстием были предложены способы, представленные на рис. 8, 9 (защищены патентами Российской Федерации). Сущность способа штамповки ступенчатых деталей (рис. 8), заключается в поэтапном формировании боковой поверхности заготовки сначала в

черновом, а затем и в чистовом калибре роликовой матрицы [18]. Особенностью второго способа является то, что штамповка ведётся от прутка (рис. 9), а разделение материала происходит в опасном сечении в кольцевой части за счёт рассогласования скоростей вращения прутка и инструмента [19].

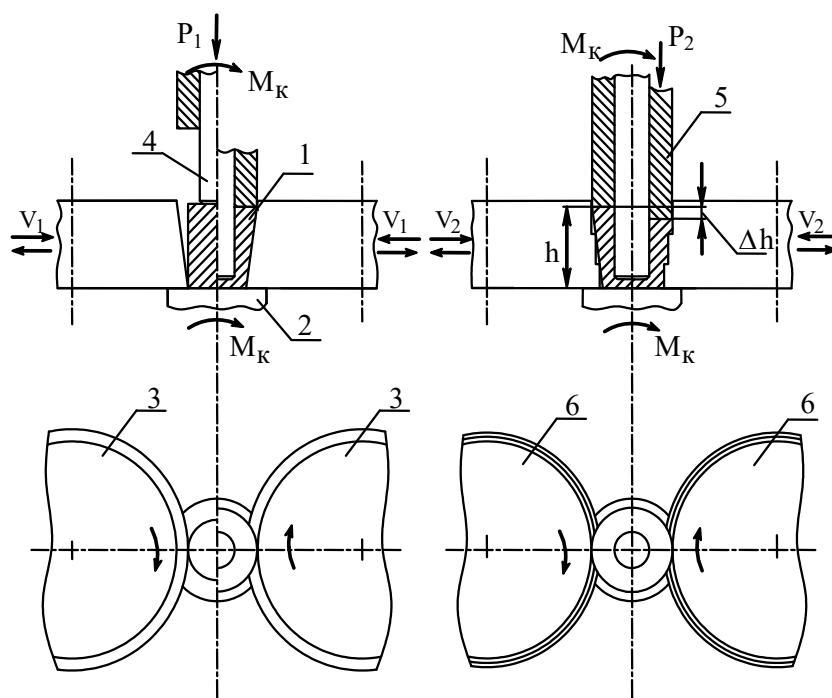


Рис. 8. Схема к способу валковой штамповки ступенчатых деталей в роликовой матрице:
1) заготовка, 2) упор, 3) ролики чернового калибра, 4) прошивной пуансон, 5) пуансон осадки,
6) ролики чистового калибра

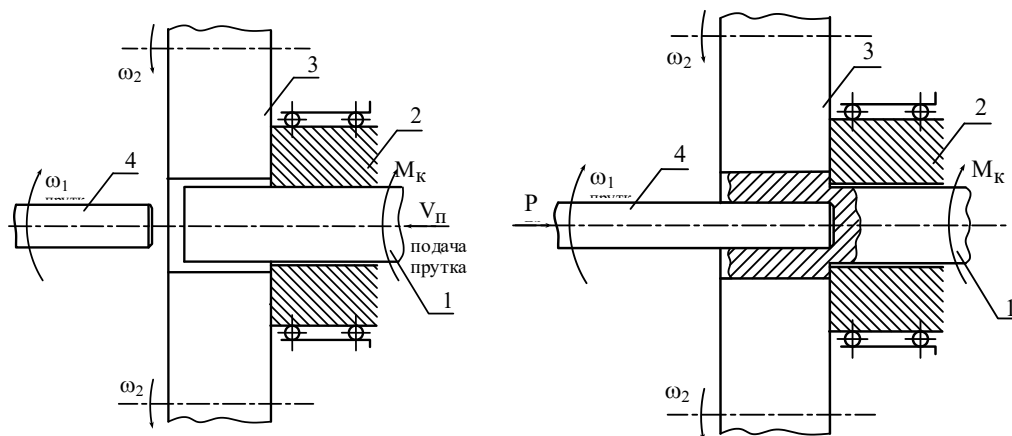


Рис. 9. Схема к способу валковой штамповки заготовок со сквозным осевым отверстием от прутка

Упрочняющая валковая штамповка. В общем виде схема показана на рис. 3 справа. Обработка может осуществляться как по наружной [20, 21], так и по внутренней поверхности [22, 23]. Упрочняющий ролик является основным инструментом, служащим для изменения микроструктуры. Заглаживающие ролики (один или два) предназначены

для выглаживания образовавшейся волны. При этом минется знак деформации и обеспечивается полный цикл растяжения-сжатия за один оборот (в локальной зоне). Схема деформации показана на рис. 10 [15, 24].

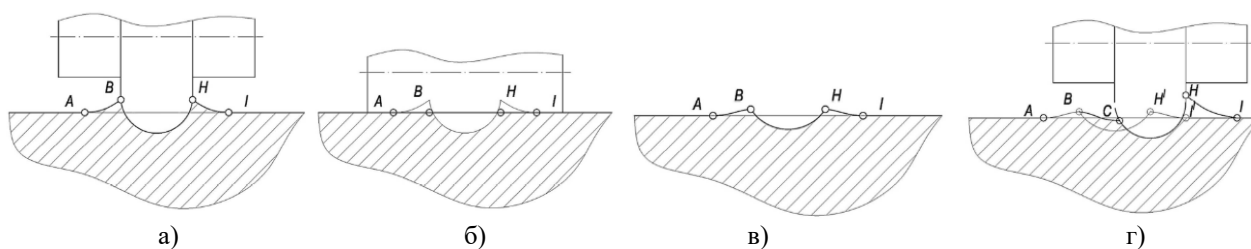


Рис. 10. Деформация поверхности детали на основных стадиях упрочняющей валковой штамповки [24]:

а) внедрение деформирующего ролика, б) деформирование заглаживающим роликом, в) отвод заглаживающего ролика, г) внедрение деформирующего ролика со смещением на величину шага подачи

Поверхность формируется многократным возвратно-поступательным осевым перемещением роликов вдоль образующей. На первой стадии (а) происходит накатывание деформирующего ролика с образованием задней АВ и фронтальной волны НІ. Затем происходит накатывание и отвод заглаживающего ролика (б, в) с упругой разгрузкой. Полного восстановления образующей поверхности не происходит. Стадия (г) иллюстрирует накатывание деформирующего ролика на новое сечение со смещением на величину шага подачи.

Эффект упрочнения может носить как поверхностный, так и объёмный характер. Этим способом можно упрочнять цилиндрические наружные и/или внутренние поверхности деталей с созданием по сечению заданной градиентной ультрамелкозернистой структуры (УМЗ). Дополнительным условием служит наличие осевой сжимающей силы q , благодаря которой может возникать высокий градиент напряжений и интенсивное измельчение зерна за счёт одновременного воздействия этой силы и локализации

очага пластической деформации, обеспечивающих гидростатическое сжатие в зоне обработки. Такая схема нагружения представляет собой ИПД в "чистом виде".

Схема нагружения с осевым сжатием представляет собой перспективное, и пока неизученное направление валковой штамповки. В работе [7] отмечается высокий потенциал и перспектива подобных подходов. В частности, там говорится о возможности достижения значения параметра Одквиста до $\varepsilon=20$ и выше. Есть предположение, что при таком способе нагружения становится возможным практически неограниченный монотонный его рост без выхода на плато с получением ультрамелкозернистой структуры со сверхмалыми размерами зёрен, соизмеримыми с КВД (ИПДК), т.е. порядка 100 нм. Ф.З. Утяшев объясняет это влиянием масштабного фактора: чем меньше очаг деформации при ИПД, тем более глубокое измельчение достигается в заготовке [25].

Фото экспериментальных образцов, полученных упрочняющей ВШ, показаны на рис. 11.

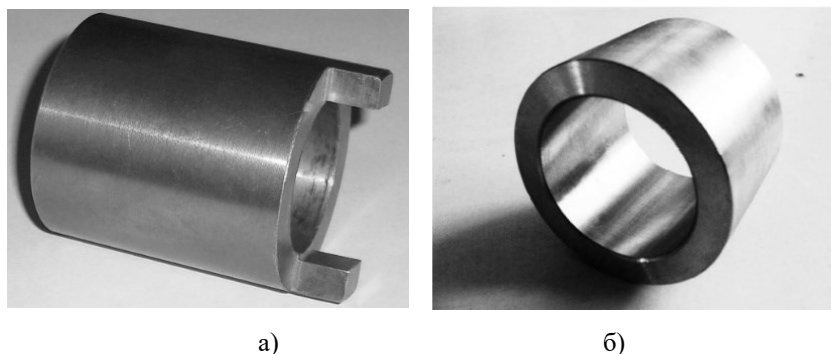


Рис. 11. Образцы деталей, полученные упрочняющей валковой штамповкой [15]:
а) обработка по наружной поверхности, б) обработка по внутренней поверхности

Для получения заготовок и деталей с УМЗ-структурой был предложен целый ряд различных

способов, два из них представлены на рис. 12 (защищены патентами Российской Федерации).

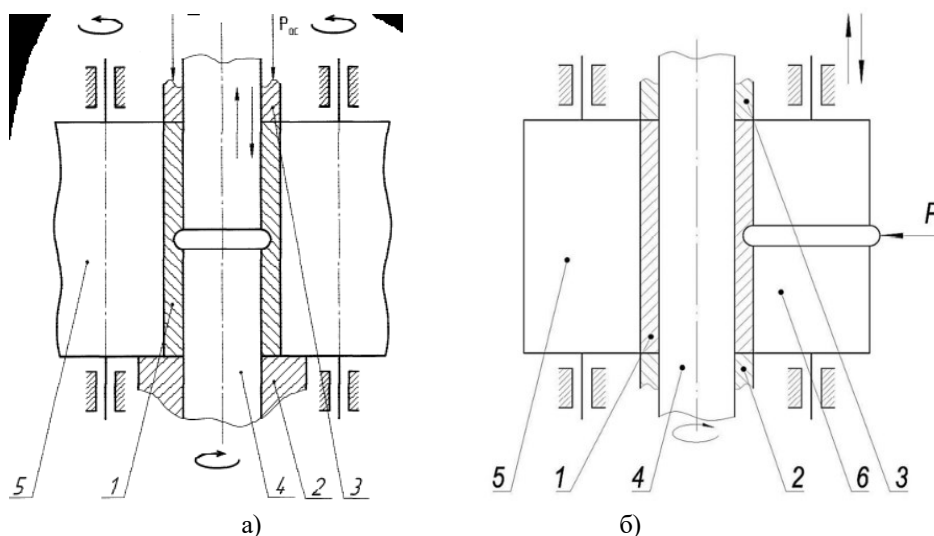


Рис.12. Схемы упрочнения втулок:
а) по внутренней поверхности [26], б) по внешней поверхности [27]

Цифрами обозначено: 1-заготовка (втулка), 2 и 3-упор и прижим; 4- оправка; 5-поддерживающий ролик, 6-деформирующий ролик.

Исследования упрочняющей валковой штамповки. Способ упрочнения с осевым сжатием (как на рис. 3 справа) также защищена патентом [28]. На рис. 13 представлена запатентованная схема обработки (а) и математическая модель процесса (б).

Цифрами на схеме (а) обозначено: 1-заготовка, 2-оправка, 3-упор, 4-прижим, 5-заглаживающий ролик, 6-деформирующий ролик. На схеме математической модели (б) обозначено: 1, 2, 3, 4 - внутренняя, внешняя и торцевые поверхности заготовки, 5- заглаживающий ролик, 6- деформирующий ролик.

Расчётная схема была составлена в соответствии с принципом деформации, представленном

на рис. 10. Моделирование осуществлялось методом конечных элементов в пакете прикладных программ «ШТАМП» [31]. По результатам моделирования авторами были построены кривые распределения микротвёрдости и проведено сравнение с данными эксперимента. В качестве объекта для исследования использовалась втулка из оловянистой литой бронзы Бр.ОЦС 5-5-5. Наружный диаметр – 70 мм, внутренний – 50 мм. Эксперимент и моделирование осуществлялись без осевого сжатия: давление осевого сжатия q (см. рис. 3 справа) – не прикладывалось. Обкатка осуществлялась по внутренней поверхности. Исходная заготовка – не отожжённая, средняя твёрдость в исходном состоянии $HV_{исх} = 112,3 \text{ кгс/мм}^2$.

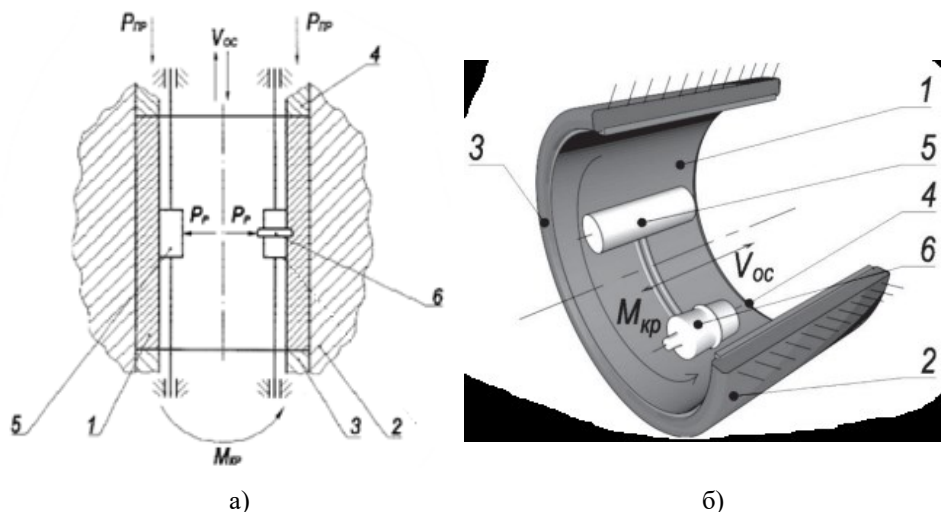


Рис. 13. Схема способа упрочнения с осевым сжатием:

а) защищённая патентом (а) [28] и б) математическая модель процесса [29, 30]

На рис. 14, а представлено распределение микротвёрдости при упрочняющей валковой штамповке в зависимости от числа проходов для оловянистой литой бронзы Бр.ОЦС 5-5-5 [29, 30, 32]. Видно, что даже в неотожжённом состоянии и без осевого сжатия, твёрдость повышается в 2,5 раза (после 30 проходов), что сопоставимо с другим, популярным у исследователей способом ИПД, кручением под высоким давлением (КВД). При этом отметим, что кручение под высоким давлением считается одним из тех способов ИПД, которые дают максимальное упрочнение. Промышленное применение этого способа маловероятно ввиду небольших размеров получаемых заготовок (до 20 мм в диаметре и 3-4 мм по толщине). Таким образом, роль и место валковой штамповки, как метода ИПД становится очевидной. На рис. 14, б показаны кривые распределения микротвёрдости при КВД в зависимости от числа проходов для литого алюминий-магниевого сплава $Al-3Mg-0,25Sc$ [33], на рис. 14, в – для оловянистой бронзы $Cu-1Sn$ [34]. Видно, что и кручение под высоким давлением и валковая штамповка показывают схожие результаты упрочнения. Это трёхкратное увеличение твёрдости при КВД сплава $Al-3Mg-0,25Sc$ после пяти оборотов (проходов). При тех же условиях твёрдость оловянистой бронзы марки $Cu-1Sn$ возрастает приблизительно в 3,6 раза.

Корректное определение закона упрочнения при ИПД

На сегодняшний день накоплен огромный багаж знаний по ИПД, основанных как на экспериментальных исследованиях, так и на теоретических, полученных, в основном, численным моделированием. Эксперимент, конечно, даёт полную и наиболее достоверную картину процесса, но отнимает много больше материально-технических ресурсов. Численное моделирование, хоть и требует много времени для расчёта, но отнимает

значительно меньше средств, особенно при проведении многофакторного эксперимента. И здесь хотелось бы отметить следующую проблему моделирования процессов ИПД – корректное задание начальных параметров.

Одной из важнейших входных характеристик является зависимость, описывающая закон упрочнения, или кривая упрочнения. Известно, что при холодной пластической деформации в некоторых материалах образуются такие дефекты поликристаллов, как мезо- и макрополосы, а также полосы сдвига, проявляющиеся на мезо- и макроуровне. Они не нарушают сплошности материала, но способствуют образованию и развитию трещин, что вызывает разупрочнение материала в конечной стадии деформации. Их зарождение и развитие происходит уже на начальном этапе деформации [35]. Так, например, при осадке литой заготовки из сплава Бр.ОЦС 5-5-5 интенсивность деформации достигает насыщения при $\epsilon = 0,6$ (рис. 15, а), после чего образование мезополос носит уже необратимый характер и при $\epsilon = 0,9$ происходит разрушение. На рис. (рис. 15, б) показана фотография микроструктуры с ярко выраженными структурами мезополос сдвига в разрушенном образце.

В условиях ИПД образование мезополос подавляется высокими значениями гидростатической компоненты тензора напряжений и разупрочнения не происходит. Следовательно, использование для численного моделирования "обычных" кривых упрочнения (например, по результатам теста на осадку), внесёт ошибку в расчёт уже на стадии подготовки входных данных. Поэтому необходимо как-то учесть вклад, который дают эти структурные образования и "вычесть" их действие из кривой упрочнения, т.е. учесть их вклад в суммарную накопленную деформацию.

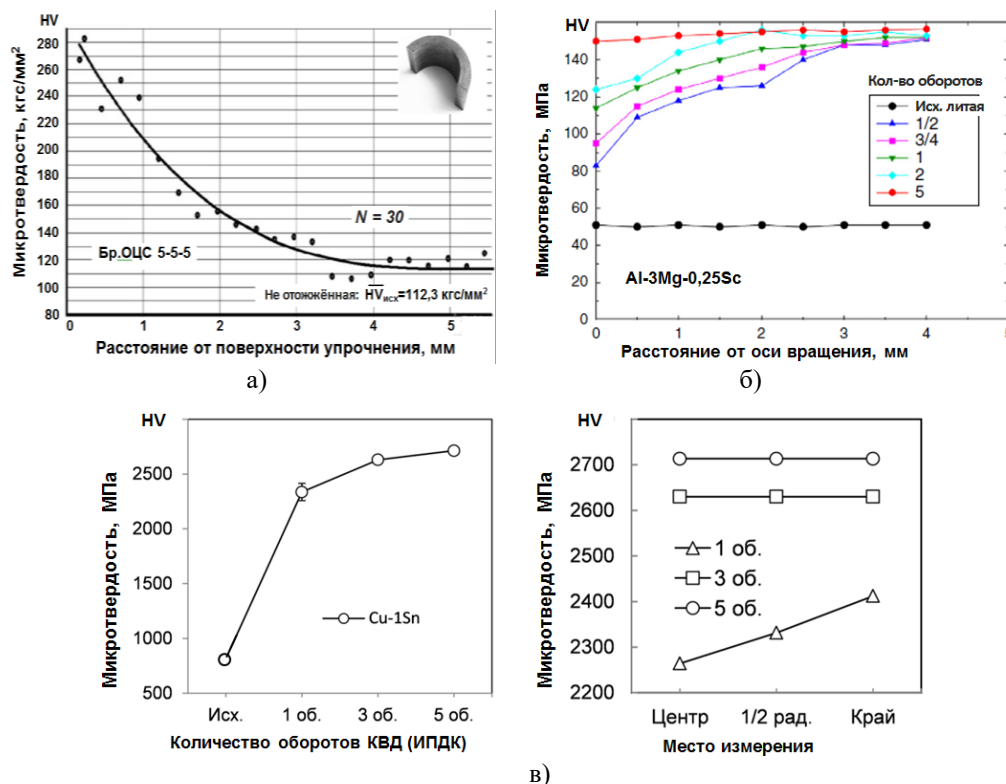


Рис. 14. Распределение микротвёрдости при упрочняющей валковой штамповке втулки (по внутренней поверхности) из неотожжённой бронзы марки Бр.ОЦС 5-5-5 после 30 проходов (а) [30], то же после КВД сплава $Al-3Mg-0,25Sc$ (б) [33] и отожжённой бронзы марки $Cu-1Sn$ (в) [34] в зависимости от числа проходов (оборотов)

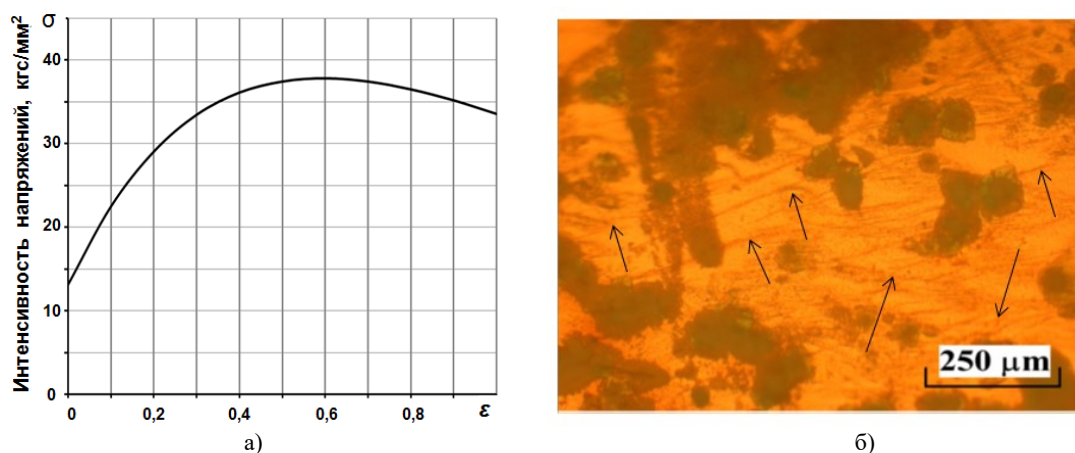


Рис. 15. Кривая упрочнения (а) [36] и мезополосы сдвига (б) [35], полученные при сжатии бронзы БрОЦС 5-5-5

В работах [35; 37] опубликовано подробное описание метода построения кривых упрочнения при ИПД. В настоящей работе приводится лишь краткое описание всех этапов построения. Сложность заключается в том, что в процессах ИПД накопленная деформация может достигать очень больших значений, что недостижимо при проведении стандартных испытаний (например, в тесте на осаживание). Другая сложность заключается в том, что деформация оказывается неоднородной и не поддаётся прямому измерению, по-

этому публикации по экспериментальным кривым упрочнения материалов в диапазоне сверхбольших деформаций практически отсутствуют.

Приведём краткое пошаговое описание предложенного метода. Он состоит из следующих этапов.

На первом этапе необходимо построить экспериментальную кривую $HV(\sigma)_{\text{эксп}}$. Для этого необходимо сначала построить (осадкой в условиях "нулевого" трения) кривую упрочнения $\sigma(\epsilon)$. Нивелировать действие трения можно одним из известных способов. Наиболее верным будет осу-

ществить осадку в несколько этапов. После каждого из которых нужно будет устранить бочкообразность и добиться тем самым однородной деформации. Тем же способом следует получить несколько промежуточных образцов. Строить кривые $\sigma(\varepsilon)$ для них нет необходимости, но требуется провести измерение микротвёрдости HV . По полученным данным строится экспериментальная кривая $HV(\sigma)_{\text{эксп}}$. Для этого потребуется подготовить микрошлифы исходного образца (ε_0), образцов осажённых с разной степенью деформации (промежуточных) и доведённого до разрушения при $\varepsilon = \varepsilon_{\text{max}}$. Затем нужно определить среднее значение $\overline{HV}$. Количество измерений микротвёрдости в

исследуемых образцах должно быть таким, чтобы свести к минимуму значение среднеквадратичного отклонения от $\overline{HV}$. После чего можно построить экспериментальный график зависимости $HV(\sigma)_{\text{эксп}}$, рис. 16.

На втором этапе по результатам теста на осадку строится начальный участок истинной ИПД-кривой упрочнения $\sigma(\varepsilon)$ с "вычетом" вклада мезополос. Для этого на поле графика экспериментальной кривой $HV(\sigma)_{\text{эксп}}$ нужно построить пробную кривую $HV(\sigma)_{\text{проб}}$.

Для вычисления значений $HV(\varepsilon)$ используем следующую формулу [38]:

$$HV(\varepsilon) = 0,3132 \cdot [\sigma(\varepsilon) + \sigma(\varepsilon + 0,3)] \cdot [1 + \ln[E \cdot \text{tg } 22^\circ / (3\sigma(\varepsilon))]] \quad (1)$$

Необходимо подобрать такие значения напряжений и соответствующих им деформаций, которые дадут значения $HV(\sigma)$, максимально точно повторяющие кривую микротвёрдости $HV(\sigma)_{\text{эксп}}$.

Если эти кривые ложатся друг на друга, или окажутся близки, то значения $\sigma(\varepsilon)$ в формуле (1) были выбраны верно. Тогда можно переходить к построению начального участка истинной ИПД-

кривой упрочнения $\sigma(\varepsilon)$ по координатам произвольно заданных значений деформаций ε в интервале от ε_0 до ε_{max} и соответствующих им произвольно заданных значений напряжений σ . Если это не так (см. рис. 16), то пробная гипотетическая кривая не соответствует экспериментальной и требуется выполнить подгонку или подобрать значения $\sigma(\varepsilon)$ методом перебора. Описание подгонки здесь не приводится (подробно см. в [37]).

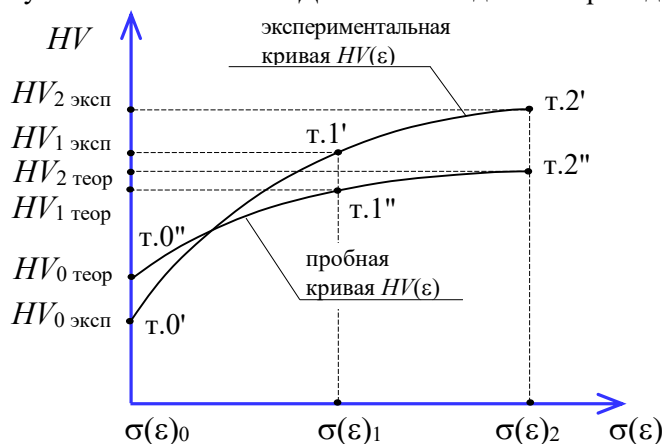


Рис. 16. Пробная $HV(\sigma)_{\text{теор}}$ и экспериментальная $HV(\sigma)_{\text{эксп}}$ кривые, построенные на одном поле графика [37]

На третьем этапе строится конечный участок истинной ИПД-кривой упрочнения $\sigma(\varepsilon)$. Для построения конечного участка и построения полной истинной ИПД-кривой упрочнения необходимо выполнить любой экспериментальный тест на ИПД и обратное численное моделирование этого теста. Здесь также потребуется сделать микрошлифы образцов, измерить микротвёрдость и построить микропрофили HV . Затем необходимо выполнить обратное численное моделирование и по его результатам построить конечный участок кривой упрочнения. При этом нужно в точности воспроизвести все условия численного эксперимента в тесте на ИПД.

Пример истинной кривой упрочнения при ИПД показан на рис. 17.

Похожие исследования проводились несколько лет назад. По результатам анализа механических свойств при РКУ и ВЭ Л.С. Метлов и А.А. Давиденко построили обобщённую ИПД-кривую упрочнения для чистой меди [39] (рис. 18, а). В своей работе они не учитывали особенностей начального участка кривой упрочнения (этапа, на котором сказывается отсутствие мезополос сдвига при ИПД) и всё построение основывали на измерении накопленной микротвёрдости с пересчётом её в предел пластичности после достижения предельного состояния (проход №4 на рис. 18, б) в рамках созданной одним из этих авторов теории неравновесной эволюционной термодинамики (НЭТ), позволяющей учитывать

накопление микротрещин [40; 41]. Данная теория может быть использована при выполнении обратного численного моделирования теста на

ИПД на третьем этапе построения ИПД-кривой упрочнения по предлагаемому нами методу.

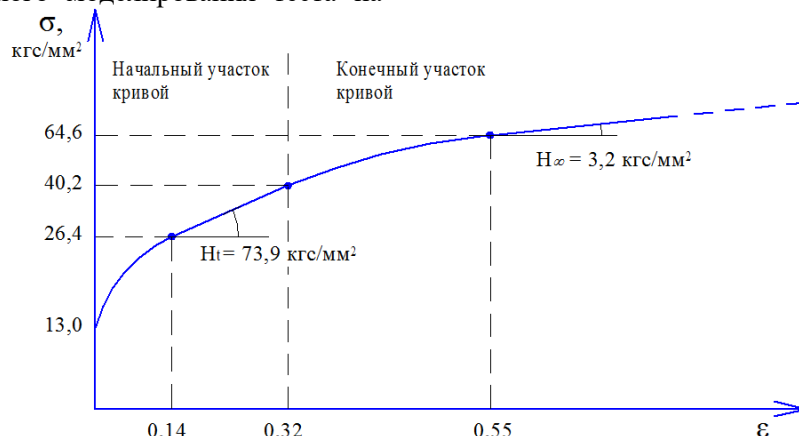


Рис. 17. Истинная ИПД-кривая упрочнения бронзы БрОЦС 5-5-5 при упрочняющей валковой штамповке без осевого сжатия [37]

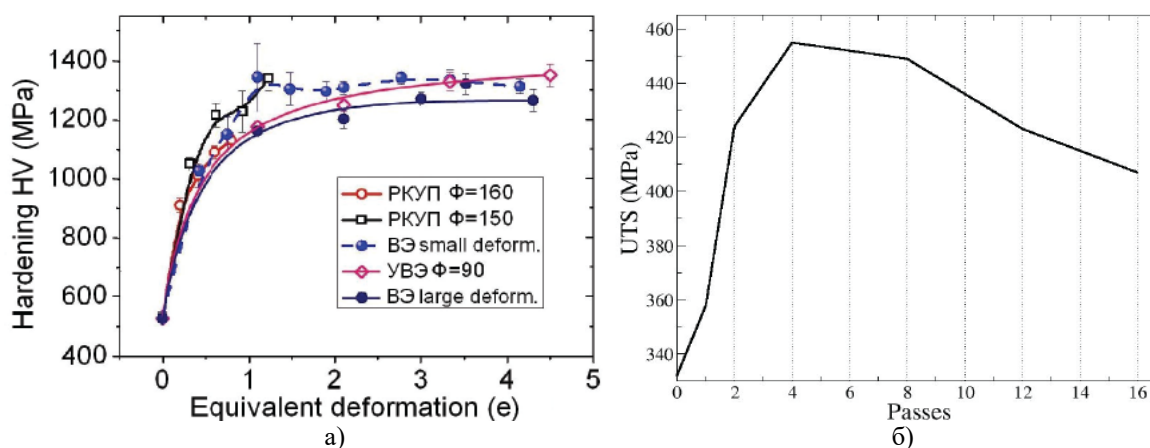


Рис. 18. Зависимости микротвёрдости от накопленной деформации (а), полученные при различных способах ИПД, и экспериментальное значение предела пластического течения (б)* в зависимости от числа проходов (обобщённая кривая ИПД) [39]

*ultimate tension stress (UTS) – предельное напряжение, МПа

Выводы.

1. Метод валковой штамповки занимает своё место среди процессов ИПД и имеет широкую перспективу исследования.

2. Локализация очага пластической деформации позволяет получить высокие значения гидростатического давления, необходимого для создания условий образования ультрамелкозернистых структур, в отсутствии приложения значительных сосредоточенных силовых воздействий на инструмент и заготовку.

3. В силу отмеченных достоинств метод может быть использован в промышленном производстве для изготовления осесимметричных деталей.

4. Предложенный метод определения истинного закона упрочнения имеет адекватное научное

обоснование, но требует проведения целого комплекса исследований: многофакторного эксперимента и численного моделирования. Считаем целесообразным провести такие исследования для всех типов ИПД-материалов, что позволит существенно повысить точность численного моделирования подобных процессов и снизить затраты эксперимента. Кроме того, появляется возможность получить подтверждение или опровержение гипотезы о существовании единой кривой упрочнения процессов ИПД.

Источник финансирования. Работа выполнена в ОГУ имени И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075-01466-23-07 на 2023 год и на плановый период 2024 и 2025 годов от 24.11.2023 г., проект № FSGN-2023-002 (1023082800024-8-1.3.2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Valiev R.Z., Krasilnikov N.A., Tsenev N.K. Plastic deformation of alloys with submicron-grained structure // *Materials Science and Engineering: A*. 1991. Vol. 137. Pp. 35–40. DOI: 10.1016/0921-5093(91)90316-F
2. Gunderov D.V., Churakova A.A., Astanin V.V., Asfandiyarov R.N., Hahn H., Valiev R.Z. Influence of high-pressure torsion and accumulative high-pressure torsion on microstructure and properties of Zr-based bulk metallic glass // *Materials Letters*. 2020. Vol. 261. Pp. 127000. DOI:10.3390/met10111433
3. Гундеров Д.В., Хасанова Д.А., Гундерова С.Д. и др. Аккумулирующая интенсивная пластическая деформация кручением // *Сборник трудов Открытой школы-конференции стран СНГ*. г. Уфа, 05–09 октября 2020. Уфа: РИЦ БашГУ. 2020. С. 27–29.
4. Утяшев Ф.З., Рааб Г.И., Валитов В.А. Деформационное наноструктурирование металлов и сплавов: монография. СПб.: Научное издание, 2020. 185 с.
5. Пат. 2189883, Российская Федерация, МКИ 7 В 21 J 5/00, 13/02, C 21 D 7/02. Способ пластического структурообразования металлов при интенсивной пластической деформации и устройство для его осуществления / В.Г. Шибаков, С.Н. Гончаров, М.В. Мухин. № 2001105055/02; заявл. 02.21.2001; опубл. 09.27.2002, Бюл № 2. 7 с.
6. Azushima A., Kopp R., Korhonen A., Yang D.Y., Micari F., Lahoti G.D., Groche P., Yanagimoto J., Tsuji N., Rosochowski A., Yanagida A. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2008. Vol. 57. Pp. 716–735. DOI:10.1016/j.cirp.2008.09.005
7. Estrin Y., Vinogradov A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: a wealth of challenging science // *Acta Materialia*. Vol. 61 (3). 2013. Pp. 782–817. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.10.038.
8. Zhernakov V., Yakupo R. Calculation of bolt and rivet type connections at high temperatures and dynamic loads. MAI Publisher. Moscow. 1997. 218 p.
9. Чукин М.В., Валиев Р.З., Рааб Г.И., Копцева Н.В., Юфимова Ю.Ю. Исследование эволюции структуры наносталей 20 и 45 при критических степенях пластической деформации // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2007. №4. С. 89–93.
10. Valiev R., Juster N., Rosochowski A. The new trends in SPD processing to fabricate bulk nanostructured materials // *Proceedings of the 9th International Conference on Material Forming ESAFORM: Publishing House Akapit*. April 2006. Pp. 1–9.
11. Faraji G., Torabzadeh H. An Overview on the Continuous Severe Plastic Deformation Methods // *Materials Transactions*. 2019. Vol. 60, No. 7. Pp. 1316–1330. DOI: 10.2320/matertrans.MF201905
12. Valiev R.Z., Korznikov A.V., Mulyukov R.R. Structure and Properties of Ultrafine-grained Materials Produced by Severe Plastic Deformation. *Materials Science and Engineering: A*. 1993. Vol. 168 (2). Pp. 141–148. DOI: 10.1016/0921-5093(93)90717-S
13. Голенков В.А., Радченко С.Ю. Технологические процессы обработки металлов давлением с локальным нагружением заготовки. М.: Машиностроение, 1997. 232 с.
14. Голенков В.А., Дмитриев, В.Д. Кухарь, С.Ю. Радченко, С.П. Яковлев, С.С. Яковлев. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением. М.: Машиностроение, 2004. 464 с.
15. Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О. Теория и технология валковой штамповки. М.: Издательский дом "Оружие и технологии", 2019. 323 с.
16. Голенков В.А., Радченко С.Ю., Капырин К.И. Особенности пластического формоизменения заготовок и анализ изменения рабочей нагрузки при валковой штамповке в зависимости от формы торца пуансона // *Механика деформированного твердого тела и обработка металлов давлением: Сб. научных трудов ТулГУ, Тула: ТулГУ. 2000. С.17–21.*
17. Радченко С.Ю., Капырин К.И. К вопросу о механизме образования сквозного осевого отверстия при валковой штамповке // *Механика деформированного твердого тела и обработка металлов давлением. Ч.2: Сб. научных трудов ТулГУ, Тула: ТулГУ. 2003. С. 96–101.*
18. Пат. 2102179, Российская Федерация, МКИ 4 В 21 К 21/08 В 21 Н 1/18. Способ изготовления осесимметричных изделий со ступенчатой наружной поверхностью / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, О.В. Дорофеев, К.И. Капырин. № 95119330/03; заявл. 16.11.95; опубл. 20.01.98, Бюл № 2. – 4 с.
19. Пат. 2102179, Российская Федерация, МКИ 4 В 21 К 21/08 В 21 Н 1/18. Способ изготовления полых осесимметричных деталей / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, О.В. Дорофеев, К.И. Капырин. №95119033/02; заявл. 9.11.95; опубл. 20.01.98, Бюл № 2. 4 с.
20. Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О. Формирование градиентных субмикро- и наноструктурных состояний комплексным локальным нагружением очага деформации // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2009. № 3 (51) С. 54–56.

21. Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Грядунов И.М. Создание градиентных наноструктур в осесимметричных изделиях // Наноинженерия. 2012. № 5. С. 18–22.
22. Радченко, С.Ю., Дорохов Д.О., Грядунов И.М. Экспериментальное исследование упрочняющей обработки внутренней поверхности вкладышей подшипников скольжения в условиях комплексного локального нагружения очага деформации // Мир транспорта и технологических машин. 2013. № 3 (42). С. 67–76.
23. Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Грядунов И.М. Новые технологические схемы упрочняющей обработки вкладышей подшипников скольжения в условиях комплексного локального нагружения очага деформации // Мир транспорта и технологических машин. 2014. № 4 (47). С. 47–54.
24. Грядунов И.М. Упрочнение деталей типа втулок интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс. Орел, 2013.
25. Утяшев Ф.З. Наноструктурирование металлических материалов методами интенсивной пластической деформации // Физика и техника высоких давлений. 2010. Том 20. № 1. С. 7–25.
26. Пат. RU 2387514. Способ получения металлических втулок с градиентной субмикронной и нанокристаллической структурой / Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О. Заявка № 2008146756/02 от 26.11.2008.
27. Пат. 2340423, МПК8 В 24 В 39/04. Способ получения металлических втулок / В.А., Голенков, В.Г. Малинин, С.Ю., Радченко, Г.П. Короткий, Д.О.Дорохов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ОрелГТУ». - № 2007110990/02; заявл. 26.03.2007; опубл. 10.12.2008, Бюл. №13.
28. Пат. RU 2462327 C2, 27.09.2012. Способ получения металлических втулок с градиентно-упрочненной структурой / Голенков В.А., Радченко С.Ю., Грядунов И.М. Заявка № 2010153917/02 от 27.12.2010.
29. Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Морев П.Г., Грядунов И.М., Голенков В.А. Математическая модель упрочняющей обработки внутренней поверхности деталей типа втулок интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения очага деформации // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. № 5 (301). С. 40–47.
30. Gryadunov I.M., Radchenko S.Yu., Dorokhov D.O., Morrev P.G. Deep hardening of inner cylindrical surface by periodic deep rolling-burnishing process // Modern Applied Science. 2015. Vol. 9. Pp. 251–258. DOI:10.5539/mas.v9n9p251
31. Канатников Н.В., Радченко С.Ю., Морев П.Г. Программа численного решения задач по обработке металлов методом конечных элементов / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018613471, 14.03.2018. Заявка № 2017663338 от 21.12.2017.
32. Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Грядунов И.М. Распределение микротвердости по сечению изделий при упрочнении в условиях комплексного локального нагружения // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 4 (324). С. 132–138.
33. Prabhakar Bhovi M., Patil Deepak C., Kori S.A., Venkateswarlud K., Huang Yi, Langdone Terence G. A comparison of repetitive corrugation and straightening and high-pressure torsion using an Al-Mg-Sc alloy // Journal of materials research technology. 2016. Vol. 5(4). Pp. 353–359. DOI: 10.1016/j.jmrt.2016.03.009
34. Столбовский А.В., Попов В.В., Попова Е.Н., Фалахутдинов Р.М. Влияние интенсивной пластической деформации методом кручения под высоким давлением на структуру и свойства меди и оловянистой бронзы // Diagnostics, resource and mechanics of materials and structures issue. 2017. Том 5. С. 13–22. DOI: 10.17804/2410-9908.2017.5.013-022
35. Morrev P.G., Капырин К.И., Kurdyumova L.N., Kulikov I. Yu., Tatarchenkov N.V., Gordon V.A. On construction of SPD stress-strain curve for bronze Cu85–Pb5–Sn5–Zn5 // Materials Science & Engineering: A. 2019. Vol. 764. Pp. 137889. DOI: 10.1016/j.msea.2019.05.020
36. Морев П.Г., Капырин К.И., Татарченков Н.В., Грядунов И.М. К вопросу об упрочнении с линейной материалов диаграммой сжатия // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 3 (323). С. 102–106.
37. Морев П.Г., Капырин К.И., Голенков В.А., С.Ю. Радченко, Дорохов Д.О. Построение кривых упрочнения в условиях интенсивной пластической деформации // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2022. № 3 (353). С. 43–53.
38. Giannakopoulos A.E., Larsson P.L., Vestergaard R. Analysis of Vickers indentation // International Journal of Solids and structures. 1994. Vol. 31. Pp. 2679–2708.
39. Метлов Л.С., Давиденко А.А. Анализ кривых упрочнения, полученных в процессе ИПД // Вестник ТГУ. 2013. Том18. №4. С. 1964–1965.
40. Metlov L.S. Formation of the internal structure of solids under severe load // Physical Review E.

2010. Vol. 81. 051121(9). DOI: 10.1103/PhysRevE.81.051121
 41. Metlov L.S. Nonequilibrium evolution thermodynamics of vacancies // Physical Review E. 2011. Vol. 106. 165506 (4). DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.165506

Информация об авторах

Капырин Константин Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерно-технических дисциплин. E-mail: kostik72@inbox.ru. Мценский филиал Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева. Россия, 303031, г. Мценск, ул. Тургенева, 196.

Катунин Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерно-технических дисциплин. E-mail: katunin57@gmail.com. Мценский филиал Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева. Россия, 303031, г. Мценск, ул. Тургенева, 196.

Трясцин Антон Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерно-технических дисциплин. E-mail: antondocent1968@mail.ru. Мценский филиал Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева. Россия, 303031, г. Мценск, ул. Тургенева, 196.

Поступила 03.11.2024 г.

© Капырин К.И., Катунин А.А., Трясцин А.П., 2024

***Kapyrin K.I., Katunin A.A., Tryashtsin A.P.**

Mtsensk Branch of the Oryol State University of I.S. Turgenev

**E-mail: kostik72@inbox.ru*

ROLL STAMPING AS AN SEVERE PLASTIC DEFORMATION METHOD

Abstract. This article is of an overview and introductory nature, it provides a brief description of the most well-known (classical) methods of intensive plastic deformation (SPD) and the roll forming method. Information is provided that allows further consideration of roller stamping as one of the methods of SPD. The differences in the implementation of two directions of roll forming are shown – with a change in shape and without a change. The first is unattainable by practically none of the known classical methods of SPD, which can only be used for the production of nanostructured blanks of future products. With hardening roll forming, grain crushing and a high stress gradient are achieved due to the localization of the focus of plastic deformation under hydrostatic compression conditions. Due to this, it is possible to obtain the specified gradient mechanical properties and ultrafine-grained structure. In this way, it is possible to strengthen the cylindrical outer and/or inner surfaces of parts with the creation of a gradient ultrafine-grained structure in them.

There are some reasons, both quite obvious and non-obvious, that constrain the widespread practical application of SPD technologies. The first are related to the complexity of technical implementation, the second is the need for a qualitative revision of the technical and economic concept of production and commercial implementation.

The second part of the article provides a brief description of the methodology for correctly determining the law of hardening in SPD, taking into account the influence of shear bands at the macro level.

Keywords: intensive plastic deformation, roll forming, hardening law, ultrafine grain, shear bands

REFERENCES

1. Valiev R.Z., Krasilnikov N.A., Tsenev N.K. Plastic deformation of alloys with submicron-grained structure. Materials Science and Engineering: A. 1991. Vol. 137. Pp. 35–40. DOI: 10.1016/0921-5093(91)90316-F
2. Gunderov D.V., Churakova A.A., Astanin V.V., Asfandiyarov R.N., Hahn H., Valiev R.Z. Influence of high-pressure torsion and accumulative high-pressure torsion on microstructure and properties of Zr-based bulk metallic glass. Materials Letters. 2020. Vol. 261. Pp. 127000. DOI:10.3390/met10111433
3. Gunderov D.V., Khasanova D.A., Gunderova S.D., et al. Accumulative severe plastic deformation by torsion [Akkumuliruyushchaya intensivnaya plasticheskaya deformatsiya krucheniem]. Proceedings by Open Conference of CIS countries. Ufa: Bashkir State University. 2020. Pp. 27–29. (rus)
4. Utiashev F.Z., Raab G.I., Valitov V.A. Deformation nano-structuring of metals and alloys [Deformacionnoe nanostrukturirovanie metallov i splavov: monographiya]. SPb.: Science intensive Technologies, 2020. 185 p. (rus)
5. Shibakov V.G., Goncharov S.N., Muchin M.V. A method of plastic structurization for metals under severe plastic deformation and proper device for the realization. Patent RF, no. 2189883, 2002.

6. Azushima A., Kopp R., Korhonen A., Yang D.Y., Micari F., Lahoti G.D., Groche P., Yanagimoto J., Tsuji N., Rosochowski A., Yanagida A. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2008. Vol. 57. Pp. 716–735. DOI:10.1016/j.cirp.2008.09.005
7. Estrin Y., Vinogradov A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: a wealth of challenging science. *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61 (3). Pp. 782–817. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.10.038.
8. Zhernakov V., Yakupo R. Calculation of bolt and rivet type connections at high temperatures and dynamic loads. MAI Publisher. Moscow. 1997. 218 p.
9. Chukin M.V., Valiev R.Z., Raab G.I., Koptseva N.V., Ufimova U.U. A Study of the nano-steels 20 and 45 structure evolution under critical values of plastic deformation [Issledovanie evolyucii struktury nanostalej 20 i 45 pri kriticheskikh stepenyah plasticheskoy deformacii]. *Herald of the MSTU G.I. Nosov*. 2007. No. 4. Pp. 89–93. (rus)
10. Valiev R., Juster N., Rosochowski A. The new trends in SPD processing to fabricate bulk nanostructured materials. *Proceedings of the 9th International Conference on Material Forming ESAFORM: Publishing House Akapit*. April 2006. Pp. 1–9.
11. Faraji G., Torabzadeh H. An Overview on the Continuous Severe Plastic Deformation Methods. *Materials Transactions*. 2019. Vol. 60, No. 7. Pp. 1316–1330. DOI: 10.2320/materials.MF201905
12. Valiev R.Z., Korznikov A.V., Mulyukov R.R. Structure and Properties of Ultrafine-grained Materials Produced by Severe Plastic Deformation. *Materials Science and Engineering: A*. 1993. Vol. 168 (2). Pp. 141–148. DOI: 10.1016/0921-5093(93)90717-S
13. Golenkov V.A., Radchenko S.U. Technological processes of metal forming with local loading of a detail [Tekhnologicheskie processy obrabotki metallov davleniem s lokal'nym nagruzheniem zagotovki]. M.: Mechanical Engineering, 1997. 232 p. (rus)
14. Golenkov V.A., Dmitriev A.M., Kuchar V.D., Radchenko S.U., Yakovlev S.P., Yakovlev S.S. Special technological processes and equipment for metal forming [Special'nye tekhnologicheskie processy i oborudovanie obrabotki davleniem]. M.: Mechanical Engineering, 2004. 464 p. (rus)
15. Golenkov V.A., Radchenko S.U., Dorokhov D.O. Theory and technology of roll stamping [Teoriya i tekhnologiya valkovoy shtampovki]. M.: Publishing House "Weapon and Technologies", 2019. 323 p. (rus)
16. Golenkov V.A., Radchenko S.U., Kapyrin K.I. Plastic forming peculiarities of a work piece and a workload variation under roll stamping versus a punch butt shape [Osobennosti plasticheskogo formoizmeneniya zagotovok i analiz izmeneniya rabochej nagruzi pri valkovoj shtampovke v zavisimosti ot formy torca puansona]. *Solid Mechanics and Metal Forming: Proceedings of Tula State University*. Tula: TulSU. 2000. Pp. 17–21. (rus)
17. Radchenko S.U., Kapyrin K.I. Towards the mechanism of reach-through axial hole formation under roll stamping [K voprosu o mekhanizme obrazovaniya skvoznogo oseвого otverstiya pri valkovoj shtampovke]. *Solid Mechanics and Metal Forming. Part.2: Proceedings of Tula State University*. Tula: TulSU. 2003. Pp. 96–101. (rus)
18. Golenkov V.A., Radchenko S.U., Dorofeev O.V., Kapyrin K.I. A fabrication method for axisymmetric details with a step-wise outer surface. Patent RF, no. 2102179, 1998.
19. Golenkov V.A., Radchenko S.U., Dorofeev O.V., Kapyrin K.I. A fabrication method for hollow axisymmetric details. Patent RF, no. 2102179, 1998.
20. Golenkov V.A., Radchenko S.U., Dorokhov D.O. Submicro- and nano-structured gradient states formation by means of complex local loading the deformation zone [Formirovanie gradientnykh submikro- i nanostrukturnykh sostoyanij kompleksnym lokal'nym nagruzheniem ochaga deformacii]. *Hardening technologies and coatings*. 2009. No. Pp. 54–56. (rus)
21. Golenkov V.A., Radchenko S.U., Dorokhov D.O., Gryadunov I.M. The forming of gradient nanostructures in axisymmetric products [Sozдание gradientnykh nanostruktur v osesimmetrichnykh izdeliyah]. *Nanoengineering*. 2012. No 5. Pp. 18–22. (rus)
22. Radchenko S.U., Dorokhov D.O., Gryadunov I.M. Experimental study of hardening treatment the inner surface of split-shell bearing under complex local loading of deformation zone [Eksperimental'noe issledovanie uprochnyayushchej obrabotki vnutrennej poverhnosti vkladyshej podshipnikov skol'zheniya v usloviyah kompleksnogo lokal'nogo nagruzheniya ochaga deformacii]. *The World of Transport and Technological Machines*. 2013. No. 3 (42). Pp. 67–76. (rus)
23. Radchenko S.U., Dorokhov D.O., Gryadunov I.M. New technological schemes for hardening treatment of a split-shell bearing under complex local loading of deformation zone [Novye tekhnologicheskie skhemy uprochnyayushchej obrabotki vkladyshej podshipnikov skol'zheniya v usloviyah kompleksnogo lokal'nogo nagruzheniya ochaga deformacii]. *The World of Transport and Technological Machines*. 2014. No. Pp. 47–54. (rus)

24. Gryadunov I.M. Hardening treatment for details of bush type by severe plastic deformation under complex local loading [Uprochnenie detalej tipa vtulok intensivnoj plasticheskoj deformacii v usloviyah kompleksnogo lokal'nogo nagruzheniya: Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: PhD Dissertation on Engineering Science]. Oryol State University. Oryol, 2013. (rus)
25. Utiashev F.Z. Nanostructuring of metallic materials by severe plastic deformation [Nanos-trukturirovanie metallicheskih materialov metodami intensivnoj plasticheskoj deformacii]. Physics and Technology of High Pressure. 2010. Vol. 20. No. 1. Pp. 7–25. (rus)
26. Golenkov V.A., Radchenko S.U., Dorokhov D.O. A fabrication method for metallic bushes with gradient submicro- and nanocrystall structure. Patent RF, no. 2387514, 2008.
27. Golenkov V.A., Malinin V.G., Radchenko S.U., Korotki G.P., Dorokhov D.O. A fabrication method for metallic bushes. Patent RF, no. 2340423, 2008.
28. Golenkov V.A., Radchenko S.U., Gryadunov I.M. A fabrication method for metallic bushes with gradient-hardening structure. Patent RF, no. 2462327, 2010.
29. Radchenko S.U., Dorokhov D.O., Morrev P.G., I. M. Gryadunov. Golenkov V.A. A mathematical model for hardening treatment of inner surface for details of bush type by means of severe plastic deformation under complex local loading the deformation zone [Matematicheskaya model' uprochnyayushchej obrabotki vnutrennej poverhnosti detalej tipa vtulok intensivnoj plasticheskoj deformacii v usloviyah kompleksnogo lokal'nogo nagruzheniya ochaga deformacii]. Fundamental and applied problems of techniques and technology. 2013. No. 5 (301). Pp. 40–47. (rus)
30. Gryadunov I.M., Radchenko S.Yu., Dorokhov D.O., Morrev P.G. Deep hardening of inner cylindrical surface by periodic deep rolling-burnishing process. Modern Applied Science. 2015. Vol. 9. Pp. 251–258. DOI:10.5539/mas.v9n9p251
31. Kanatnikov N.V., Radchenko S.U., P Morrev.G. A Program for numerical solution of metal forming problems by Finite Element Method. Patent RF, no. 2018613471, 2018.
32. Radchenko S.U., Dorokhov D.O., Gryadunov I.M. A microhardness distribution over detail's cross section after the hardening treatment under complex local loading [Raspredelenie mikrotverdosti po secheniyu izdelij pri uprochnenii v usloviyah kompleksnogo lokal'nogo nagruzheniya]. Fundamental and applied problems of techniques and technology. 2017. No. 4-1 (324). Pp. 132–138. (rus)
33. Prabhakar Bhovi M., Patil Deepak C., Kori S.A., Venkateswarlud K., Huang Yi, Langdone Terence G. A comparison of repetitive corrugation and straightening and high-pressure torsion using an Al-Mg-Sc alloy. Journal of materials research technology. 2016. Vol. 5(4). Pp. 353–359. DOI: 10.1016/j.jmrt.2016.03.009
34. Stolbovski A.V., Popov V.V., Popova E.N., Falahutdinov R.M. The effect of severe plastic deformation by high pressure torsion on structure and properties of copper and tin bronze [Vliyanie intensivnoj plasticheskoj deformacii metodom krucheniya pod vysokim davleniem na strukturu i svojstva medi i olovyanistoj bronzy]. Diagnostics, resource and mechanics of materials and structures issue. 2017. Vol. 5. Pp. 13–22. (rus) DOI: 10.17804/2410-9908.2017.5.013-022
35. Morrev P.G., Kapyrin K.I., Kurdyumova L.N., Kulikov I. Yu., Tatarchenkov N.V., Gordon V.A. On construction of SPD stress-strain curve for bronze Cu85–Pb5–Sn5–Zn5. Materials Science & Engineering: A. 2019. Vol. 764. 137889. DOI: 10.1016/j.msea.2019.05.020
36. Morrev P.G., Kapyrin K.I., Tatarchenkov N.V., Gryadunov I. M. Towards the hardening of materials with a linear compression diagram [K voprosu ob uprochnenii s linejnoy materialov diagrammoj szhatiya]. Fundamental and applied problems of techniques and technology. 2017. No. 3 (323). Pp. 102–106. (rus)
37. Morrev P.G., Kapyrin K.I., Golenkov V.A., Radchenko S.U., Dorokhov D.O. Construction of hardening curves under severe plastic deformation [Postroenie krivyh uprochneniya v usloviyah intensivnoj plasticheskoj deformacii]. Fundamental and applied problems of techniques and technology. 2022. No. 3 (353). Pp. 43–53. (rus)
38. Giannakopoulos A.E., Larsson P.L., Vestergaard R. Analysis of Vickers indentation. International Journal of Solids and structures. Vol. 31. 1994. Pp. 2679–2708.
39. Metlov L.S., Davidenko A.A. The analysis of hardening curves obtained in SPD process [Analiz krivyh uprochneniya, poluchennyh v processe IPD]. Herald of TSU. 2013. Vol.18, Issue 4. Pp. 1964–1965. (rus)
40. Metlov L.S. Formation of the internal structure of solids under severe load. Physical Review E. 2010. Vol. 81. Pp. 051121(9). DOI: 10.1103/PhysRevE.81.051121
41. Metlov L.S. Nonequilibrium evolution thermodynamics of vacancies. Physical Review E. 2011. Vol. 106. 165506 (4). DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.165506

Information about the author

Капырин, Konstantin I. PhD, Assistant professor. E-mail: kostik72@inbox.ru. Oryol State University named after I.S. Turgenev, Mtsensk branch. Russia, 303031, Mtsensk, st. Turgenev, 196.

Katunin, Andrey A. PhD, Assistant professor. E-mail: katunin57@gmail.com. Oryol State University named after I.S. Turgenev, Mtsensk branch. Russia, 303031, Mtsensk, st. Turgenev, 196.

Tryashtsin, Anton P. PhD, Assistant professor. E-mail: antondocent1968@mail.ru. Oryol State University named after I.S. Turgenev, Mtsensk branch. Russia, 303031, Mtsensk, st. Turgenev, 196.

Received 03.11.2024

Для цитирования:

Капырин К.И., Катунин А.А., Трясцин А.П. Валковая штамповка как метод интенсивной пластической деформации // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 12. С. 125–141. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-125-141

For citation:

Kapryin K.I., Katunin A.A., Tryashtsin A.P. Roll stamping as an severe plastic deformation method. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 125–141. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-125-141