

Научно-теоретический журнал

ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

10

2024

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В.Г. ШУХОВА

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

№ 10, 2024 год

**SCIENTIFIC AND THEORETICAL JOURNAL
BULLETIN
of BSTU named after V.G. Shukhov
Vol. 10. 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	05.10.2024
Выход в свет	21.10.2024

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 12,67. Уч.-изд. л. 13,63. Тираж 40 экз. Заказ № 137

© 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/255810462/
Signed for printing:	05.10.2024

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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ерофеев Владимир Трофимович, академик РААСН, д-р техн. наук, проф., 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).

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

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

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

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

Мешерин Виктор Сергеевич, PhD, проф., директор института строительных материалов и заведующий кафедрой строительных

материалов Дрезденского Технического Университета (Германия, г. Дрезден).

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

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

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

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

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

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

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

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).

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

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Иноземцев А.С., Королев Е.В.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ В БЕТОННЫХ СМЕСЯХ
НА ЛЕГКОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ

8

Кузьмин Е.О., Нелюбова В.В., Володченко А.Н.

ПРОГНОЗИРУЕМАЯ ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ
С ДОБАВКОЙ НАНОДИСПЕРСНОГО КРЕМНЕЗЕМА

17

Кравцов А.И., Макаева А.А., Оденбах И.А.

О НЕКОТОРЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ СВЕТОПРОНИЦАЕМОГО
БЕТОНА

25

Кравченко Д.Э., Сулейманова Л.А., Лукутцова Н.П.

ВЛИЯНИЕ ЦВЕТА И ИСТОЧНИКА ЗАРЯДА ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ПИГМЕНТА
НА СВОЙСТВА СВЕЯЩИХСЯ БЕТОНОВ

35

Зайцев О.Н., Сиваченко Ю.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВИРОВАННОГО РАДИАЛЬНОЙ СТРУЕЙ
ВСАСЫВАЮЩЕГО ПОТОКА ИЗ ЗОНЫ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ

44

Уляшева В.М., Мартьянова А.Ю., Аншукова Е.А.

К РАСЧЕТУ СКОРОСТИ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

53

Леонов Е.С., Трубаев П.А.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ БИОГАЗА
НА ТЕПЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ

63

Опарина Л.А., Власова Е.А.

МЕТОДИКА ВЫБОРА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ
ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
НА ЭТАПЕ ЗАВЕРШЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЗДАНИЙ

72

Петрусенко Ю.В.

РЕКОНСТРУКЦИЯ «ЗЕЛЕНОГО ТЕАТРА» В Г. РОСТОВЕ-НА-ДОНУ

79

Шульга А.В., Золотарева М.В.

ОБЩЕСТВЕННЫЕ ПРОСТРАНСТВА В КОНТЕКСТЕ СОВРЕМЕННЫХ
СОЦИАЛЬНО-КУЛЬТУРНЫХ ТЕНДЕНЦИЙ

90

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Михайличенко С.А., Шаталов А.В., Михайличенко И.К., Шаталов В.А.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ
СРЕДНЕЙ И МАЛОЙ ПРОЧНОСТИ В РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОМ
ДИСПЕРГАТОРЕ

100

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Inozemtcev A.S., Korolev E.V.

THEORETICAL DESCRIPTION OF WATER DISTRIBUTION IN CONCRETE MIXTURES ON LIGHTWEIGHT AGGREGATE

8

Kuzmin E.O., Nelyubova V.V., Volodchenko A.N.

THE PREDICTED STRENGTH OF CEMENT STONE WITH THE ADDITION OF NANODISPERSED SILICA

17

Kravtsov A.I., Makayeva A.A., Odenbach I.A.

ON SOME MECHANICAL PROPERTIES OF LIGHT-TRANSMITTING CONCRETE

25

Kravchenko D.E., Suleymanova L.A., Lukuttsova N.P.

THE EFFECT OF THE COLOR AND CHARGE SOURCE OF THE LUMINESCENT PIGMENT ON THE PROPERTIES OF LUMINOUS CONCRETES

35

Zaitsev O.N., Sivachenko Yu.A.

INVESTIGATION OF THE SUCTION FLOW ACTIVATED BY A RADIAL JET FROM THE PLASMA CUTTING ZONE

44

Ulyasheva V.M., Martianova A.Yu., Anshukova E.A.

TO CALCULATE THE SPEED OF TRANSPORTATION OF SOLID PARTICLES

53

Leonov E.S., Trubaev P.A.

INFLUENCE OF THERMAL PHYSICAL PROPERTIES OF BIOGAS COMBUSTION PRODUCTS ON THE THERMAL PARAMETERS OF WATER HEATING BOILERS

63

Oparina L.A., Vlasova E.A.

THE METHODOLOGY OF CHOOSING RESOURCE-SAVING ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS AT THE STAGE OF COMPLETION OF THE LIFE CYCLE OF BUILDINGS

72

Petrusenko Y.V.

RECONSTRUCTION OF THE «GREEN THEATER» IN ROSTOV-ON-DON

79

Shulga A.V., Zolotareva M.V.

PUBLIC SPACES IN THE CONTEXT OF MODERN SOCIO-CULTURAL TRENDS

90

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Mikhailichenko S.A., Shatalov A.V., Mikhailichenko I.K., Shatalov V.A.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE GRINDING OF MEDIUM AND LOW STRENGTH MATERIALS IN A ROTARY CENTRIFUGAL DISPERSANT

100

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-8-16

^{1,*}Иноземцев А.С., ²Королев Е.В.¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

*E-mail: InozemcevAS@mgsu.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ В БЕТОННЫХ СМЕСЯХ НА ЛЕГКОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ

Аннотация. На основе рассмотренных моделей продемонстрировано, что меньшая плотность полого заполнителя требует меньшего его количества для достижения заданной плотности лёгких бетонов, что обеспечивает большую вариативность при разработке и проектировании каркасообразующей части и формирует потенциал для достижения высоких механических свойств. Доля адсорбционной воды полого заполнителя, в отличие от пористого заполнителя, не зависит от общего количества воды в системе, что позволяет прогнозировать расход воды, а значит управлять реотехнологическими свойствами смесей на их основе. Распределение физически связанной воды в составах на полом заполнителе носит отличный характер от составов на пористом заполнителе. Доля физической воды на таком заполнителе больше, чем на полом для составов с плотностью не более 1500...1600 кг/м³, менее этого диапазона – большее содержание такой воды наблюдается в системах на полом заполнителе.

Показано, что распределение воды в системах на пористом и полом заполнителе существенно отличается. Учитывая роль пористого заполнителя в формировании структуры лёгких бетонов, можно предположить, что при разработке лёгких бетонов с плотностью более 1600 кг/м³ целесообразно использовать пористый заполнитель, а при разработке лёгкого бетона с плотностью менее 1600 кг/м³ – полый заполнитель. Это обеспечивает рациональное распределение воды в бетонной смеси, а, следовательно, условия для формирования прочной структуры лёгкого бетона.

Ключевые слова: лёгкий бетон, полый заполнитель, пористый заполнитель, структура, модель, распределение воды, адсорбция воды

Введение. Заполнитель является важным компонентом как тяжелых, так и лёгких бетонов, оказывающим существенное влияние на параметры структуры и свойства материала [1]. Одним из способов получения лёгких бетонов и растворов является введение лёгких заполнителей, в качестве которых используются природные [Ошибка! Источник ссылки не найден.—4] и искусственные пористые заполнители [5–7].

Согласно [8] лёгкие заполнители по строению следует классифицировать на *пористые* и *полые* заполнители. Пористыми заполнителями называют [9] сыпучие зернистые материалы гравийной формой зёрен с неравномерной плотностью оболочки и центра или щебнеподобные зёрна неправильной угловатой формы и шероховатой ноздреватой поверхностью с насыпной плотностью до 1000 кг/м³. К полым заполнителям (наполнителям) относят мелкие порошки [10], зёрна которых имеют плотную внешнюю оболочку и газо-воздушное ядро.

Высокие физико-механические свойства лёгких бетонов характерны для составов на пористых заполнителях преимущественно искусственно вспученных, в основном, на керамзите. Одной из основных особенностей пористых заполнителей является их способность поглощать

значительное количество воды [11]. Как правило, поглощающую способность лёгкого заполнителя относят к положительной особенности технологии, так как структурообразование бетона проходит полнее за счёт формирования резерва воды для гидратации портландцемента. При этом в технологии керамзитобетона существуют полярные представления о необходимости предварительного увлажнения заполнителя, которое может иметь как положительный, так и отрицательный эффект. Нежелательным и вредным в [11] называют предварительное увлажнение керамзитового гравия, что объясняется неуправляемыми процессами релаксации и напряжениями в гранулах, которые возникают при насыщении водой на начальной стадии и при увеличении водонасыщения, соответственно.

Однако отмечается [12], что насыщение керамзита водой не приводит к снижению его прочности (повышение прочности составляет порядка 15...17 %), что объясняется напряжённым состоянием гранул заполнителя, возникающим в процессе быстрого перехода от пиропластического состояния к твёрдому. Усадка и расширение искусственных пористых заполнителей при изменении их влажности колеблется в широких пределах. Изменение объёма составляет величину

порядка усадки и расширения цементного камня и даже превосходит их (расширение 1,3...2,1 мм/м, усадка 0,7...1,2 мм/м). Отмечается, что остаточные напряжения значительно снижаются с уменьшением размера гранул пористого заполнителя и существенно увеличиваются при отклонении формы гранул от сферической формы и особенно – при наличии на ней трещин, выступов и изломов. В [11] «эффект предварительного обжата пористого заполнителя, повышающего его растяжимость в лёгком бетоне», описывается первоначальным увеличением его объёма за счёт поглощения влаги из цементного раствора, последующей его деформацией сжатия в результате обратной миграции влаги в твердеющий цементный камень. Эти процессы происходят на фоне усадки цементного раствора. Через определённый период времени величина обжата цементной оболочкой (за счёт усадки) протекает интенсивнее, чем сокращение размеров пористого заполнителя за счёт отдачи воды. Процесс обжата лёгкого заполнителя продолжается до момента прекращения обменных процессов или до момента разрыва цементной оболочки.

Таким образом, важнейшую роль в структурообразовании лёгкого бетона выполняет лёгкий заполнитель. Однако исследованию особенностей формирования структуры бетонов на полом заполнителе уделено внимание в основном с эмпирической стороны [10, 13–15], поэтому анализ теоретических аспектов получения таких бетонов вызывает научный интерес. Целью настоящего исследования является теоретический анализ структурных параметров бетонных смесей на лёгких заполнителях и сравнительный анализ особенностей распределения воды в таких системах, для установления границ объёмного содержания пористого и полого заполнителя, обеспечивающих рациональные условия формирования прочной структуры материала.

Таким образом, показано, что распределение воды в системах на пористом и полом заполнителях существенно отличается. Учитывая роль пористого заполнителя в формировании структуры лёгких бетонов (описанную выше), можно предположить, что при разработке лёгких бетонов с плотностью более 1600 кг/м³ целесообразно использовать пористый заполнитель, а при разработке лёгкого бетона с плотностью менее 1600 кг/м³ – полый заполнитель. Это обеспечивает рациональное распределение воды в бетонной смеси, а, следовательно, условия для формирования прочной структуры лёгкого бетона.

Материалы и методы. В работе используются математические методы моделирования объекта исследования – лёгкого бетона на пористом или полом заполнителе – с привлечением общенаучных подходов научного исследования: метода абсолютных объёмов, закономерностей формирования структуры лёгкого бетона, изложенных в фундаментальных работах [11, 12, 16], взаимодействия на границе «твёрдое вещество – вода» [9, 17] и др.

Основная часть. Рассмотрим модель цементных материалов на пористом (керамзит) и полом (керамические микросферы) лёгком заполнителе. В рассматриваемой системе «цемент – вода – заполнитель» (рис. 1) каждая частица твёрдой фазы является «потребителем» воды, требующим её расхода для смачивания поверхности и на формирование приповерхностного слоя воды. При этом характер взаимодействия с водой цемента, пористого и полого заполнителя будет отличаться. Взаимодействие цемента с водой носит сложный кинетический характер, описываемый с учётом протекания физико-химических процессов гидратации, который в данной работе не рассматривается. Принимается, что при достаточном количестве воды вид заполнителя не оказывает влияния на гидратацию цемента.

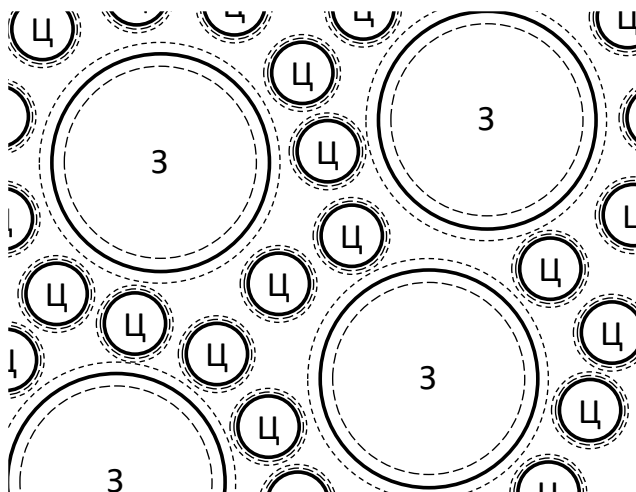


Рис. 1. Общая схема цементной системы, наполненной лёгким заполнителем

Лёгкий полый наполнитель будет потреблять воду на смачивание и формирование её адсорбционного слоя на твёрдой поверхности оболочки, а лёгкий пористый наполнитель дополнительно будет поглощать воду вследствие наличия пористо-капиллярной структуры. При этом количество воды, затрачиваемой на эти процессы, будет зависеть от геометрических характеристик рассматриваемых видов наполнителя и параметров пористо-капиллярного пространства пористого наполнителя. В этой связи исследование распределения воды в материалах, содержащих пористый или полый наполнитель, а также оценка влияния на баланс воды структуры бетонной смеси вызывает научный интерес.

Соотношение компонентов в рассматриваемой системе представляется долями цементного теста и наполнителя, в зависимости от плотности которых достигается требуемая средняя плотность бетонной смеси.

$$\begin{cases} v_{\text{ЦТ}} + v_3 = 1 \\ v_{\text{ЦТ}}\rho_{\text{ЦТ}} + v_3\rho_3 = \rho_{\text{БС}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $v_{\text{ЦТ}} = v_{\text{Ц}} + v_{\text{В}}$ – объёмная доля цементного теста, приготовленного с известным В/Ц-отношением

$$\begin{cases} v_{\text{Ц}}\rho_{\text{Ц}} + (1 - v_{\text{Ц}})\rho_{\text{В}} = \rho_{\text{ЦТ}} \\ \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{Ц}}} + \frac{\text{В}}{\rho_{\text{В}}} = 1 \end{cases}, \quad (2)$$

где v и ρ – объёмное содержание и истинная плотность соответствующих компонентов смеси; индексами обозначены цемент (Ц), вода (В), наполнитель (3), бетонная смесь (БС) и цементное тесто (ЦТ).

Распределение воды на поверхности твердых частиц представляется долями адсорбированной и физически связанной (рис. 2).

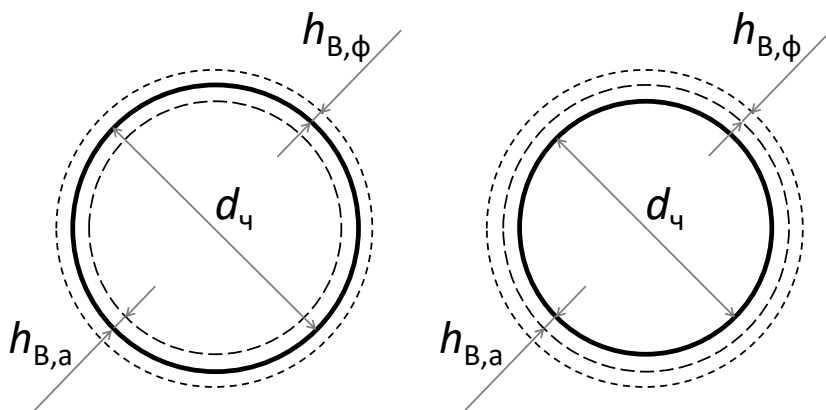


Рис. 2. Модель распределения воды на частицах пористого (слева) и полого (справа) наполнителя

$$v_{\text{В}} = v_{\text{В,а}} + v_{\text{В,ф}}. \quad (3)$$

При этом ключевым в распределении воды в системе и смещение баланса жидкости между цементом и наполнителем будет зависеть от адсорбционных свойств лёгкой фазы

$$(v_{\text{Ц}} + v_{\text{В,а}}^{\text{Ц}} + v_{\text{В,ф}}^{\text{Ц}}) + (v_3 + v_{\text{В,а}}^3 + v_{\text{В,ф}}^3) = 1. \quad (4)$$

Для плотных частиц цемента (без учета процесса гидратации) доля адсорбционной воды составляет

$$v_{\text{В,а}}^{\text{Ц}} = v_{\text{Ц}}\rho_{\text{Ц}}h_{\text{В,а}}S_{\text{уд,Ц}}, \quad (5)$$

где $h_{\text{В,а}} = 30$ нм [15], $S_{\text{уд,Ц}}$ – удельная поверхность цемента.

Для наполнителей величина адсорбирующейся воды связана с водопоглощением $W_{m,3}$ частиц

$$v_{\text{В,а}}^3 = W_{m,3}3\rho_{\text{В}}. \quad (6)$$

Открытая пористость наполнителя, определяющая его поглощающую способность, вносит

ключевой вклад в перераспределение доли физически связанной воды. То есть доля этой воды, из условия равномерного ее распределения на поверхности частиц цемента и наполнителя, составляет

$$\begin{cases} v_{\text{В,ф}}^{\text{Ц+3}} = v_{\text{В,ф}}^{\text{Ц}} + v_{\text{В,ф}}^3 \\ v_{\text{В,ф}}^{\text{Ц+3}} = v_{\text{В}} - v_{\text{В,а}}^{\text{Ц}} - v_{\text{В,а}}^3 \end{cases}. \quad (7)$$

На рис. 3 и 4 представлены модели изменения доли адсорбционной воды на частицах цемента и наполнителя, соответственно, в системе «цемент – вода – наполнитель» при варьировании В/Ц-отношения и плотности. Для моделирования приняты следующие начальные условия: площадь удельной поверхности и плотность цемента $S_{\text{уд,Ц}} = 250$ м²/кг и $\rho_{\text{Ц}} = 3100$ кг/м³, соответственно; средний диаметр частиц и плотность пористого наполнителя $d_{\text{ч,К}} = 20$ мм и $\rho_{\text{К}} = 850$ кг/м³, соответственно, а полого $d_{\text{ч,МС}} = 70$ мкм и $\rho_{\text{МС}} = 530$ кг/м³, соответственно.

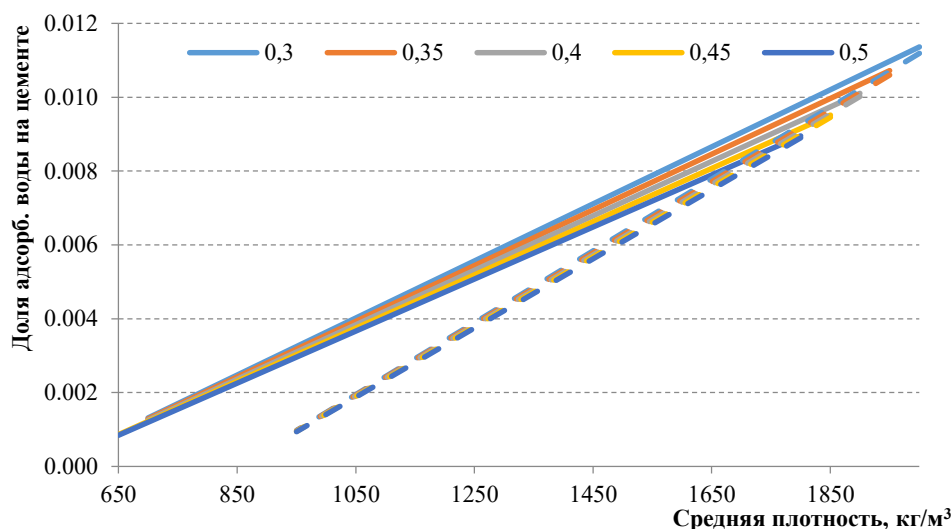


Рис. 3. Модель изменения доли адсорбционной воды на частицах цемента от средней плотности в системах с пористым (пунктирные линии) и полым (сплошные линии) заполнителем при варьировании В/Ц

Видно, что графики изменения доли адсорбционной воды на частицах цемента для систем с пористым и полым заполнителем отличается интенсивностью. Снижение плотности, вызванное увеличением доли лёгкого заполнителя, приводит к более интенсивному снижению доли адсорбционной воды $v_{В,а}^Ц$. При этом чем меньше плотность, тем существеннее отличие между системами на пористом и полом заполнителе, т.е. тем больше отличие в количестве адсорбционной воды (разница значений между графиками, обозначенными пунктирными и сплошными линиями на рис. 3).

Это объясняется тем, что достижение одинаковой плотности композита достигается заменой вяжущего вещества большим количеством заполнителя, так как плотность пористого заполнителя больше, чем у полого. В результате, в системе остается меньшее количество вяжущего вещества, на поверхности которого адсорбируется вода. При этом отметим, что в этом случае ограничена возможность достижения минимальной плотности композита. Для рассматриваемой модели минимально достижимая средняя плотность для систем на пористом заполнителе составляет около 1000...950 кг/м³, а на полом заполнителе стремится к 700...650 кг/м³.

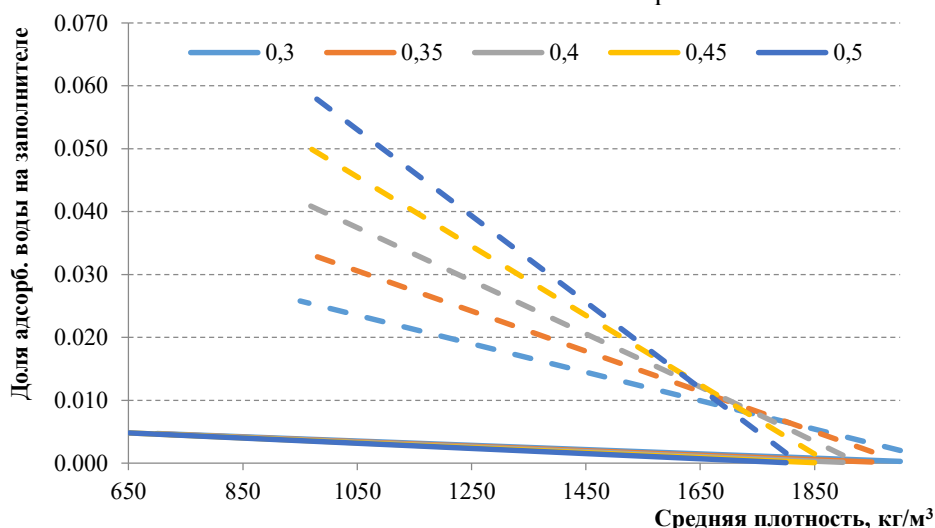


Рис. 4. Модель изменения доли адсорбционной воды на частицах заполнителя от средней плотности для пористого (пунктирные линии) и полого (сплошные линии) заполнителя при варьировании В/Ц

Наибольший интерес представляет вклад заполнителя в распределение воды в рассматриваемой системе. Так, на рис. 4 показана зависимость количества адсорбционной воды на частицах заполнителя пористой и полой структуры, из которой видно, что в композициях на пористом заполнителе доля такой воды существенно выше, чем

на полом. Закономерным объяснением этому является наличие пористо-капиллярной структуры заполнителя, которая участвует в накоплении воды в его зёрнах. При этом, представленные на рис. 6 графики для различного В/Ц-отношения демонстрируют растущую интенсивность изме-

нения при увеличении содержания воды. Это связано тем, что поглощающая способность пористого заполнителя напрямую зависит от общего количества воды в системе [9]. Для плотной оболочки полого заполнителя доля адсорбционной воды изменяется по противоположному цементу направлению линейной зависимости, что связано с заменой вяжущего вещества лёгким заполнителем.

Исходя из того, что процесс адсорбции воды протекает в приоритетном порядке, то дальнейшее распределение воды в системе, как конкурентный процесс, протекает по остаточному принципу. В связи с этим особый интерес представляет изменение количества воды в системе с заполнителями разной структуры (рис. 5 и 6). При этом физически связанная вода в модельной системе будет распределяться пропорционально долям твердой фазы.

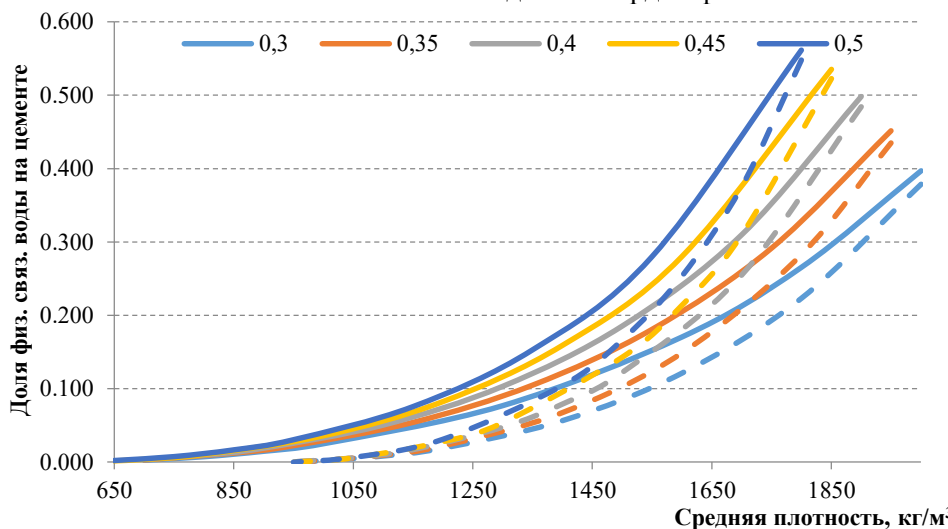


Рис. 5. Модель изменения доли физически связанной воды на частицах цемента от средней плотности в системах с пористым (пунктирные линии) и плотным (сплошные линии) заполнителем при варьировании В/Ц

Данные рис. 5 демонстрируют, что зависимости для модельных систем на полном заполнителе располагаются выше, чем графики для систем с пористым заполнителем. Это означает, что зависимость, согласно которой доля физически связанной воды на поверхности частиц вяжущего вещества (цемента) в лёгких бетонах на полном заполнителе больше, чем в бетонах на пористом заполнителе независимо от средней плотности. При этом важно отметить, что, не смотря на

меньший размер частиц полого заполнителя (большую удельную поверхность), их плотная стенка препятствует интенсивной адсорбции воды, оставляя большее её количество для распределения по поверхности твердых частиц, в том числе цемента. Вместе с этим количество физически связанной воды на частицах заполнителя в зависимости от плотности меняется по экстремальной зависимости (рис. 6).

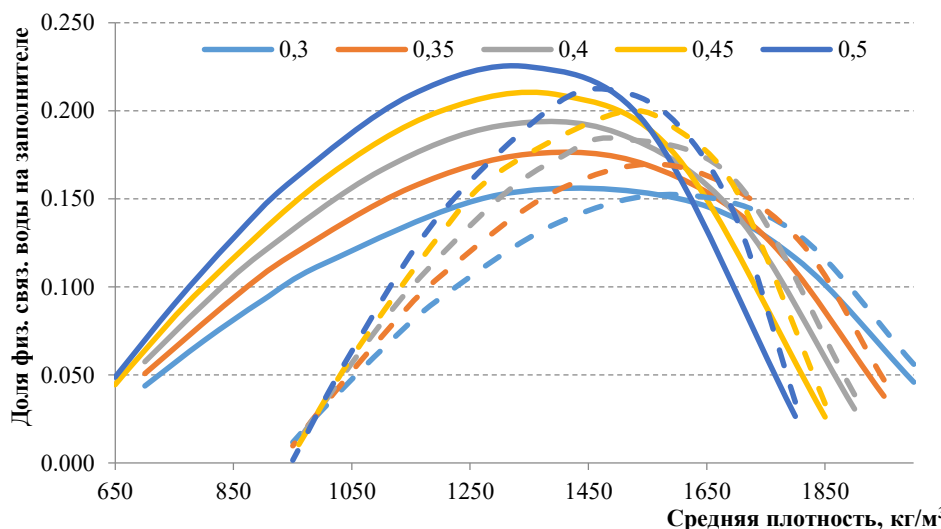


Рис. 6. Модель изменения доли физически связанной воды на частицах заполнителя от средней плотности для пористого (пунктирные линии) и полого (сплошные линии) заполнителя при варьировании В/Ц

Представленная модель распределения физически связанной воды на поверхности заполнителя демонстрирует, что эта зависимость от средней плотности бетона имеет экстремальный характер. Также важно отметить, что абсциссы точек пересечения этих зависимостей с осью «Средняя плотность» различны. Видно, что восходящий участок кривой, рассматриваемой на рис. 6, для композиций на пористом заполнителе заканчивается в диапазоне 1500...1600 кг/м³, а для составов с полым заполнителем – в диапазоне 1300...1450 кг/м³. Кроме того, видно, что на восходящей кривой модельных композиций на пористом заполнителе доля физически связанной воды меньше, чем у композиций на полном запол-

нителе при равной плотности. На нисходящей части кривой наблюдается обратная зависимость: доля физической воды на поверхности частиц полого заполнителя меньше, чем на зернах пористого заполнителя. Это свидетельствует о том, что в системах с одинаковым В/Ц-отношением доля воды, участвующей в формировании свойств смесей, будет больше в композициях с полым заполнителем при плотности до 1500...1600 кг/м³.

Обобщающие выводы о распределении адсорбционной и физически связанной воды на частицах цемента и заполнителя можно сделать с помощью рис. 7, предоставляющего относительную величину воды при В/Ц = 0,3.

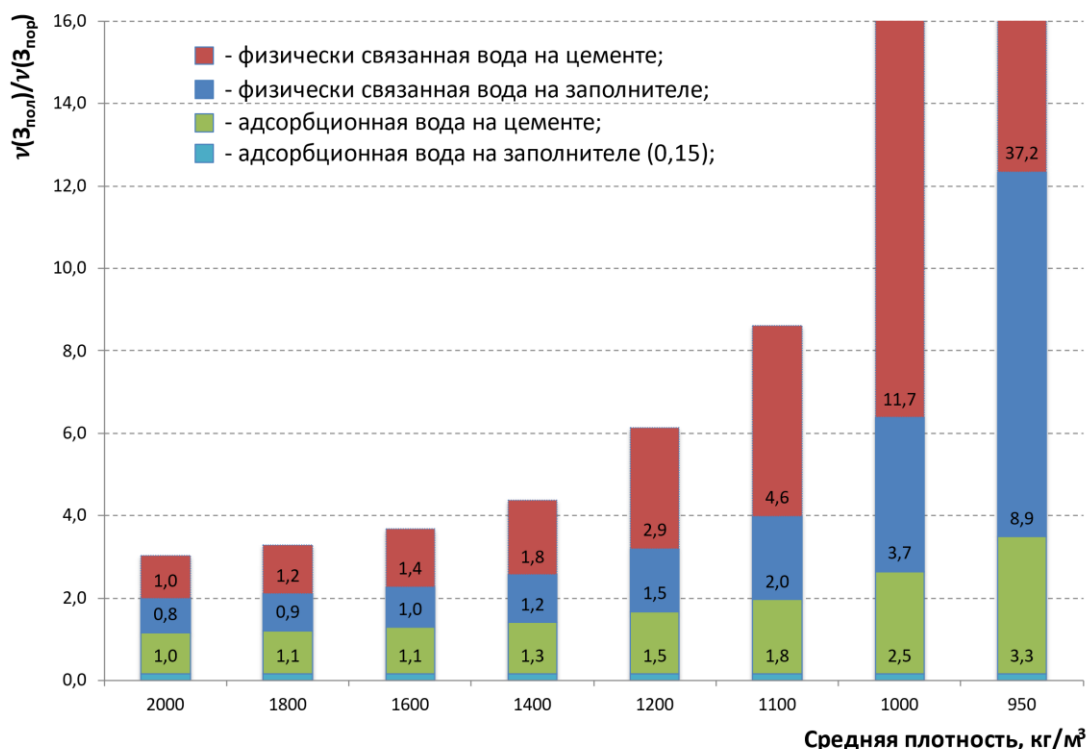


Рис. 7. Сравнительное распределение воды для модели «цемент – вода – заполнитель» в системе с полым заполнителем ($Z_{пол}$) к системе на пористом заполнителе ($Z_{пор}$) при В/Ц = 0,3

На рис. 7 видно, что доля адсорбционной и физически связанной воды становится сравнительно больше для модельных систем на полном заполнителе, чем на пористом, при плотности не более 1600 кг/м³. Отличие для этих систем нарастает экспоненциально при снижении плотности и увеличении В/Ц-отношения.

Анализ рассматриваемых моделей позволяет сделать следующие обобщающие выводы:

1) Меньшая плотность полого заполнителя требует меньшего его количества для достижения заданной плотности лёгких бетонов, что обеспечивает большую вариативность при разработке и проектировании каркасообразующей части и формирует потенциал для достижения высоких механических свойств.

2) Доля адсорбционной воды полого заполнителя, в отличие от пористого заполнителя, не зависит от общего количества воды в системе, что позволяет прогнозировать расход воды, а значит, управлять реотехнологическими свойствами смесей на их основе.

3) Распределение физически связанной воды в составах на полном заполнителе носит отличный характер от составов на пористом заполнителе. Доля физической связанной воды на таком заполнителе больше, чем на полном для составов с плотностью не более 1500...1600 кг/м³, менее этого диапазона – большее содержание такой воды наблюдается в системах на полном заполнителе.

Выводы. Таким образом, показано, что распределение воды в системах на пористом и полном

заполнителях существенно отличается. Учитывая роль пористого заполнителя в формировании структуры лёгких бетонов (описанную выше), можно предположить, что при разработке лёгких бетонов с плотностью более 1600 кг/м³ целесообразно использовать пористый заполнитель, а при разработке лёгкого бетона с плотностью менее 1600 кг/м³ – полый заполнитель. Это обеспечивает рациональное распределение воды в бетонной смеси, а, следовательно, условия для формирования прочной структуры лёгкого бетона.

Источник финансирования. Работа выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Изд-во АСВ, 2011. 524 с.
2. Якубович М.А. Автодорожные мосты из лёгкого железобетона. М.: Автотрансиздат, 1956. 68 с.
3. Юдин И.В., Ярмаковский В.Н. Инновационные технологии в индустриальном домостроении с использованием конструкционных легких бетонов // Строительные материалы. 2010. № 1. С. 15–17.
4. Lam T.V., Vu D.T., Dien V.K., Bulgakov B.I., Korol E.A. Properties and thermal insulation performance of light-weight concrete // Magazine of Civil Engineering. 2018. Т. 84. № 8. Рр. 173–191. DOI: 10.18720/MCE.84.17
5. Соловьева Л.Н., Ходыкин Е.И., Мосьян А.В. Перспективы использования кремнеземсодержащего сырья для получения гранулированного заполнителя легких бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2008. № 1. С. 9–11.
6. Давидюк А.Н., Давидюк А.А. Прочностные свойства легких бетонов на стекловидных заполнителях для многослойных ограждающих конструкций // Бетон и железобетон. 2008. № 6. С. 9–13.
7. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Соболева Г.Н., Золотухина Н.В., Обыденная А.А. Композиционный заполнитель для легких бетонов с использованием хризотилцементных и золошлаковых отходов // Строительные материалы. 2021. № 8. С. 53–59.
8. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Лёгкие бетоны на полых и пористых заполнителях // Строительные материалы. 2024. № 7. С. 41–47.
9. Макридин Н.И. Искусственные пористые заполнители и лёгкие бетоны: учеб. пособие / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова. Пенза: ПГУАС, 2013. 324 с.
10. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Высокопрочные лёгкие бетоны. СПб.: СПбГАСУ, 2022. 192 с.
11. Максимова И.Н., Макридин Н.И. Строительное материаловедение конструкционных лёгких бетонов: моногр. Пенза: ПГУАС, 2014. 204 с.
12. Петров В.П., Макридин Н.И., Ярмаковский В.Н. Пористые заполнители и лёгкие бетоны. Материаловедение. Технология производства: учебное пособие. Самара: СГАСУ, АСВ, 2009. 436 с.
13. Ключков А.В., Павленко Н.В., Строкова В.В., Беленцов Ю.А. К вопросу об использовании стеклянных полых микросфер для теплоизоляционно-конструкционных кладочных растворов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 64–66.
14. Шеховцов В.В., Волокитин О.Г., Отмахов В.И., Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К. Исследование полых микросфер, полученных на основе золошлаковых отходов ТЭС кемеровской области в потоке термической плазмы // Стекло и керамика. 2018. № 1. С. 36–39.
15. Семенов В.С., Розовская Т.А. Сухие кладочные смеси с полыми керамическими микросферами // Научное обозрение. 2013. № 9. С. 195–199.
16. Иванов И.А. Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях. М.: Стройиздат, 1993. 182 с.
17. Карнаков В.А., Ежова Я.В., Марчук С.Д., Донской В.И., Щербаченк Л.А. Аномальные свойства адсорбированных пленок воды в слоистых минералах // Физика твердого тела. 2006. Т. 48. № 11. С. 1946–1948.

Информация об авторах

Иноземцев Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения. E-mail: InozemcevAS@mgsu.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Королев Евгений Валерьевич, доктор технических наук, профессор, действительный член РИА, почетный строитель России, проректор по научной деятельности. E-mail: progector_nr@spbgasu.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 07.07.2024 г.

© Иноземцев А.С., Королев Е.В., 2024

^{1,*}Inozemtcev A.S., ²Korolev E.V.¹National Research University Moscow State University of Civil Engineering²Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

THEORETICAL DESCRIPTION OF WATER DISTRIBUTION IN CONCRETE MIXTURES ON LIGHTWEIGHT AGGREGATE

Abstract. Based on the models considered, it has been demonstrated that a lower density of hollow aggregate requires a smaller amount of it to achieve a given density of lightweight concrete. This provides greater variability in the development and design of the frame-forming part and creates the potential for achieving high mechanical properties. The proportion of adsorption water of a hollow aggregate does not depend on the total amount of water in the system, in contrast a porous aggregate. This allows predicting water consumption and managing the rheotechnological properties of mixtures based on them. The distribution of physically bound water in compositions on hollow aggregate is different from that in compositions on porous aggregate. The proportion of physical water on such an aggregate is greater than on a hollow one for compositions with a density of no more than 1500...1600 kg/m³. If the density is less than this range, then in hollow aggregate systems a higher content of such water is observed.

It is shown that the distribution of water in systems on porous and hollow aggregate differs significantly. Considering the role of porous aggregate in forming the structure of lightweight concrete, it can be assumed that when developing lightweight concrete with a density of more than 1600 kg/m³, it is advisable to use porous aggregate. When developing lightweight concrete with a density of less than 1600 kg/m³, it is advisable to use hollow aggregate. This ensures rational distribution of water in the concrete mixture and, consequently, conditions for the formation of a strong structure of lightweight concrete.

Keywords: lightweight concrete, hollow aggregate, porous aggregate, structure, model, water distribution, water adsorption

REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M. Concrete technology [Tekhnologiya betona]. Moscow: ASV, 2011. 524 p. (rus)
2. Yakubovich M.A. Lightweight reinforced concrete road bridges [Avtodorozhnye mosty iz lyogkogo zhelezobetona]. Moscow: Autotransizdat, 1956. 68 p. (rus)
3. Yudin I.V., Yarmakovskiy V.N. Innovative technologies in industrial housing construction using structural lightweight concrete [Innovacionnye tekhnologii v industrial'nom domostroenii s ispol'zovaniem konstrukcionnykh legkikh betonov]. Building materials. 2010. No. 1. Pp. 15–17. (rus)
4. Lam T.V., Vu D.T., Dien V.K., Bulgakov B.I., Korol E.A. Properties and thermal insulation performance of light-weight concrete. Magazine of Civil Engineering. 2018. T. 84. № 8. Pp. 173–191. DOI: 10.18720/MCE.84.17
5. Solovieva L.N., Khodykin E.I., Mospan A.V. Prospects for the use of silica-containing raw materials for the production of granulated aggregate for lightweight concrete [Perspektivy ispol'zovaniya kremnezemsoderzhashchego syr'ya dlya polucheniya granulirovannogo zapolnitelya legkikh betonov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2008. No. 1. Pp. 9–11. (rus)
6. Davidyuk A.N., Davidyuk A.A. Strength properties of lightweight concretes on glassy aggregates for multilayer enclosing structures [Prochnostnye svoystva legkikh betonov na steklovidnykh zapolnitelyah dlya mnogoslojnykh ograzhdayushchih konstrukcij]. Concrete and reinforced concrete. 2008. No. 6. Pp. 9–13. (rus)
7. Lukutsova N.P., Pykin A.A., Soboleva G.N., Zolotukhina N.V., Obydennaya A.A. Composite filler for lightweight concrete using chrysotile cement and ash waste [Kompozicionnyj zapolnitel' dlya legkikh betonov s ispol'zovaniem hrizotilcementnykh i zoloshlakovykh othodov]. Building materials. 2021. No. 8. Pp. 53–59. (rus)
8. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Lightweight concretes on hollow and porous aggregates [Lyogkie betony na polykh i poristyykh zapolnitelyah]. Building materials. 2024. No. 7. Pp. 41–47. (rus)
9. Makridin N.I., Maksimova I.N. Artificial porous aggregates and lightweight concretes [Iskusstvennye poristyye zapolniteli i lyogkie betony]. Penza: PGUAS, 2013. 324 p. (rus)
10. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. High-strength lightweight concrete [Vysokoprochnyye lyogkie betony]. Saint-Petersburg: SPbGASU, 2022. 192 p. (rus)
11. Maksimova I.N., Makridin N.I. Construction materials science of structural lightweight concrete

[Stroitel'noe materialovedenie konstrukcionnyh lyogkih betonov]. Penza: PGUAS, 2014. 204 p. (rus)

12. Petrov V.P., Makridin N.I., Yarmakovskiy V.N. Porous aggregates and lightweight concrete. Materials science. Production technology [Poristye zapolniteli i lyogkie betony. Materialovedenie. Tekhnologiya proizvodstva]. Samara: SGASU, ASV, 2009. 436 p. (rus)

13. Klochkov A.V., Pavlenko N.V., Strokova V.V., Belentsov Yu.A. On the issue of using glass hollow microspheres for thermal insulation and structural masonry mortars [K voprosu ob ispol'zovanii steklyannyh polyh mikrosfer dlya teploizolyacionno-konstrukcionnyh kladochnyh rastvorov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2012. No. 3. Pp. 64–66. (rus)

14. Shekhovtsov V.V., Volokitin O.G., Otmakhov V.I., Volokitin G.G., Skripnikova N.K. Study of hollow microspheres obtained from ash and slag waste of thermal power plants of the Kemerovo

region in a thermal plasma flow [Issledovanie polyh mikrosfer, poluchennyh na osnove zoloshlakovyh othodov TES kemerovskoy oblasti v potoke termicheskoy plazmy]. Glass and ceramics. 2018. No. 1. Pp. 36–39. (rus)

15. Semenov V.S., Rozovskaya T.A. Dry masonry mixes with hollow ceramic microspheres [Sushie kladochnye smesi s polymi keramicheskimi mikrosferami]. Scientific Review. 2013. No. 9. Pp. 195–199. (rus)

16. Ivanov I.A. Lightweight concretes on artificial porous aggregates [Legkie betony na iskusstvennyh poristyyh zapolnitelyah]. Moscow: Stroyizdat, 1993. 182 p. (rus)

17. Karnakov V.A., Ezhova Ya.V., Marchuk S.D., Donskoj V.I., Shcherbachenk L.A. Anomalous properties of adsorbed water films in layered minerals [Anomal'nye svoystva adsorbirovannyh plenok vody v sloistyyh mineralah]. Solid State Physics. 2006. Vol. 48. No. 11. Pp. 1946–1948. (rus)

Information about the authors

Inozemtcev, Aleksandr S. PhD, Assistant professor. E-mail: InozemtcevAS@mgsu.ru. National Research University Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

Korolev, Evgeniy V. DSc, Professor, Full member of RIA, Honorary Builder of Russia. E-mail: prorektor_nr@spbgasu.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, st. 2nd Krasnoarmeyskaya, 4.

Received 07.07.2024

Для цитирования:

Иноземцев А.С., Королёв Е.В. Теоретическое описание распределения воды в бетонных смесях на легком заполнителе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 10. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-8-16

For citation:

Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Theoretical description of water distribution in concrete mixtures on lightweight aggregate. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 10. Pp. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-8-16

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-17-24

***Кузьмин Е.О., Нелюбова В.В., Володченко А.Н.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: kuzmin9731@mail.ru

ПРОГНОЗИРУЕМАЯ ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ С ДОБАВКОЙ НАНОДИСПЕРСНОГО КРЕМНЕЗЕМА

Аннотация. Исследование направлено на оценку влияния наночастиц кремнезема в качестве добавок в цементные системы на их механические свойства и прогнозируемую прочность в отдаленный период. Использование наночастиц кремнезема (SiO_2) характеризуется их высокой удельной поверхностью площадью, значительной реакционной способностью и потенциалом улучшения структурных параметров цементного камня. Интеграция этих наночастиц в цементный камень вызывает изменение его физико-химических свойств, что в конечном итоге сказывается на прочностных и долговечных характеристиках материала. Наночастицы SiO_2 заполняют поровое пространство и микротрещины в цементном камне, что приводит к более плотной структуре. Они способствуют более глубокой гидратации цемента, ускоряя реакцию образования гидратных фаз, таких как C-S-H (кальций-силикат-гидрат), которые являются основными составляющими, придающими цементному камню прочность. Данные показывают, что добавки наночастиц кремнезема приводят к уменьшению коэффициента торможения и увеличению коэффициента гидратации цемента. Прогнозируемая прочность всех исследуемых составов достигает максимальных значений к 400 суткам, с наибольшей интенсивностью процессов в первые 50 суток. Добавка нанодисперсного кремнезема обеспечивает рост прочности цементного камня на 29 %. Повышенный коэффициент гидратации свидетельствует о более интенсивных взаимодействиях между компонентами цемента и водой, что способствует образованию более прочной и долговечной структуры материала. Результаты указывают на потенциальное применение наночастиц кремнезема для улучшения механических свойств цементных систем и повышения эффективности конструкций.

Ключевые слова: наночастицы кремнезема, цементная система, механические свойства, прочность, коэффициент гидратации, прогнозирование

Введение. Бетон играет ключевую роль в современном строительстве. Непрерывное стремление к улучшению его механических свойств стимулирует поиск новых добавок и улучшенных технологий производства [1, 2]. Одним из перспективных направлений в этой области является использование наноматериалов, включая наночастицы кремнезема, как добавок к цементным системам. Наночастицы кремнезема (НК) обладают уникальными характеристиками, такими как большая поверхностная площадь и высокая активность, что делает их привлекательными для применения в строительной промышленности [2–4]. Несмотря на достаточную изученность влияния наночастиц кремнезема на особенности твердения цемента и прочность цементного камня, вопросы оценки прочности (в том числе, прогнозируемой) в отдаленный период все еще остаются открытыми.

Наночастицы кремнезема (SiO_2) обладают высокой удельной поверхностной площадью, большой реакционной способностью и способностью улучшать структурные параметры цементного камня. Добавление этих наночастиц в цементный камень изменяет его физико-химические свойства, что, в конечном итоге, влияет на прочность и долговечность материала. Одним из главных эффектов добавления наночастиц

кремнезема является улучшение прочности на сжатие цементного камня [5–8]. Это связано с несколькими факторами. Во-первых, наночастицы SiO_2 заполняют поровое пространство и микротрещины в цементном камне, что приводит к более плотной структуре. Во-вторых, они способствуют более глубокой гидратации цемента, ускоряя реакцию образования гидратных фаз, таких как C-S-H (кальций-силикат-гидрат), которые являются основными составляющими, придающими цементному камню прочность [8, 9]. Более плотная и равномерная микроструктура приводит к увеличению прочности на сжатие, что позволяет использовать цементные материалы в более ответственных и нагружаемых конструкциях. Еще одним значимым аспектом является улучшение долговечности цементного камня с добавлением наночастиц кремнезема. Эти частицы могут действовать как ингибиторы для транспорта ионов в цементную матрицу, блокируя или замедляя механизмы коррозии, такие как проникновение хлоридов или углекислого газа [10–13]. Это особенно важно для бетонов, эксплуатируемых в агрессивных средах, где существующие методы защиты (например, использование суперпластификаторов и антикоррозионных добавок) могут быть не столь эффективны.

Влияние наночастиц кремнезема на реологические свойства цементного камня также заслуживает внимания. Введение этих наночастиц может несколько затруднить процесс помола и укладки цементной смеси из-за повышения вязкости. Однако, это может быть компенсировано использованием суперпластификаторов и других химических добавок, которые помогают поддерживать необходимую консистенцию и удобоукладываемость.

Важно отметить, что конечные свойства нанодисперсного кремнезема, а, следовательно, и его эффективность как добавки к бетонным смесям, напрямую зависят от способа и особенностей его синтеза. Авторами ранее предложен способ получения нанокремнезема, обеспечивающий высокую дисперсность сухого порошка (15–30 нм) и повышенную активность благодаря за счет брэнстедовских центров [14].

Целью данного исследования является оценка эффективности использования наночастиц кремнезема, синтезированного при помощи золь-гель технологии с использованием поверхностно-активного вещества (ПАВ) Span83 в цементных системах с точки зрения их механических свойств и прочности в перспективе. В рамках исследования будет проанализировано влияние наночастиц кремнезема на коэффициент торможения и коэффициент гидратации цемента, а также проведен прогноз прочности в отдаленный период.

Материалы и методы. Оценку влияния наночастиц кремнезема на свойства цементного камня с их применением осуществляли по данным кинетики набора и расчёта прогнозируемой прочности цементного камня [15].

Для оценки кинетики набора прочности формировались образцы-кубы с размером ребра 2 см. Исследовались две серии образцов: контрольного (бездобавочного) цементного камня и цементного камня с добавкой синтезированного нанокремнезема. Нанокремнезем вводили в количестве 1,5 % от массы цемента. Выбор дозировки обеспечен предварительными исследованиями, доказывающими эффективность добавки в части повышения прочности. Предварительно производилось перемешивание сухих компонентов с последующим добавлением воды. Формование образцов производилось при водотвердом отношении, равном 0,4. Полученные образцы твердели в нормальных условиях. Далее образцы испытывались на сжатие после 1, 3, 7, 14, 28 суток твердения.

Расчет прогнозируемой прочности материала в отдаленный период производился на основании данных по кинетике набора прочности по методике, разработанной Ш.М. Рахимбаевым

[15]. Методика основана на применении математических зависимостей при анализе данных о кинетике набора прочности и определении с их помощью начальной скорости (U_0), коэффициента торможения ($k_{\text{тор}}$) и коэффициента корреляции ($k_{\text{кор}}$) процессов гидратации.

В рамках данной работы были использованы известные уравнения переноса и выявлены рациональные области применения этих уравнений. Известно, что для целого ряда процессов, происходящих при производстве и эксплуатации строительных материалов, изделий и конструкций, кривые их кинетики можно аппроксимировать при помощи уравнений, являющихся частными случаями:

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma} \right)_0 + k_1 \sigma \quad (1)$$

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma} \right)_0 + k_2 \tau \quad (2)$$

где τ – время твердения (гидратации), сут; σ – предел прочности при сжатии, МПа; $(\tau/\sigma)_0$ – величина, обратная начальной скорости твердения (гидратации), сут/МПа; k_1 и k_2 – коэффициенты торможения процесса твердения (гидратации).

В данных уравнениях учтены следующие положения: потенциальная реакционная способность системы задает начальную, максимальную для исследуемой системы в заданных условиях, скорость процесса U_0 . С течением времени скорость процесса снижается, стремясь к нулю.

При расчете по уравнениям (1) и (2) выбор коэффициентов для дальнейшей работы осуществляется исходя из того, что начальная скорость процесса U_0 должна быть больше нуля, коэффициент торможения $k_{\text{тор}}$ – минимальным, а коэффициент корреляции $k_{\text{кор}}$ – максимальным.

Прогнозная прочность составов рассчитывалась по уравнению (3):

$$\sigma_{28} = \frac{\tau \cdot U_0}{1 + \tau \cdot U_0 \cdot k_{\text{тор}}} \quad (3)$$

где τ – срок жизни материала, сут; U_0 – начальная скорость процесса; $k_{\text{тор}}$ – коэффициент торможения.

Основная часть. Анализируя зависимости предела прочности при сжатии от состава цементного камня, можно сделать вывод о существенном влиянии присутствия наночастиц кремнезема на процессы структурообразования цементного камня при твердении (рис. 1).

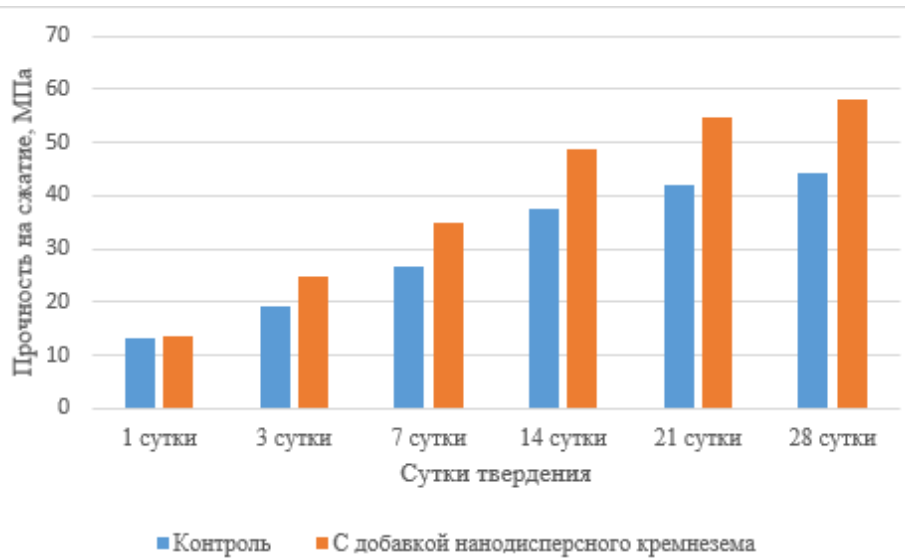


Рис. 1. Кинетика набора прочности на сжатие цементного камня в зависимости от состава

Сравнительный анализ изменений прочности контрольных (бездобавочных) образцов и с добавкой нанокремнезема (НК) на сжатие в течение 28 суток позволяет выявить влияние добавки НК на кинетику набора прочности бетона. На ранних стадиях твердения, в возрасте 1 суток прочность как образца контроля, так и образца с добавкой НК близка и составляет 13,09 МПа и 13,49 МПа соответственно. Это говорит о том, что добавка НК не оказывает существенного влияния на начальную прочность бетона. Однако, уже на 7 суток разница в прочности становится заметной. Образец с добавкой НК демонстрирует более высокую прочность – 34,89 МПа против 26,84 МПа у образца контроля. Это свидетельствует о положительном влиянии НК на набор прочности на более поздних стадиях твердения. В период с 7 до 14 суток темпы набора прочности у обоих образцов замедляются, но образец с добавкой НК по-прежнему имеет более высокую прочность: разница составляет 29,8 % (48,93 МПа против 37,69 МПа). Это указывает на то, что добавка НК способствует более интенсивному формированию прочной структуры бетона.

Между 14 и 21 сутками разрыв в прочности между образцами контроля и с добавкой НК сохраняется, и образец с добавкой НК достигает прочности 54,87 МПа, в то время как прочность образца контроля составляет 42,21 МПа. На заключительном этапе наблюдения, с 21 до 28 суток, прочность обоих образцов продолжает увеличиваться, но темпы роста замедляются. Образец с добавкой НК демонстрирует более высокий конечный результат – 57,95 МПа против 44,24 МПа у образца контроля.

В результате можно сделать вывод о том, что контрольный образец подвержен значительным флуктуациям в прочности, тогда как образец с добавлением наночастиц кремнезема, проявляет

более плавные изменения, с устойчивым ростом прочности по мере увеличения времени твердения.

В результате расчета установлено, что кинетика твердения лучше описывается уравнением теории переноса (2), так как имеет наибольший коэффициент корреляции и начальная скорость U_0 больше нуля (таблица 1). При расчете по уравнению (1) значения начальной скорости процесса меньше нуля, коэффициенты корреляции ниже. Для всех исследуемых составов отмечается высокий коэффициент корреляции, что говорит о воспроизводимости эксперимента и достоверности полученных данных и зависимостей.

Таблица 1

Результаты расчета по уравнению теории переноса

Состав	Значения энергетических констант при расчете		
	U_0	$k_{\text{тор}}$	$k_{\text{кор}}$
Контроль	14,89	0,0209	0,9831
С добавкой НК	18,72	0,0158	0,9864

Согласно полученным данным, применение в качестве добавок наночастиц кремнезема приводит к уменьшению коэффициента торможения и увеличению коэффициента гидратации цементной системы.

Для проверки прогнозируемой прочности составов полученные кинетические константы подставляются в уравнение (3). В таблице 2 представлены расчетные и экспериментальные значения прочности исследуемых составов на 28 суток твердения: отклонение до 3 % говорит о достоверности результатов.

Таблица 2
Расчетные прочности составов в возрасте 28 суток

Состав	$\sigma_{расч}$, МПа	$\sigma_{эксперим}$, МПа	Отклонение Δ , МПа	Отклонение Δ , %
Контроль	42,92	44,24	-1,32	2,55
С добавкой НК	56,47	57,95	-1,48	2,98

Как следует из результатов расчета прогнозируемой прочности в отдаленный период (рис. 2), для всех исследуемых составов к 400 суткам набора прочности достигаются максимальные значения.

Наибольшая интенсивность процессов отмечается в первые 50 суток (рис. 2).

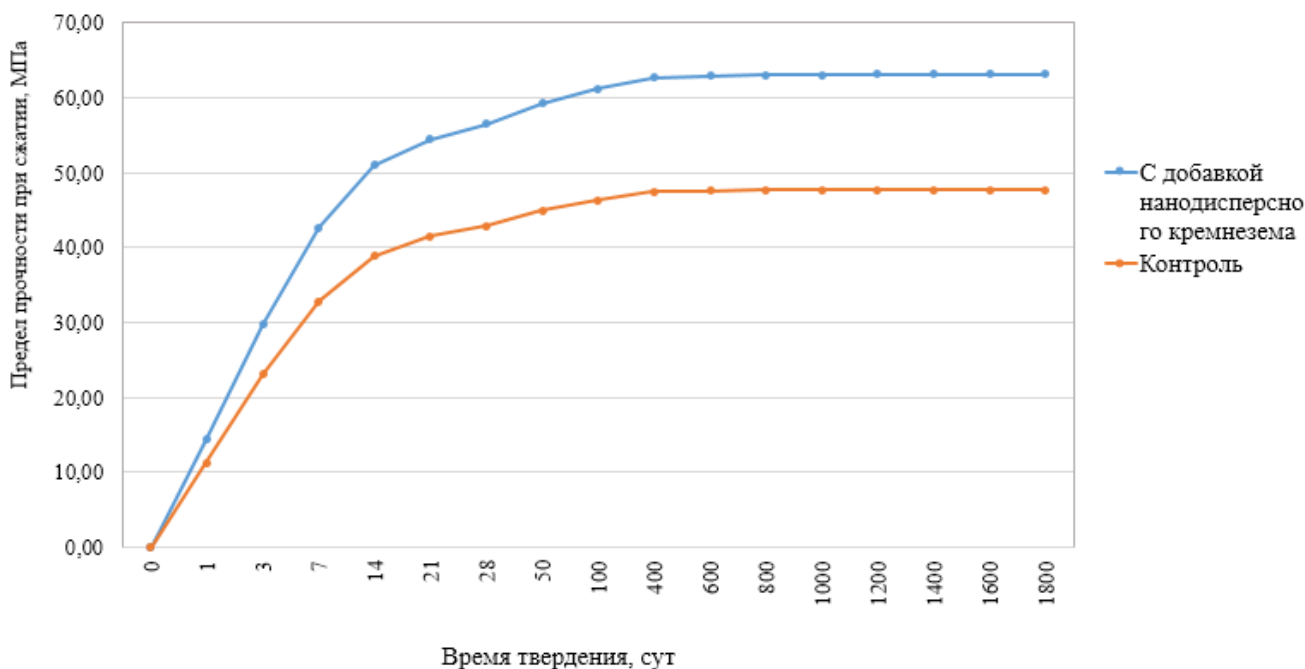


Рис 2. Расчетная кинетика набора прочности цементного камня в зависимости от состава

Сразу заметен значительный рост прочности вяжущего материала с добавлением наночастиц кремнезема по сравнению с контрольной смесью. На начальном этапе, в течение первых суток, оба материала набирают прочность сравнительно быстро. На контрольном графике наблюдается формирование прочности до 10 МПа, в то время как смесь с наночастицами кремнезема увеличивает прочность до более 15 МПа. В течение первых трех суток оба материала продолжают набор прочности, достигая значений около 25 МПа для Контроля и около 35 МПа для образца с добавкой НК. На этом этапе уже можно отметить, что добавление наночастиц кремнезема существенно увеличивает скорость набора прочности. По прошествии семи суток контрольный образец достигает прочности около 30 МПа, тогда как образец с наночастицами кремнезема превышает 40 МПа, показывая значительное превосходство в показателях. В течение следующих 14 и 21 суток тренд сохраняется: контрольный материал постепенно набирает прочность и достигает примерно 35 МПа на 21 сутки, а материал с наночастицами кремнезема набирает значительно больше — порядка 50 МПа.

Таким образом, график четко демонстрирует, что на стадии раннего твердения наночастицы кремнезема значительно ускоряют процесс набора прочности. В промежуток между 28 и 100 сутками для обоих образцов происходит продолжение набора прочности, причем в значительно более медленном темпе по сравнению с начальным этапом. На 28 сутки прочность контрольного образца приближается к 40 МПа, в то время как у образца с наночастицами кремнезема прочность уже достигает 55 МПа. На 100 сутки прочность контрольного образца стабилизируется около отметки 45 МПа; материал с наночастицами кремнезема достигает прочности около 60 МПа. В дальнейшем, вплоть до 1800 суток, график демонстрирует замедление набора прочности для обоих образцов. Контрольный состав продолжает медленно набирать прочность, достигая максимума близко к 50 МПа к 1800 суткам. Материал с наночастицами кремнезема практически не изменяет свою прочность после 100 суток, оставаясь на уровне около 60 МПа. Таким образом, весь график показывает значительное преимущество в скорости и величине набора прочности для цементного камня с добавлением

наночастиц кремнезема на всех стадиях твердения, особенно в ранние сроки. Эти данные указывают на высокую эффективность применения наночастиц кремнезема для улучшения механических характеристик цементных композитов, что, в свою очередь, может существенно повысить их эксплуатационные характеристики и долговечность.

Начальные стадии набора прочности характеризуются внезапным и быстрым ростом прочностных характеристик. В первый день после закладки образец достигает прочности около 10 МПа. Этот резкий рост можно объяснить активными процессами гидратации цементных частиц, которые происходят в начальные часы и сутки после замешивания цемента с водой. В течение первых трех суток можно наблюдать продолжение интенсивного набора прочности. На третий день материал набирает прочность до примерно 25 МПа. В этот период гидратационные процессы еще быстры, происходящие реакции между цементом и водой способствуют образованию продуктов гидратации, таких как гель гидросиликата кальция, который заполняет поры и способствует увеличению прочности. В течение следующих четырех суток, до семи суток, график демонстрирует продолжение роста прочности, однако процесс несколько замедляется по сравнению с первым трёхдневным этапом. На седьмой день прочность контрольного цементного камня достигает уже около 30 МПа. Это показывает, что реакционные процессы стабилизируются, и, хотя они продолжают, их интенсивность уже не так высока, как в первые дни. Дальнейший рост прочности продолжается, но еще медленнее в период от 7 до 14 суток. График демонстрирует достижение прочности около 35 МПа на четырнадцатый день. Этот промежуток характеризуется постепенным уменьшением скорости гидратационных реакций и уплотнением микроструктуры цементного камня. В период от 14 до 28 суток рост прочности продолжается. На 28 сутки прочность контрольного образца достигает порядка 40 МПа. На этой стадии можно видеть, что реакция гидратации цемента значительно замедляется со временем, и скорость набора прочности заметно снижается. Между 28 и 50 сутками график демонстрирует почти горизонтальную линию, что указывает на незначительное увеличение прочности, которая достигает примерно 45 МПа.

Таким образом, показаны особенности набора прочности цементного камня с учетом специфики его состава. Характер набора прочности цементного камня контрольного и модифицированного сопоставимы и отличаются быст-

рым набором прочности с последующим замедлением и стабилизацией прочности цементного материала в возрасте около 50 дней, после чего график происходят минимальные изменения в прочностных характеристиках вплоть до 1800 суток. Эти данные указывают на типичную кинетическую кривую для модифицированных цементных материалов, где ключевую роль играют начальные процессы гидратации и последующее уплотнение микроструктуры за счет образования продуктов гидратации.

Выводы. Таким образом, в работе показаны особенности кинетики набора прочности контрольного (бездобавочного) и модифицированного (с добавкой нанодисперсного кремнезема) как в ранний период (в первый месяц), так и в отдаленные сроки (до 400 суток). Наиболее интенсивно набор прочности идет в первые 28 суток, далее процессы значительно замедляются, и максимум прочности формируется к 400 суткам. При этом состав с добавкой нанокремнезема обеспечивает превышение прочности на 29 %. При этом с введением нанодисперсного кремнезема наблюдается уменьшение коэффициента торможения, что может быть связано с изменениями в структуре материала и его поверхностных свойствах под воздействием наночастиц. Это может приводить к улучшению текучести и обработки цементной системы.

Увеличение коэффициента гидратации указывает на более активные процессы взаимодействия компонентов цемента с водой, что способствует формированию более прочной и устойчивой структуры материала.

Таким образом, использование наночастиц кремнезема в качестве добавок в цементные системы обещает быть перспективным направлением для улучшения их характеристик и повышения эффективности конструкций, что может иметь существенное значение для строительной индустрии и инфраструктурного развития.

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. Семенова М.М., Ильина Л.В. Применение нанокремнезема для увеличения прочности мелкозернистого бетона // LVI Международные научные чтения (памяти Р.Е. Алексеева): Сборник статей Международной научно-практической конференции. 2019. С. 4–6.
2. Потапов В.В., Гордеева Е.В., Шитиков Е.С., Сердан А.А. Модифицирование цементных материалов малыми дозами гидротермального

нанокремнезема и пластифицирующими добавками // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. №. 3 (48). С. 93–102. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-3-11

3. Шведова М.А., Артамонова О.В. Изучение реологических характеристик наномодифицированных цементных смесей // Молодые ученые-развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2020. №. 1. С. 743–746.

4. Низина Т.А., Балыков А.С., Коровкин Д.И., Володин В.В., Карабанов М.О. Кинетика ранних стадий твердения цементных систем с индивидуальными и комплексными добавками разной химической природы // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году. 2021. С. 186–192.

5. Kamasamudram K.S., Ashraf W., Landis E.N. Cellulose nanofibrils with and without nanosilica for the performance enhancement of Portland cement systems // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 285. 121547. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121547

6. Tabish M., Zaheer M. M., Baqi A. Effect of nano-silica on mechanical, microstructural and durability properties of cement-based materials: A review // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 65. 105676. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.105676

7. Hamada H., Shi J., Yousif S.T., Al Jawahery M., Tayeh B., Jokhio G. Use of nano-silica in cement-based materials—a comprehensive review // Journal of Sustainable Cement-Based Materials. 2023. Vol. 12. №. 10. Pp. 1286–1306. DOI: 10.1080/21650373.2023.2214146

8. Dong P., Allahverdi A., Andrei C.M., Basim N.D. The effects of nano-silica on early-age hydration reactions of nano Portland cement // Cement

and Concrete Composites. 2022. Vol. 133. Pp. 104698. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104698

9. Строкова В.В., Хмара Н.О., Нелюбова В.В., Шаповалов Н.А. Малые архитектурные формы: состав и свойства бетонов для их получения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. №. 11. С. 8–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-11-8-31

10. Потапов В.В., Горев Д.С. Сравнительные результаты повышения прочности бетона вводом нанокремнезема и микрокремнезема // Современные наукоемкие технологии. 2018. №. 9. С. 98–102. DOI: 10.17513/snt.37176

11. Fu Q. Zhao, X., Zhang, Z., Xu, W., Niu, D. Effects of nanosilica on microstructure and durability of cement-based materials // Powder Technology. 2022. Vol. 404. 117447. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117447

12. Sargam Y., Wang K. Influence of dispersants and dispersion on properties of nanosilica modified cement-based materials // Cement and Concrete Composites. 2021. Vol. 118. 103969. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103969

13. Нелюбова В.В., Усиков С.А., Нецвет Д.Д., Боцман Л.Н., Шаповалов Н.А. Прогнозирование прочности цемента с модификаторами для самоуплотняющихся бетонов // Вестник БГТУ им. ВГ Шухова. 2022. №. 12. С. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-8-17

14. Патент РФ 2701911. Способ получения гидрозоля монодисперсного нанокремнезема для изготовления бетона / Баскаков П.С., Строкова В.В., Кузьмин Е.О. Заявл. 20.03.2019. Опубл. 02.10.2019. Бюл. № 28.

15. Рахимбаев Ш.М., Авершина Н.М. Прогнозирование долговечности строительных материалов по единичному сроку испытаний // Строительные материалы. 1994. №. 4. С. 17–18.

Информация об авторах

Кузьмин Евгений Олегович, аспирант. E-mail: kuzmin9731@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Нелюбова Виктория Викторовна, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник НИЛ "Самоочищающиеся покрытия". E-mail: nelubova@list.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Володченко Анатолий Николаевич, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник НИЛ "Самоочищающиеся покрытия". E-mail: s-nsm@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 05.07.2024 г.

© Кузьмин Е.О., Нелюбова В.В., Володченко А.Н., 2024

***Kuzmin E.O., Nelyubova V.V., Volodchenko A.N.**
 Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
 *E-mail: kuzmin9731@mail.ru

THE PREDICTED STRENGTH OF CEMENT STONE WITH THE ADDITION OF NANODISPERSED SILICA

Abstract. The study is aimed at assessing the effect of silica nanoparticles as additives in cement systems on their mechanical properties and predicted strength in the long term. The use of silica nanoparticles (SiO_2) is characterized by their high specific surface area, significant reactivity and the potential to improve the structural parameters of cement stone. The integration of these nanoparticles into cement stone causes a change in its physico-chemical properties, which ultimately affects the strength and durability characteristics of the material. SiO_2 nanoparticles fill the pore space and microcracks in the cement stone, which leads to a denser structure. They promote deeper hydration of cement by accelerating the reaction of formation of hydrate phases such as C-S-H (calcium silicate hydrate), which are the main components that give cement stone strength. The data show that the addition of silica nanoparticles leads to a decrease in the braking coefficient and an increase in the hydration coefficient of cement. The predicted strength of all studied compounds reaches maximum values by 400 days, with the highest intensity of processes in the first 50 days. The addition of nanodispersed silica provides a 29% increase in the strength of cement stone. The increased hydration coefficient indicates more intense interactions between cement components and water, which contributes to the formation of a stronger and more durable material structure. The results indicate the potential use of silica nanoparticles to improve the mechanical properties of cement systems and increase the efficiency of structures.

Keywords: silica nanoparticles, cement system, mechanical properties, strength, hydration coefficient, forecasting.

REFERENCES

1. Semenova M.M., Ilyina L.V. The use of nanosilicon to increase the strength of fine-grained concrete [Primenenie nanokremnezema dlya uvelicheniya prochnosti melkozernistogo betona]. LVI Mezhdunarodnye nauchnye chteniya (pamyati R.E. Alekseeva): Sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2019. Pp. 4–6. (rus)
2. Potapov V.V., Gordeeva E.V., Shitikov E.S., Serdan A.A. Modification of cement materials with small doses of hydrothermal nanosilicon and plasticizing additives [Modificirovanie cementnykh materialov malymi dozami gidrotermal'nogo nanokremnezema i plastificiruyushchimi dobavkami]. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2021. No. 3 (48). Pp. 93–102. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-3-11 (rus)
3. Shvedova M.A., Artamonova O.V. The study of rheological characteristics of nanomodified cement mixtures [Izuchenie reologicheskikh kharakteristik nanomodificirovannykh cementnykh smesey]. Molodye uchenye-razvitiyu Nacional'noj tekhnologicheskoy iniciativy (POISK). 2020. No. 1. Pp. 743–746. (rus)
4. Nizina T.A., Balykov A.S., Korovkin D.I., Volodin V.V., Karabanov M.O. Kinetika rannikh stadij tverdeniya cementnykh sistem s individual'nymi i kompleksnymi dobavkami raznoj khimicheskoy prirody. Fundamental'nye, poiskovyie i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noj otrasli Rossijskoj Federacii v 2020 godu. 2021. Pp. 186–192. (rus)
5. Kamasamudram K.S., Ashraf W., Landis E.N. Cellulose nanofibrils with and without nanosilica for the performance enhancement of Portland cement systems. Construction and Building Materials. 2021. Vol. 285. 121547. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121547
6. Tabish M., Zaheer M. M., Baqi A. Effect of nano-silica on mechanical, microstructural and durability properties of cement-based materials: A review. Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 65. 105676. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.105676
7. Hamada H., Shi J., Yousif S.T., Al Jawahery M., Tayeh B., Jokhio G. Use of nano-silica in cement-based materials—a comprehensive review. Journal of Sustainable Cement-Based Materials. 2023. Vol. 12. №. 10. Pp. 1286–1306. DOI:10.1080/21650373.2023.2214146
8. Dong P., Allahverdi A., Andrei C.M., Basim N.D. The effects of nano-silica on early-age hydration reactions of nano Portland cement. Cement and Concrete Composites. 2022. Vol. 133. 104698. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104698
9. Strokova V.V., Khmara N.O., Nelyubova V.V., Shapovalov N.A. Small architectural forms: composition and properties of concretes for their production [Malye arhitekturnye formy: sostav i svoystva betonov dlya ikh polucheniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 11. Pp. 8–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-11-8-31 (rus)
10. Potapov V.V., Gorev D.S. Comparative results of increasing the strength of concrete by introducing nanosilicon and microsilicon [Sravnitel'nye

rezultaty povysheniya prochnosti betona vvodom nanokremnezema i mikrokremnezema]. Scientific magazine «Modern high technologies». 2018. No. 9. Pp. 98–102. DOI: 10.17513/snt.37176 (rus)

11. Fu Q. Zhao, X., Zhang, Z., Xu, W., Niu, D. Effects of nanosilica on microstructure and durability of cement-based materials. Powder Technology. 2022. Vol. 404. 117447. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117447

12. Sargam Y., Wang K. Influence of dispersants and dispersion on properties of nanosilica modified cement-based materials. Cement and Concrete Composites. 2021. Vol. 118. 103969. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103969

13. Nelyubova V.V., Usikov S.A., Netsvet D.D., Boatsman L.N., Shapovalov N.A. Forecasting

the strength of cement with modifiers for self-sealing concretes [Prognozirovanie prochnosti cementa s modifikatorami dlya samouplotnyayushchikhsya betonov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-8-17 (rus)

14. Baskakov P.S., Strokov V.V., Kuzmin E.O. A method for obtaining a monodisperse nanosilicon hydrosol for the manufacture of concrete. Patent RF, no. 2701911, 2019.

15. Rakhimbaev Sh.M., Avershina N.M. Forecasting the durability of building materials by a single test period [Prognozirovanie dolgovechnosti stroitel'nykh materialov po edinichnomu sroku ispytaniy]. Building materials. 1994. No. 4. Pp. 17–18. (rus)

Information about the authors

Kuzmin, Evgeny O. Postgraduate student. E-mail: kuzmin9731@mail.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Nelyubova, Victoria V. Doctor of Technical Sciences, Professor, leading researcher at the Research Institute "Self-cleaning coatings". E-mail: nelubova@list.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Volodchenko, Anatoly N. Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, leading researcher at the Research Institute "Self-cleaning coatings". E-mail: s-nsm@mail.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Received 05.07.2024

Для цитирования:

Кузьмин Е.О., Нелюбова В.В., Володченко А.Н. Прогнозируемая прочность цементного камня с добавкой нанодисперсного кремнезема // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 10. С. 17–24. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-17-24

For citation:

Kuzmin E.O., Nelyubova V.V., Volodchenko A.N. The predicted strength of cement stone with the addition of nanodispersed silica. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 10. Pp. 17–24. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-17-24

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-25-34

***Кравцов А.И., Макаева А.А., Оденбах И.А.**

Оренбургский Государственный Университет

*E-mail: alivkr@mail.ru

О НЕКОТОРЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ СВЕТОПРОНИЦАЕМОГО БЕТОНА

Аннотация. Светопроницаемый бетон с прозрачными элементами на основе полиметилметакрилата является инновационным материалом, обеспечивающим энергоэффективность и декоративные эффекты в зданиях и сооружениях. Однако стоимость и сложность производства ограничивают его широкое применение.

Целью исследования является анализ влияния прозрачных элементов из полиметилметакрилата шириной 30 мм и толщиной 1,2 мм на физико-механические характеристики бетона, в частности, его прочностные свойства.

В ходе исследования влияния светопроницаемых включений на характеристики бетона было установлено, что с ростом их объемной доли от 2,8 % до 8,9 % наблюдается уменьшение прочности бетона на изгиб на 60 %, в то время как его прочность при сжатии увеличивается на 34 % в сравнении с образцами бетона, не содержащими светопроницаемых элементов. Для определения влияния водоцементного отношения и расхода полипропиленовой фибры на прочностные характеристики светопроницаемого бетона использовался двухфакторный эксперимент, при этом объемное содержание элементов из полиметилметакрилата, их форма и размеры, а также расположение в теле бетона были постоянными.

Исследование показало, что светопроницаемый бетон демонстрирует прочностные характеристики, позволяющие использовать его в качестве материала для ограждающих конструкций, способствующих более эффективному использованию естественного освещения.

Ключевые слова: светопроницаемый бетон, полиметилметакрилат, водоцементное отношение, полипропиленовая фибра, прочность на сжатие и изгиб

Введение. В последнее время во всех сферах деятельности человека нарастает влияние экологической повестки. Устойчивое развитие, зеленые технологии, нулевой углеродный след и другие понятия становятся популярными и употребляются в самых разнообразных контекстах. Одним из элементов этого тренда стал светопроницаемый бетон (СПБ) [1]. Светопроницаемый бетон позиционируют в основном как заменитель искусственного освещения [2, 3] реже, как декоративный элемент интерьера [3, 4] или элемент общественной коммуникации, например, активная дорожная разметка [3, 5].

В соответствии с назначением, свойства данного материала исследуются уже более 20 лет, со времени его изобретения венгерским архитектором Ароном Лозонци в 2001 году [6, 7].

Светопроницаемый бетон включает в себя, кроме обычных компонентов бетона – вяжущего, заполнителя воды и добавок, прозрачные включения в виде волокон, стержней или полос на основе стекла или полимеров. Полученный материал (бетон) обладает способностью частично пропускать через свою толщу свет, создавая при этом весьма необычный эффект внутри помещений, это дает определенные преимущества по энергопотреблению и декоративные свойства. Применение светопроницаемого бетона пока ограничено в связи с тем, что он является весьма

дорогостоящим и трудоемким в процессе изготовления [8, 9].

Несмотря на то, что вероятно данный вид бетона можно отнести к специальным, т.к. основной его функцией является светопропускание и эта функция является определяющей для идентификации данного материала, значительное внимание уделяется и свойствам, которые характеризуют данный бетон как конструкционный. Многие исследователи отмечают, что внедрение в бетон полимерных компонентов в значительной степени отражается на его физико-механических свойствах [10, 11, 12–15].

Нужно отметить, что полученные экспериментальные данные нельзя назвать однозначными. Большая доля авторов склоняется к тому, что прочностные характеристики бетона снижаются при введении оптических волокон. Так при исследовании свойств светопроницаемого бетона с волокнами из полиметилметакрилата (ПММК) установлено [16], что прочность на сжатие линейно снижается с увеличением объемной доли оптического волокна, причем прочностные характеристики после тепловой обработки оказались выше, чем у бетона естественного твердения [17].

В работах [18, 11] ухудшение механических свойств СПБ объясняется параллельным распо-

ложением волокон и чрезвычайно гладкой поверхностью полимерного оптического волокна, что снижает сцепление с цементным камнем.

Снижение прочности при увеличении содержания полимерных оптических волокон в бетоне отмечено в работах [19, 9]. Подобные же эффекты были получены и при использовании в качестве основы для СПБ самоуплотняющихся смесей при этом прочность бетона с увеличением объёмного содержания оптических волокон с 2 % до 4 % снижается [20].

Наряду с отрицательным влиянием оптических волокон на прочностные характеристики светопроницаемого бетона в некоторых исследованиях отмечается и положительный эффект от их введения [9, 21–23]. В частности, в исследовании [24] зафиксировано повышение прочности на сжатие почти на 30 %, встречаются данные свидетельствующие о повышении прочности на сжатие и снижении прочности при изгибе [25]. В отдельных работах указывается, что явное влияние на прочностные свойства не прослеживается [26, 27] либо оно незначительное.

Следует подчеркнуть, что в основном изменения прочностных характеристик рассматриваются в зависимости от содержания светопроницаемых элементов, которые чаще всего представлены волокнами из ПММК. При этом другие факторы, характеризующие состав смеси, такие, как например водоцементное отношение остаются чаще на постоянном уровне. В принципе светопроницаемые элементы могут быть различной формы, например, отпечатанные на 3D принтере или полученные литьем, однако исследования бетонов с подобными элементами практически отсутствуют. Существуют примеры использования прямоугольных включений в виде стеклянных полос, потери прочности бетона в этом случае по сравнению с обычным бетоном были в пределах от 4 % до 5 % [28].

Для улучшения прочностных характеристик СПБ используются различные в основном из-

вестные способы, которые заключаются в применении добавок пластификаторов, дисперсного армирования металлической [23], стеклянной [29] или полимерной [30] фиброй. Достаточно давно для улучшения таких характеристик бетона, как прочность на изгиб и растяжение, успешно применяется полипропиленовая фибра [31].

В случае бетона со светопроницаемыми включениями возможно ослабление сечения материала и повышенная склонность к трещинообразованию, предполагается, что введение полипропиленовой фибры может устранить эти недостатки, а снижение водоцементного отношения повысит прочностные характеристики.

Целью данного исследования является анализ физико-механических характеристик светопроницаемого бетона со светопрозрачными элементами на основе полос полиметилметакрилата.

Материалы и методы. Для предварительной оценки влияния объёмного содержания светопроницаемых элементов в бетоне исследовались образцы-балочки $4 \times 4 \times 16$ см с содержанием включений из полиметилметакрилата (ПММК) в виде полос длиной 4 см, шириной 3 см и толщиной 1,2 мм, которые утапливались в мелкозернистую бетонную смесь во время формования. Соотношение между вяжущим и песком – 1/3, водоцементное отношение – $B/C = 0,8$. Для сравнения изготавливались эталонные образцы без светопроницаемых включений. Образцы твердели в условиях тепловой обработки по режиму: 6 часов – подъём температуры до 85°C , далее – естественное остывание в пропарочной камере с 85°C до 25°C .

После твердения образцы испытывали по методике ГОСТ 310.4-84 на изгиб и сжатие (см. рис. 1). В качестве результатов учитывалось также и процентное соотношение величин свойств образцов со светопропускающими элементами и эталонными образцами.



Рис. 1. Испытание образцов на изгиб (а) и сжатие (б)

Для определения влияния на характеристики светопроницаемого бетона параметров состава был реализован полный двухфакторный эксперимент. В качестве варьируемых параметров приняты: водоцементное отношение – В/Ц, и содержание в смеси полипропиленовой фибры – кг/м³. Характеристики плана эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1
Основные характеристики плана экспериментов

Характеристика	X ₁ , В/Ц:	X ₂ , фибра, кг/м ³
Нижний уровень	0,6	0,87
Верхний уровень	0,8	2,57

В соответствии с планом изготавливали образцы балочки 4×4×16 см, аналогично предыдущим составам, но с кратковременным (10–20 сек.) виброуплотнением. Также были изготовлены и эталонные образцы без ПММК элементов. Соотношение между вяжущим и песком – 1/3, водоцементное отношение и расход полипропиленовой фибры в соответствии с планом. Твердение и последующее испытание образцов осуществлялось аналогично предыдущим составам.

В качестве материалов для изготовления образцов использовали:

– вяжущее цемент ЦЕМ II/A–III 42,5Н производства AKKERMANN CEMENT – Новотроицк;

– песок ООО «Уралсиликат», месторождение расположено в 3-х км к востоку от с. Архиповка и в 50 км к северо-востоку от г. Оренбурга. Средняя плотность 2,55 г/см³, модуль крупности M_к=2,1;

– полиметилметакрилат – листы толщиной 1,2 мм, плотность 1,13 г/см³;

– фибра полипропиленовая ТУ 2499-007-90557835-2014 производства ООО «Цеммикс».

Основная часть. После проведения экспериментальных испытаний образцов, изготовленных с целью первичной оценки эффекта от варьирования объемного содержания элементов на основе полиметилметакрилата на характеристики СПБ по сравнению с контрольными образцами, без внедрённых светопроницаемых компонентов, были зафиксированы следующие результаты.

Процентное содержание ПММК элементов в объёме образцов составило 2,8 % (4 элемента в образце), 5,7 % (8 элементов в образце) и 8,9 % (12 элементов в образце), расположение ПММК элементов в образцах представлено на рис. 2 и 3.

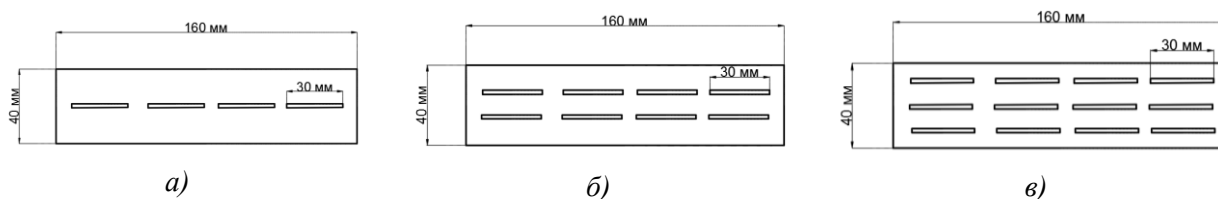


Рис. 2. Схема расположения светопроницаемых элементов в образце (вид сверху):
а) объемное содержание элементов 2,8 %; б) объемное содержание элементов 5,7 %;
в) объемное содержание элементов 8,9 %



Рис. 3. Общий вид образцов:
а) образцы для испытаний; б) презентационный образец для демонстрации светопропускания

В процессе сопоставления параметров светопроницаемого бетона с показателями эталонных образцов было выявлено, что с ростом процентного содержания в них включений на основе полиметилметакрилата происходит незначительное уменьшение плотности бетонной смеси, а также

снижение прочности на изгиб с 95 % для образцов с 2,8 % ПММК до 41 % для образцов с 8,9 % ПММК. Прочность при сжатии при этом повышается с увеличением содержания ПММК на 34 % (см. рис.4). Первые два факта согласуются с

результатами некоторых исследований, в которых указывается на снижение плотности и прочности при увеличении содержания оптоволоконных включений в бетон. Так в работах [9, 14–17, 30] исследовались бетоны с различным содержанием оптических волокон и было отмечено снижение прочностных показателей. Возможно, в данном случае повышение прочности при сжатии

связано с формой и расположением светопрозрачных элементов. Они располагались перпендикулярно сжимающему усилию и, вероятно, могли повлиять на прочностные характеристики, т.к. по данным платформы MatWeb [32] прочность при растяжении ПММК лежит в пределах от 25 МПа до 80 МПа, что значительно выше прочности при растяжении испытанных образцов.

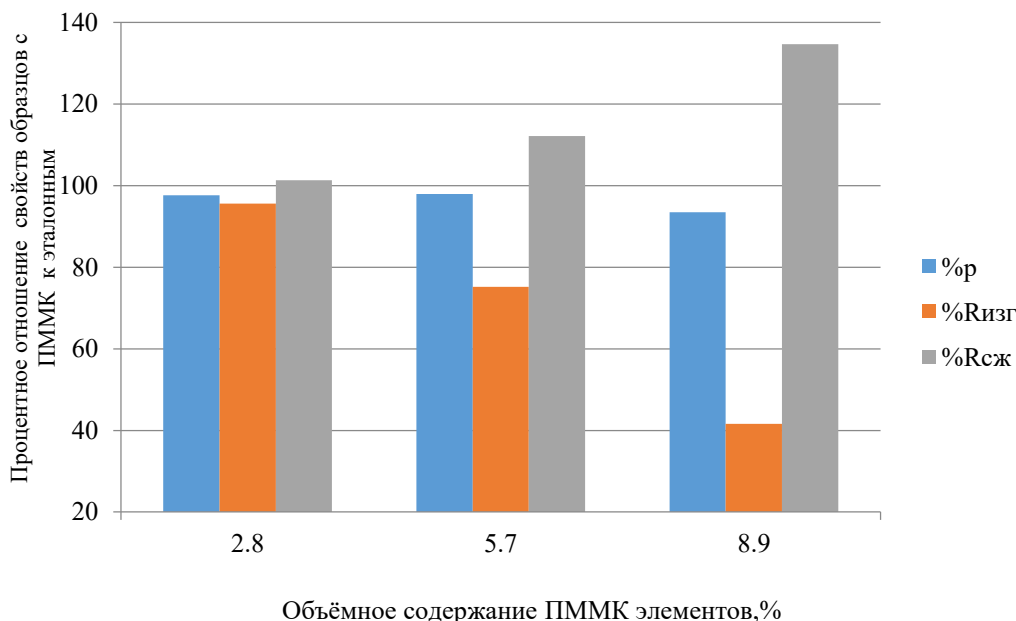


Рис. 4. Влияние объемного содержания светопрозрачных элементов на процентное соотношение плотности (%ρ) и прочности образцов на сжатие (%R_{сж}), и изгиб (%R_{изг}) по сравнению с эталонными (без светопрозрачных элементов)

По результатам предварительных экспериментов определены прочностные характеристики светопрозрачного бетона, которые необходимо оптимизировать и способы улучшения данных свойств.

С целью исследования воздействия водоцементного соотношения и содержания полимерного фиброволокна на прочностные характеристики СПБ был проведен полный факторный эксперимент с двумя переменными (см. табл. 1), параметры которого отражены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры плана эксперимента и результаты испытаний

Номер опыта	Матрица планирования		Натуральные значения переменных		Результаты испытаний				
	x1	x2	фибра, кг/м ³	В/Ц	R _{изг} , МПа	% R _{изг} эт	R _{сж} , МПа	% R _{сж} эт	% разр. ПММК элементов
1	-1	-1	0,87	0,6	5,12	89,9	24,3	115,4	33,1
2	1	-1	2,57	0,6	3,42	80,8	17,1	126,1	43,6
3	-1	1	0,87	0,8	4,61	88,3	25,1	118,8	41,1
4	1	1	2,57	0,8	3,42	74,3	17,9	143,7	75,3

Объемное содержание светопрозрачных элементов для всех образцов, кроме эталонных, принято равным 5,7 %, т.е. в каждом образце размещалось 8 элементов размером 40×30×1,2 мм (см рис. 2б).

После твердения образцов в условиях тепловой обработки образцы испытывали на изгиб и сжатие (рис. 1), характер разрушения образцов представлен на рис. 5.

Нужно отметить, что образцы после испытания на сжатие в связи с наличием дисперсного армирования (полипропиленовой фибры) не претерпели значительных изменений и были разрушены дополнительно вручную, это дало возможность оценить характер разрушения светопрозрачных элементов внутри образцов и их процентное содержание.

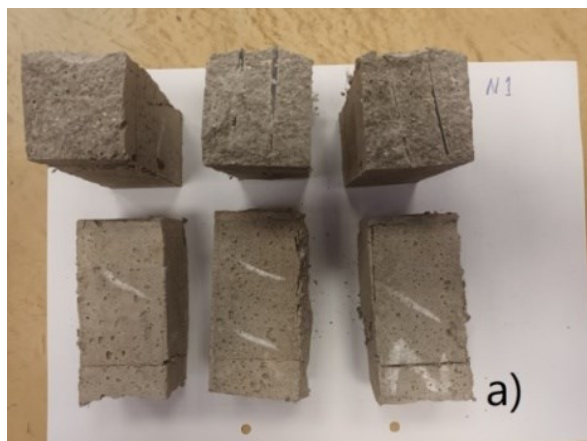


Рис.5. Характер разрушения образцов при изгибе (а) и сжатии (б)

На основании полученных данных составлены регрессионные уравнения зависимости от варьируемых факторов следующих исследуемых свойств:

– прочности образцов при изгибе $R_{изг}$ и % отношение к прочности при изгибе эталонных образцов % $R_{изг\ эт}$,

$$R_{изг} = 4,14 - 0,72X_1 - 0,13X_2 + 0,13X_1X_2,$$

$$\% R_{изг\ эт} = 83,4 - 5,7X_1 - 2,0X_2 - 1,2X_1X_2;$$

– прочности образцов при сжатии $R_{сж}$ и % отношение к прочности при сжатии эталонных образцов % $R_{сж\ эт}$,

$$R_{сж} = 21,1 - 3,55X_1 + 0,39X_2 + 0,04X_1X_2,$$

$$\% R_{сж\ эт} = 126,0 + 8,9X_1 + 5,23X_2 + 3,55X_1X_2;$$

– % отношения объема разрушенных ПММК элементов к общему объему, % разр.

$$\text{ПММК} = 48,3 + 11,2X_1 + 9,9X_2 + 5,9X_1X_2.$$

По регрессионным уравнениям построены изолинии прочности на изгиб и сжатие и их процентное отношение к характеристикам эталонных образцов.

В результате анализа изолиний свойств СПБ можно отметить, что прочность при изгибе СПБ зависит в основном от водоцементного отношения и увеличивается при его снижении (рис. 6). Процентное соотношение между прочностью при изгибе образцов с ПММК и эталонных, максимальное при минимальном В/Ц и равно 90 %. Прочность при сжатии образцов СПБ возрастает при снижении водоцементного отношения и также зависит в основном от этого фактора (рис. 7). Процентное соотношение между прочностью при сжатии образцов с ПММК и эталонных, максимальное при максимальном В/Ц, т.е. для образцов с малой прочностью, что говорит о влиянии на прочность в данном случае ПММК элементов. Это же подтверждает и тот факт, что в этой же области факторного пространства наблюдается и максимальный процент разрушенных ПММК элементов (рис. 8).

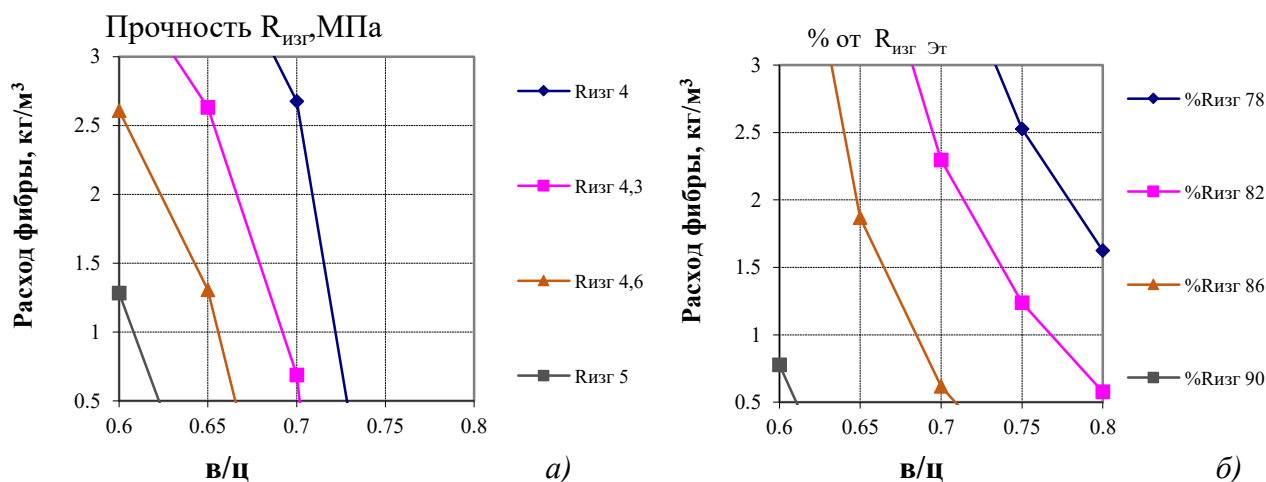


Рис. 6. Изолинии прочности образцов при изгибе а) и % отношение к прочности при изгибе эталонных образцов б)

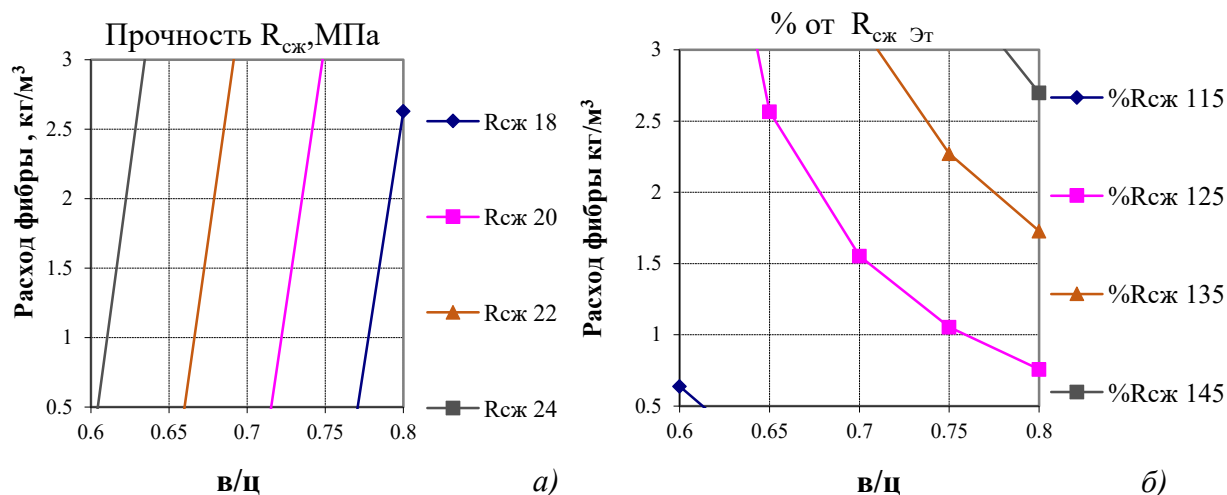


Рис. 7. Изолинии прочности образцов при сжатии а) и % отношение к прочности при сжатии эталонных образцов б)

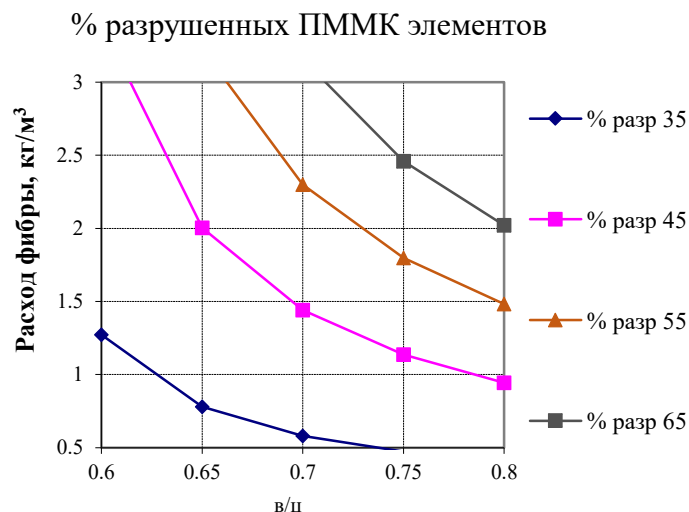


Рис. 8. Изолинии % отношения объёма разрушенных ПММК элементов к общему объёму

Нужно отметить, что полученные зависимости не могут полностью отражать картину влияния ПММК элементов на характеристики светопроницаемого бетона по следующим причинам:

- объемное содержание ПММК элементов и их расположение в теле бетона постоянные;
- форма и размеры светопроницаемых элементов не изменяются;

– не учитываются такие свойства ПММК элементов, как коэффициент линейного температурного расширения (для ПММК по разным данным от $6 \cdot 10^{-5}$ до $11 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$ для бетона около $10 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$), деформативность и т.д. Таким образом, для получения более полной картины необходимы дополнительные исследования, учитывающие эти положения.

Выводы. При исследовании свойств светопроницаемого бетона с прозрачными элементами в виде полос из полиметилметакрилата установлено, что на прочностные характеристики бетона

в большей мере влияет водоцементное отношение. Наличие в бетоне фибры из полипропилена не оказывает значимого воздействия на прочность при изгибе и сжатии, но способствует более вязкому разрушению материала. Рациональной видимо является модификация свойств бетона при помощи добавок пластификаторов и путём упрочнения структуры волокнами с более значимыми прочностными характеристиками (стекловолокно, металлическая фибра). На исследуемом факторном пространстве для светопроницаемого бетона получены следующие прочностные характеристики:

- прочность при изгибе от 3,2 МПа до 5,2 МПа;
- прочность при сжатии от 18 МПа до 26 МПа.

При этом при увеличении объёмного содержания ПММК элементов наблюдалось снижение прочности при изгибе на 60 % и повышение

прочности при сжатии на 30 % по сравнению с эталонными образцами без светопроницаемых элементов.

Представленный светопроницаемый бетон по основным прочностным характеристикам может быть использован в качестве материала для ограждающих конструкций с целью более эффективного использования естественного освещения или придания им декоративных свойств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Elghezanwy D., Eltarabily S. A review of translucent concrete as a new innovative material in architecture // *Civ. Eng. Archit.* 2020. Vol. 8. No. 4. Pp. 571–579. DOI:10.13189/cea.2020.080421
2. Chiadighikaobi P.C., Adegoke M.A., Kharun M., Paul V.J., Abu Mahadi M.I., Finbarrs-Ezema B. A Review of the Structural Properties of Translucent Concrete as Sustainable Material // *The Open Construction & Building Technology Journal.* 2023. Vol. 17(1). DOI: 10.2174/0118748368268119231003055958
3. Wang W., Chi J., Niu S. Analysis of the application of light-transmitting concrete in interior design // *SHS Web of Conferences.* 2023. Vol. 167. p. 02011. EDP Sciences. DOI: 10.1051/shsconf/202316702011.
4. Halbinia J., Sroka P. Translucent concrete as the building material of the 21st century // *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa.* 2015. Vol.15. No 1. Pp. 23–28.
5. Saleem M., Elshami M.M., Najjar M. Development, testing, and implementation strategy of a translucent concrete-based smart lane separator for increased traffic safety // *Journal of Construction Engineering and Management.* 2017. Vol. 143(5). 04016129.
6. Timina A., Yanova R., Popov A., Sorokoumova T. Modern translucent materials and their impact on architectural forming // *E3S Web of Conferences.* 2019. Vol. 9. 01035. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701035
7. Zielińska M., Ciesielski A. Analysis of transparent concrete as an innovative material used in civil engineering // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2017. Vol. 245. 022071. DOI 10.1088/1757-899X/245/2/022071
8. Altomate A., Alatshan F., Mashiri F., Jadan M. Experimental study of light-transmitting concrete // *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development.* 2016. Vol. 7. Pp. 133–139.
9. Tuum A., Shitote S., Oyawa W., Biedebrhan M. Structural Performance of Translucent Concrete Façade Panels // *Advances in Civil Engineering.* 2019. Pp. 1–10. DOI: 10.1155/2019/4604132
10. Salih S.A., Joni H.H., Mohamed S.A. Effect of plastic optical fiber on some properties of translucent concrete // *Engineering and Technology Journal.* 2014. Vol. 32. Pp. 2846–2861. DOI:10.30684/etj.32.12A.1
11. Henriques T.d.S., Dal Molin D.C., Masuero Â.B. Optical fibers in cementitious composites (LTCM): Analysis and discussion of their influence when randomly arranged // *Construction and Building Materials.* 2020. Vol. 244. 118406. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.118406
12. Bashbash B.F., Hajrus R.M., Wafi D.F., Alqedra M. Basics of light transmitting concrete // *Basics of light transmitting concrete.* 2013. Vol. 2. Pp. 76–83. DOI:10.13140/RG.2.2.30481.33121
13. Huong O.W., Kassim U. Translucent Concrete by Plastics Fibre Optics as A Sustainable Material That Benefit to Residential Building // *J. Adv. Res. Eng. Knowl.* 2019. Vol. 6. No 1.
14. Jiménez-Muñoz E. Fernández-Martínez F. Translucent Concrete. Research with Glass, Optical Fiber and Glass Fiber // *Construction and Building Research.* 2014. Pp. 111–114. DOI:10.1007/978-94-007-7790-3_15.
15. Li Y., Xu Z.Y., Gu Z.W., Bao Z.Z. Preparation of light transmitting cement-based material with optical fiber embedded by the means of parallel arrange // *Advanced Materials Research.* 2012. Pp. 677–682. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.391-392.677
16. Li Y., Li J., Wan Y., Xu Z. Experimental study of light transmitting cement based material (LTCM) // *Construction and building materials.* 2015. Vol. 96. Pp. 319–325. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.055
17. Li Y., Li J., Guo H. Preparation and study of light transmitting properties of sulfoaluminate cement-based materials // *Mater. Des.* 2015. Vol. 8. Pp.185–192. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.021
18. Henriques T.S., Dal Molin D.C., Masuero Â.B. Study of the influence of sorted polymeric optical fibers (POFs) in samples of a light-transmitting cement-based material (LTCM) // *Construction and Building Materials.* 2018. Vol. 161. Pp. 305–315. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.137
19. Sawant A.B., Jugdar R.V., Sawant S.G. Light transmitting concrete by using optical fiber // *Int. J. Inventive Eng. Sci.* 2014. Vol. 3. No. 1. Pp. 23–28.
20. Salih S.A., Joni H.H., Mohamed S.A. Effect of plastic optical fiber on some properties of translucent concrete // *Engineering and Technology Journal.* 2014. Vol. 32. No. 12. Pp. 2846–2861.
21. Robles A., Arenas G.F., Stefani P.M. Light transmitting cement-based material (LTCM) as a green material for building // *JARTE.* 2020. Vol. 1(1). Pp. 9–14.

22. Gite R., Kewate S. Transparent Concrete; An Experimental Study // Revista Internacional de Ciencia, Tecnología e Ingeniería. 2017. Vol. 4. No. 1. Pp. 14–20.
23. Tahwia A.M., Abdelaziz N., Samy M., Amin M. Mechanical and light transmittance properties of high-performance translucent concrete // Case Studies in Construction Materials. 2022. Vol. 17. Pp. e01260. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01260
24. Altomate A., Alatshan F., Mashiri F., Jadan M. Experimental study of light-transmitting concrete // International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development. 2016. Vol. 7. No 3-4. Pp. 133–139. DOI: 10.1080/2093761X.2016.1237396.
25. Bashbash B.F., Hajrus R.M., Wafi D.F., Alqedra M.A. Basics of light transmitting concrete. Global Advanced Research // Journal of Engineering, Technology and Innovation. 2013. Vol. 2 (3). Pp. 76–83. DOI: 10.13140/RG.2.2.30481.33121
26. Taneja E.K., Joshi T.M., Dave U. Evaluation of mechanical properties and light transmission of light-transmitting concrete // Technology Drivers: Engine for Growth. CRC Press. 2018. Pp. 53–58.
27. Kumar A., Ahlawat R. Experimental study on light transmitting concrete // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. 2017. Vol. 4. Pp. 201–210.
28. Kankriya S.M. Translucent concrete by using optical fibers and glass rods // Int. J. Sci. Res. Publ. 2016. Vol. 6. No. 10. Pp. 625–627.
29. Mathew P., Raju B., Venugopal K., Eldho M., Thomas R. Light Weight Translucent Concrete Blocks for Load Bearing Components // IRJET. 2019. Vol. 6. No. 5. Pp. 1372–1378.
30. Kim B., Han Y.J. Flexural performance of transparent plastic bar reinforced concrete // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. No 3. 325. DOI: 10.3390/app8030325
31. Ahmed T.W., Aljubory N.H., Zidan R.S. Properties and performance of polypropylene fiber reinforced concrete: A review // Tikrit Journal of Engineering Sciences. 2020. Vol. 27. No. 2. Pp. 82–97. DOI: 10.25130/tjes.27.2.10
32. MatWeb, Your Source for Materials Information : <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=2edfa6cbb75f4c58a5299516e27842ce&ckck=1> (date of reference: 26.05.2024)

Информация об авторах

Кравцов Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и строительных материалов. E-mail: alivkr@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбургская область, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Макаева Альмира Абдулхаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и строительных материалов. E-mail: alla_ish@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбургская область, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Оденбах Ирина Александровна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и строительных материалов. E-mail: 79128486201@yandex.com. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбургская область, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поступила 31.05.2024 г.

© Кравцов А.И., Макаева А.А., Оденбах И.А., 2024

***Kravtsov A.I., Makayeva A.A., Odenbach I.A.**

Orenburg State University

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

ON SOME MECHANICAL PROPERTIES OF LIGHT-TRANSMITTING CONCRETE

Abstract. Light-transmitting concrete with transparent elements based on polymethyl methacrylate is an innovative material that provides energy efficiency and decorative effects in buildings and structures. However, its cost and production complexity limit its widespread application. The aim of the study is to analyze the influence of transparent polymethyl methacrylate elements with a width of 30 mm and a thickness of 1.2 mm on the physical and mechanical characteristics of concrete, particularly its strength properties. During the study of the influence of light-transmitting inclusions on the characteristics of concrete, it was found that with an increase in their volumetric fraction from 2.8% to 8.9%, there is a 60% decrease in the flexural strength of the concrete, while its compressive strength increases by 34% compared to concrete samples without light-transmitting elements. A two-factor experiment was used to determine the influence of the water-cement ratio and the consumption of polypropylene fiber on the strength characteristics of translucent concrete, while the

volumetric content of polymethyl methacrylate elements, their shape and size, as well as their placement within the concrete body, were constant. The study demonstrates that light-transmitting concrete exhibits strength characteristics that allow using it as a material for enclosing structures, contributing to more efficient use of natural lighting.

Keywords: *light-transmitting concrete; polymethyl methacrylate; water-cement ratio; polypropylene fiber; compressive and bending strength*

REFERENCES

1. Elghezanwy D., Eltarabily S. A review of translucent concrete as a new innovative material in architecture. *Civ. Eng. Archit.* 2020. Vol. 8. No. 4. Pp. 571–579. DOI:10.13189/cea.2020.080421.
2. Chiadighikaobi P.C., Adegoke M.A., Kharun M., Paul, V.J., Abu Mahadi M.I., Finbarrs-Ezema B. A Review of the Structural Properties of Translucent Concrete as Sustainable Material. *The Open Construction & Building Technology Journal.* 2023. Vol. 17(1). DOI: 10.2174/0118748368268119231003055958
3. Wang W., Chi J., Niu S. Analysis of the application of light-transmitting concrete in interior design. *SHS Web of Conferences.* 2023. Vol. 167. p. 02011. EDP Sciences. DOI: 10.1051/shsconf/202316702011
4. Halbiniak J., Sroka P. Translucent concrete as the building material of the 21st century. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa.* 2015. Vol. 15. No. 1. Pp. 23–28.
5. Saleem M., Elshami M.M., Najjar M. Development, testing, and implementation strategy of a translucent concrete-based smart lane separator for increased traffic safety. *Journal of Construction Engineering and Management.* 2017. Vol. 143. No. 5. 04016129.
6. Timina A., Yanova R., Popov A., Soro-koumova T. Modern translucent materials and their impact on architectural forming. *E3S Web of Conferences.* 2019. Vol. 9. 01035. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701035
7. Zielińska M., Ciesielski A. Analysis of transparent concrete as an innovative material used in civil engineering. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2017. Vol. 245. 022071. DOI 10.1088/1757-899X/245/2/022071.
8. Altomate A., Alatsan F., Mashiri F., Jadan M. Experimental study of light-transmitting concrete. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development.* 2016. Vol. 7. Pp. 133–139.
9. Tuum A., Shitote S., Oyawa W., and Biedebrhan M. Structural Performance of Translucent Concrete Façade Panels. *Advances in Civil Engineering,* 2019. Pp. 1–10. DOI: 10.1155/2019/4604132
10. Salih S.A., Joni H.H., Mohamed S.A. Effect of plastic optical fiber on some properties of translucent concrete. *Engineering and Technology Journal.* 2014. Vol. 32. Pp. 2846–2861. DOI: 10.30684/etj.32.12A.1
11. Henriques T.d.S., Dal Molin D.C., Masuero Â.B. Optical fibers in cementitious composites (LTCM): Analysis and discussion of their influence when randomly arranged. *Construction and Building Materials.* 2020. Vol. 244. 118406. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118406
12. Bashbash B.F., Hajrus R.M., Wafi D.F., Alqedra M. Basics of light transmitting concrete. *Basics of light transmitting concrete.* 2013. Vol. 2. Pp. 76–83. DOI: 10.13140/RG.2.2.30481.33121
13. Huong O.W., Kassim U. Translucent Concrete by Plastics Fibre Optics as A Sustainable Material That Benefit to Residential Building. *J. Adv. Res. Eng. Knowl.* 2019. Vol. 6. No. 1.
14. Jiménez-Muñoz E. Fernández-Martínez F. Translucent Concrete. Research with Glass, Optical Fiber and Glass Fiber. *Construction and Building Research,* ed: Springer. 2014. Pp. 111–114. DOI: 10.1007/978-94-007-7790-3_15
15. Li Y., Xu Z.Y., Gu Z.W., Bao Z.Z. Preparation of light transmitting cement-based material with optical fiber embedded by the means of parallel arrange. *Advanced Materials Research.* 2012. Pp. 677–682. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.391-392.677
16. Li Y., Li J., Wan Y, Xu Z. Experimental study of light transmitting cement based material (LTCM). *Construction and building materials.* 2015. Vol. 96. Pp. 319–325. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.055.
17. Li Y., Li J., Guo H. Preparation and study of light transmitting properties of sulfoaluminate cement-based materials. *Mater. Des.* 2015. Vol. 8. Pp. 185–192. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.021.
18. Henriques T.S., Dal Molin D.C., Masuero Â.B. Study of the influence of sorted polymeric optical fibers (POFs) in samples of a light-transmitting cement-based material (LTCM). *Construction and Building Materials.* 2018. Vol. 161. Pp. 305–315. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.137.
19. Sawant A.B., Jugdar R.V., Sawant S.G. Light transmitting concrete by using optical fiber. *Int. J. Inventive Eng. Sci.* 2014. Vol. 3. No 1. Pp. 23–28.
20. Salih S.A., Joni H.H., Mohamed S.A. Effect of plastic optical fiber on some properties of translucent concrete. *Engineering and Technology Journal.* 2014. Vol. 32. No 12. Pp. 2846–2861.

21. Robles A., Arenas G.F., Stefani P.M. Light transmitting cement-based material (LTCM) as a green material for building. JARTE, 2020. Vol. 1(1). Pp. 9–14.
22. Gite R., Kewate S. Transparent Concrete; An Experimental Study. Revista Internacional de Ciencia, Tecnología e Ingeniería. 2017. Vol.4. No 1. Pp. 14–20.
23. Tahwia A.M., Abdelaziz N., Samy M., Amin M. Mechanical and light transmittance properties of high-performance translucent concrete. Case Studies in Construction Materials. 2022. Vol. 17. e01260. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01260.
24. Altomate A., Alatshan F., Mashiri F., Jadan M. Experimental study of light-transmitting concrete. International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development. 2016. Vol. 7. No 3-4. Pp. 133–139. DOI: /10.1080/2093761X.2016.1237396.
25. Bashbash B.F., Hajrus R.M., Wafi D.F., Alqedra M.A. Basics of light transmitting concrete. Global Advanced Research. Journal of Engineering, Technology and Innovation. 2013. Vol. 2 (3). Pp. 76–83. DOI: 10.13140/RG.2.2.30481.33121.
26. Taneja E.K., Joshi T.M., Dave U. Evaluation of mechanical properties and light transmission of light-transmitting concrete. Technology Drivers: Engine for Growth. CRC Press. 2018. Pp. 53–58.
27. Kumar A., Ahlawat R. Experimental study on light transmitting concrete. International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. 2017. Vol. 4. Pp. 201–210.
28. Kankriya S.M. Translucent concrete by using optical fibers and glass rods. Int. J. Sci. Res. Publ. 2016. Vol. 6. No. 10. Pp. 625–627.
29. Mathew P., Raju B., Venugopal K., Eldho M., Thomas R. Light Weight Translucent Concrete Blocks for Load Bearing Components. IRJET. 2019. Vol. 6. No. 5. Pp. 1372–1378.
30. Kim B., Han Y.J. Flexural performance of transparent plastic bar reinforced concrete. Applied Sciences. 2018. Vol. 8. No 3. 325. DOI: 10.3390/app8030325
31. Ahmed T.W., Aljubory N.H., Zidan R.S. Properties and performance of polypropylene fiber reinforced concrete: A review. Tikrit Journal of Engineering Sciences. 2020. Vol. 27. No. 2. Pp. 82–97. DOI: 10.25130/tjes.27.2.10
32. MatWeb, Your Source for Materials Information : <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=2edfa6cbb75f4c58a5299516e27842ce&ckck=1> (date of reference: 26.05.2024)

Information about the authors

Kravtsov, Alexey I. PhD. E-mail: alivkr@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, Victory Ave., 13.

Makaeva, Almira A. PhD. E-mail: alla_ish@mail.ru. Orenburg State University. Russia. 460018, Orenburg, Victory Ave., 13.

Odenbach, Irina A. PhD. E-mail: 79128486201@yandex.com. Orenburg State University. Russia. 460018, Orenburg, Victory Ave., 13.

Received 31.05.2024

Для цитирования:

Кравцов А.И., Макаева А.А., Оденбах И.А. О некоторых механических свойствах светопрозрачного бетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 10. С. 25–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-25-34

For citation:

Kravtsov A.I., Makayeva A.A., Odenbach I.A. On some mechanical properties of light-transmitting concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 10. Pp. 25–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-25-34

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-35-43

^{1,*}Кравченко Д.Э., ¹Сулейманова Л.А., ²Лукутцова Н.П.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Брянский государственный инженерно-технологический университет

*E-mail: darya.levshimna@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ЦВЕТА И ИСТОЧНИКА ЗАРЯДА ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ПИГМЕНТА НА СВОЙСТВА СВЕТЯЩИХСЯ БЕТОНОВ

Аннотация. При проектировании светящихся бетонов важным фактором является функциональность материала с обеспечением начальной яркости и длительного времени послесвечения. Цвет люминесцентного пигмента влияет на эксплуатационные свойства материала.

Проведено исследование по изучению влияния цвета пигмента и содержания светоотражающего порошка в светящемся бетоне на эксплуатационные свойства при заряде разными источниками освещения. В данном исследовании использовали белый портландцемент CīmSA CEM I 52,5 R с коэффициентом отражения света 80 %; светоотражающий порошок с размером частиц 75 мкм; люминесцентный пигмент $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ различных цветов: небесно-голубой, сине-зеленый, желто-зеленый с размером частиц 25–55 мкм.

На интенсивность послесвечения люминесцентного пигмента в бетоне влияют два фактора: мощность светового потока и цветовая температура. Чтобы изучить фазу интенсивного послесвечения и его длительность, использовали метод зарядки с помощью различных источников освещения.

Внешние факторы, такие как время заряда, интенсивность свечения и структура спектра источника облучения, оказывают значительное влияние на яркость послесвечения люминесцентного пигмента. После добавления светоотражающего порошка увеличивается количество каналов светопропускания, поэтому люминесцентный эффект материала улучшается, прирост начальной яркости послесвечения достигает 7 %. Анализ начальной яркости послесвечения образцов с люминесцентными пигментами разных цветов при одном и том же времени возбуждения показал, что наибольшей начальной яркостью обладают образцы с желто-зеленым пигментом, затем образцы с сине-зеленым и небесно-голубым пигментами, при этом образец с сине-зеленым пигментом обладает наибольшим временем послесвечения – более 6 часов.

Ключевые слова: люминесцентный пигмент, светоотражающий порошок, светящийся бетон, бетон с люминесцентными свойствами, элементы мощения.

Введение. В современном мире, где технологии и инновации играют ключевую роль в развитии различных отраслей промышленности, особое внимание уделяется разработке новых материалов с уникальными свойствами. Одним из таких материалов является люминесцентный пигмент, который представляет собой перспективное направление исследований в области материаловедения.

Люминесцентные пигменты – это вещества, способные поглощать и излучать свет. Заряд люминесцентного пигмента происходит под воздействием света или другого источника излучения и приводит к флуоресценции – эффекту свечения с большей длиной волны, чем у поглощенного света. Благодаря своим уникальным свойствам, люминесцентные пигменты находят применение в самых разных отраслях промышленности [1–3].

Актуальность исследования люминесцентных пигментов обусловлена их потенциальными возможностями для создания новых продуктов и технологий. Эти материалы могут быть использованы для разработки более эффективных и экологически чистых источников света, создания ярких и долговечных покрытий, а также для улучшения видимости и безопасности в условиях низкой освещенности.

Светящиеся бетоны представляют собой инновационное направление в строительстве, в том числе, дорожном, которое открывает новые возможности для создания безопасных и энергоэффективных инфраструктурных объектов. Светящиеся бетоны создаются на основе традиционных бетонных смесей с добавлением специальных люминесцентных пигментов, обеспечивающих свечение в темноте. В результате, дорожные покрытия, тротуары, ограждения и другие элементы инфраструктуры приобретают яркий вид в темное время суток, что делает их легко заметными для автомобилистов и пешеходов [4–7].

При проектировании светящихся бетонов важным фактором является функциональность материала с обеспечением начальной яркости и длительного времени послесвечения. Цвет люминесцентного пигмента влияет на эксплуатационные свойства материала [8–10].

Благодаря использованию различных химических соединений в составе, люминесцентные пигменты могут иметь разные цвета. У каждого пигмента есть свои уникальные характеристики: длина волны поглощения и излучения света, яркость свечения и длительность послесвечения. Это позволяет создавать материалы с различными цветовыми характеристиками для разных

областей применения. В связи с чем, проведено исследование по изучению влияния цвета пигмента в светящемся бетоне на эксплуатационные свойства.

Использование светоотражающего порошка может сделать свечение люминесцентного пигмента более интенсивным, что позволит ему быть более заметным в условиях низкой освещённости. Однако для оценки эффективности такого сочетания необходимо учитывать тип пигмента и светоотражающего порошка, а также условия освещения.

Материалы и методы. В работе исследованы яркость и время послесвечения образцов при заряде разными источниками освещения в камере оценки света BGD 276: ультрафиолетовой лампой (UV), осветителями D65, TL84, CWF, F, TL83/U30, а также при естественном солнечном свете.

D65 – это основные осветители, имитирующие европейское среднее дневное освещение. Оно включает в себя как прямой солнечный свет, так и свет, рассеянный чистым небом. Осветитель D65, предназначенный для воспроизведения среднего дневного света, имеет цветовую температуру 6500 К.

Лампа TL84 применяется в общественных помещениях в Европе, Японии и Китае, имеет цветовую температуру 4000 К.

Источник света CWF – широкополосные флюоресцентные лампы холодного белого света. Коррелированная температура света 4000К.

Источник света F – вольфрамовая лампа накаливания. Коррелированная температура света 2800К. Обычный источник освещения жилых помещений.

Лампа TL83/U30 – узкополосные три-фосфорные флюоресцентные лампы. Коррелированная температура света 3000К. Часто применяются как источники освещения торговых точек на территории Европы.

Также для исследований применяется источник ультрафиолетового света. Длина волны UV-лампы – 365 нм.

В данном исследовании использовали белый портландцемент CimSA CEM I 52,5 R с коэффициентом отражения света 80 %; светоотражающий порошок с размером частиц 75 мкм; люминесцентный пигмент $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ различных цветов: небесно-голубой, сине-зеленый, желто-зеленый с размером частиц 25-55 мкм (рис. 1)

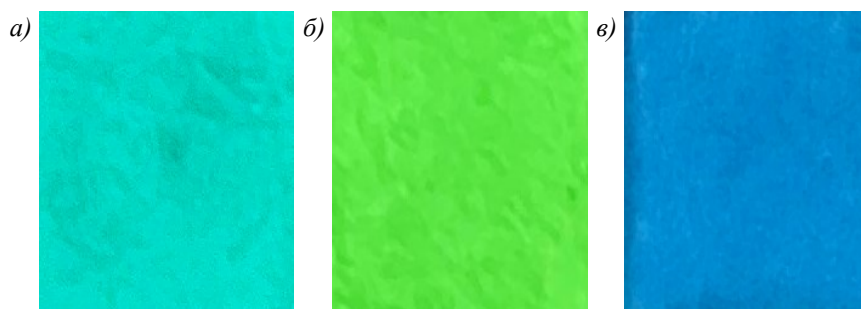


Рис. 1. Люминесцентный пигмент различных цветов:

а – сине-зеленый; б – желто-зеленый; в – небесно-голубой

Основная часть. Для обоснования практического применения бетона с люминесцентными свойствами, нужно определить, может ли люминесцентный пигмент в бетонных образцах заряжаться при освещении, которое характерно для предполагаемой области использования исследуемого бетона. После такой зарядки образцы должны излучать видимое послесвечение в темноте на протяжении ночи в разных регионах применения.

Важно учитывать спектр излучения источника освещения, его мощность и возможность регулирования интенсивности света для достижения оптимальных результатов. Чтобы изучить фазу интенсивного послесвечения и его длительность, использовали метод зарядки с помощью различных источников освещения.

В России, Западной и Северной Европе часто используются стандартные осветители D65, определённые Международной комиссией по

освещению (CIE) [11]. D65 – это основные осветители, имитирующие европейское среднее дневное освещение. Осветитель D65, предназначенный для воспроизведения среднего дневного света, имеет цветовую температуру 6500К.

Во время исследований обычно применяют такие источники освещения, как ультрафиолетовые и ксеноновые лампы и лампы D65 [12, 13]. Эти источники позволяют контролировать спектр излучения в ультрафиолетовом диапазоне, который приходится на пик кривой возбуждения фотолюминесцентного пигмента.

В исследованиях также используется ксеноновая разрядная лампа, которая излучает свет высокой интенсивности от ультрафиолетового диапазона через видимую и инфракрасную области. В лампе световылучающая часть сосредоточена вблизи катода, поэтому лампу можно рассматривать как точечный источник света. Короткодуговая лампа излучает более интенсивный свет по

сравнению с длиннодуговой. Последняя испускает менее интенсивный световой поток, но она является стандартом в ультрафиолетовой области.

В ряде экспериментов образцы заряжают под прямыми солнечными лучами, чтобы подтвердить необходимость тестирования образцов при непостоянном естественном освещении [14–16].

Для более детального изучения реакции на облучение в ограниченном спектральном диапазоне используют специальное лабораторное оборудование [17, 18]. При этом мощность источника освещения и расстояние от него до образца не нормируются.

В ряде экспериментов измеряют освещённость образца в люксах. Это позволяет более точно воспроизвести эксперимент при наличии подходящего источника освещения.

Во время исследования кривых нарастания и спада интенсивности послесвечения образцы за-

ряжают разное количество времени: от нескольких минут (1–5) и десятков минут (15–30) до нескольких часов (2–14). Также отличается время между завершением зарядки и первым измерением: оно колеблется от 1 до 30 секунд.

Для определения интенсивности послесвечения образцов используют приборы для измерения яркости мониторов и фотоаппаратуры, а также спектрографы, которые исследуют распределение энергии излучения по всему диапазону длин волн.

В данном исследовании проанализированы разные источники освещения, которые следует использовать в исследованиях при изучении люминесцентного пигмента.

Заряд образцов производился разными источниками освещения: солнечным светом и искусственными источниками освещения, технические характеристики которых представлены в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики источников заряда люминесцентного пигмента

Источник света	Описание	Мощность	Температура цвета
D65	Искусственный дневной свет по международным стандартам	18 Вт	6500K
TL84	Применимо к общественным помещениям в Европе, Японии и Китае.	18 Вт	4000K
CWF	Холодный белый флуоресцентный	20 Вт	4150K
F	Сравнительный эталонный источник света	40 Вт	2700K
UV	Источник ультрафиолетового света	18 Вт	Длина волны 365 нм
TL83/U30	Теплый белый флуоресцентный	18 Вт	3000K

Для определения начальной яркости и времени послесвечения образцов с люминесцентными пигментами использовалась методика, апробированная на кафедре строительства и городского хозяйства. Измерения люминесцентных свойств проводятся в видимом спектре частот, для регистрации данных в данном исследовании применялся люксметр CEM DT-1308 Light Meter [10], так как спектр его чувствительности соответствует кривой спектральной световой эффективности дневного зрения человека по стандарту CIE 1978 «CIE Photopic luminosity curve» (ГОСТ 8.332-78).

Все образцы были в темноте за 24 часа до начала заряда, затем образцы подвергались воздействию источников заряда в течение 240 минут. Во время испытаний в помещении поддерживалась определенная температура ($T = 21 \pm 0,5$ °C). Все измерения на каждом этапе проводились в одном и постоянном температурном режиме. Все этапы измерений выполнялись при одинаковой температуре, а испытания при естественном освещении – при одинаковых погодных условиях и температуре.

Яркость послесвечения поверхности образца (L_{source}), кд/м² определялась по формуле [19]:

$$L_{\text{source}} = \frac{n_{\text{lum}}/S_{\text{det}}}{\Psi_{\text{source}}} = \frac{N_{\text{lux}}}{S_{\text{source}}/d^2}, \quad (1)$$

где n_{lum} – световой поток, зарегистрированный светочувствительным элементом приемника, лм; Ψ_{source} – сферический телесный угол от приемника к источнику; N_{lux} – освещенность датчика люксметра, лк; S_{det} – светочувствительная площадь приемника; S_{source} – площадь светящейся поверхности источника; d – расстояние от источника к приемнику.

При измерении яркости послесвечения в диапазонах, близких к моменту окончания возбуждения, первый замер был произведён через 10 секунд после выключения источника света. Это было сделано для того, чтобы снизить погрешность на крутом участке экспоненциальной кривой. Для усиления эффекта послесвечения люминесцентного пигмента в бетоне все образцы проходили этап шлифования поверхностного слоя.

Результаты начальной яркости и времени послесвечения образцов с разным цветом люминесцентного пигмента показаны на рис. 2.

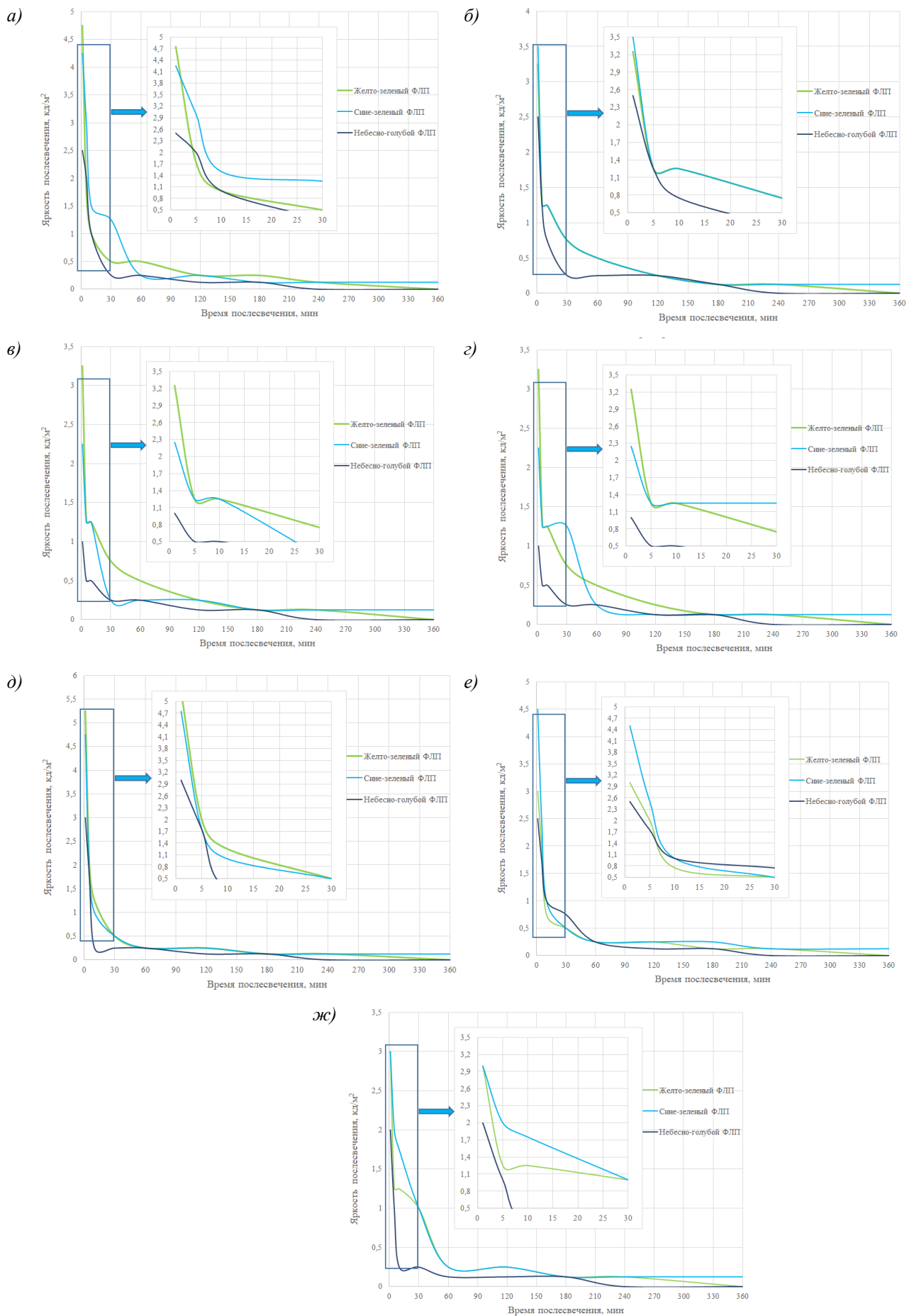


Рис. 2. Затухание яркости послесвечения при заряде разными источниками освещения:
а – CWF; б – D65; в – F; г – TL84; д – TL83/U30; е – ультрафиолетовый свет; ж – солнечный свет

Проведено исследование интенсивности свечения образцов с добавлением светоотражающего порошка (рис. 3). Светоотражающий порошок отражает свет, который попадает на него. Благодаря этому он может усилить эффект свече-

ния люминесцентного пигмента. Светоотражающий порошок может отражать свет, излучаемый пигментом, тем самым делая его более заметным и ярким. Это особенно полезно в условиях низкой освещённости, где без дополнительного отражения пигмент мог бы быть менее заметен.

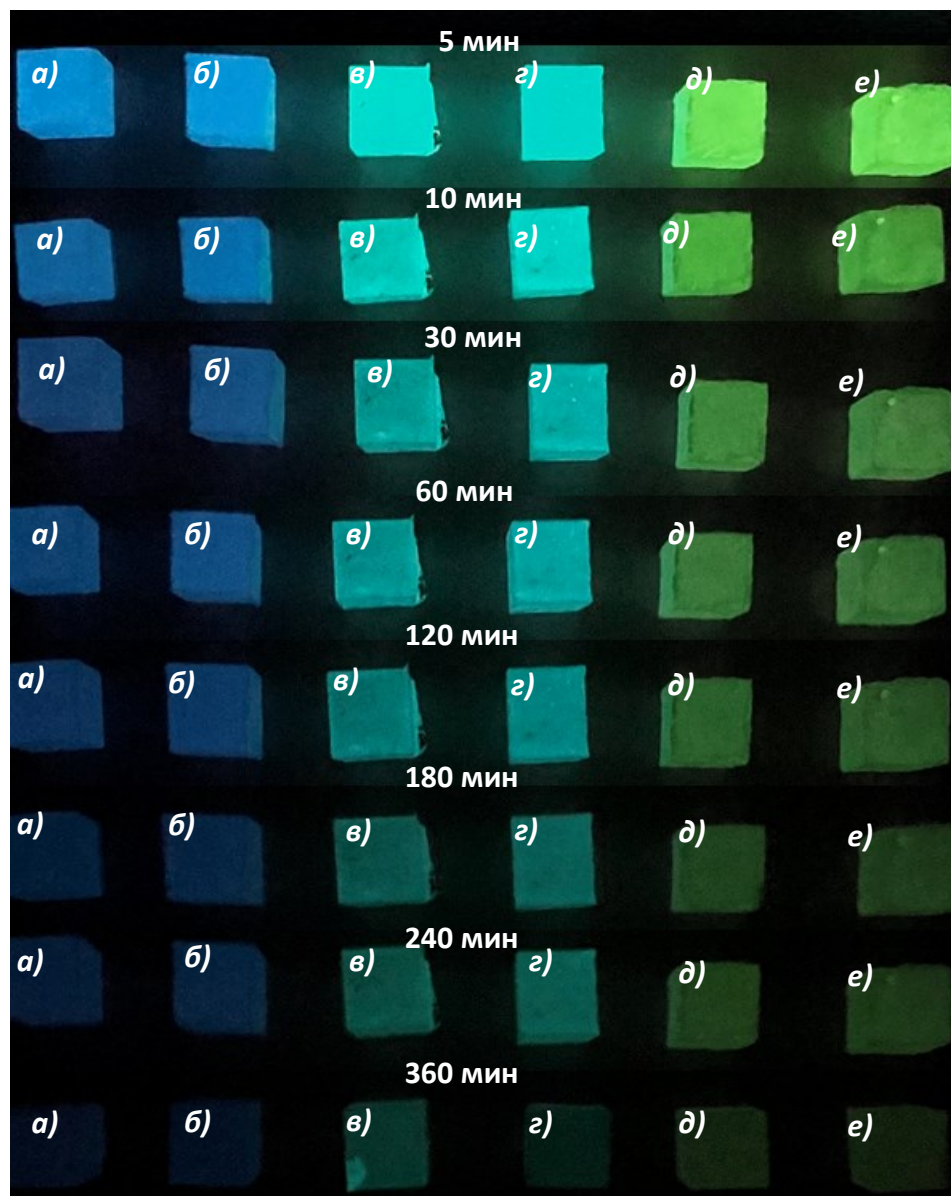


Рис. 3. Затухание яркости послесвечения образцов с разным цветом люминесцентного пигмента и содержанием светоотражающего порошка:

- а* – небесно-голубой люминесцентный пигмент с добавлением светоотражающего порошка;
б – то же без добавления светоотражающего порошка; *в* – сине-зеленый люминесцентный пигмент с добавлением светоотражающего порошка; *г* – то же без добавления светоотражающего порошка;
д – желто-зеленый люминесцентный пигмент с добавлением светоотражающего порошка;
е – то же без добавления светоотражающего порошка

В ходе исследования также выявлено, что интенсивность флуоресценции образцов улучшается после добавления светоотражающего порошка. Образец с желто-зеленым люминесцентным пигментом обладает начальной яркостью $5,25 \text{ кд/м}^2$ без светоотражающего порошка и $5,62$

кд/м^2 после добавления светоотражающего порошка, время послесвечения достигает 5 часов у всех образцов. Начальная яркость образцов с сине-зеленым пигментом без добавления светоотражающего порошка достигает $4,75 \text{ кд/м}^2$ и $5,08 \text{ кд/м}^2$ после добавления светоотражающего

порошка, при этом образец с сине-зеленым пигментом с добавлением светоотражающего порошка обладает наибольшим временем послесвечения – более 6 часов. Небесно-голубой пигмент без светоотражающего порошка и с его добавлением имеет начальную яркость 3 кд/м² и 3,21 кд/м² соответственно. Прирост начальной яркости послесвечения сине-зеленых образцов

после добавления светоотражающего порошка составил 7 %.

Причина в том, что светоотражающий порошок в образцах может играть роль в регрессионном отражении к внешнему падающему свету. Схема пропускания света в образце представлена на рис. 4.

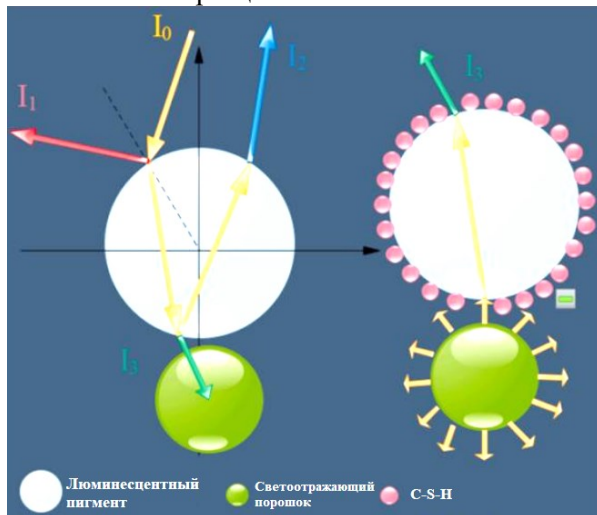


Рис. 4. Схема пропускания света в образце

В соответствии с принципом отражения и преломления света, когда внешний свет падает на светоотражающий порошок на поверхности образцов, он будет разделен на три части: поверхностный отраженный свет I_1 , внутренний отраженный свет I_2 и прошедший свет I_3 , как показано на рис. 4.

Если свет проникает внутрь образцов для возбуждения частиц люминесцентного пигмента, то это должно быть выполнено с помощью проходящего света I_3 . В этом случае светоотражающий порошок может использоваться в качестве светопропускающих частиц для передачи и вывода внутреннего света, излучаемого после возбуждения люминесцентного пигмента, и направления внешнего света.

Выводы. Разные цвета поглощают ультрафиолетовые лучи на разных частотах, что приводит к оптимальной длине волны излучения для каждого цвета. Внешние факторы, такие как время заряда, интенсивность свечения и структура спектра источника облучения, оказывают значительное влияние на яркость послесвечения люминесцентного пигмента. Это особенно важно учитывать при работе с конкретным химическим составом пигмента. Разнообразие цветов люминесцентных пигментов достигается за счёт использования различных химических соединений в их составе. Все спектры флуоресценции различных образцов с люминесцентным пигментом имеют оптимальную точку пика. После добавления светоотражающего порошка увеличивается

количество каналов светопропускания, поэтому люминесцентный эффект материала улучшается, прирост начальной яркости послесвечения достигает 7 %. Анализ начальной яркости послесвечения образцов с люминесцентными пигментами разных цветов при одном и том же времени возбуждения показал, что наибольшей начальной яркостью обладают образцы с желто-зеленым пигментом, затем образцы с сине-зеленым и небесно-голубым пигментами, при этом образец с сине-зеленым пигментом обладает наибольшим временем послесвечения – более 6 часов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Katsumata T. Effects of Composition on the Long Phosphorescent $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ Phosphor Crystals // Journal of The Electrochemical Society. 2007. Vol. 144. Pp. 243–245. DOI:10.1149/1.1837931
2. Lima N.B., Goncalves S.M., Junior S.A., Simas A.A. A Comprehensive Strategy to Boost the Quantum Yield of Luminescence of Europium Complexes // Scientific Reports. 2013. № 3. Pp. 203–211. DOI:10.1038/srep02395
3. Леденева Г.Л., Воронов В.В. Люмобетон и метод естественной espectacularности // Бизнес и дизайн ревью. 2019. № 3 (15). С. 10–22.
4. Сулейманова Л.А., Гридчин А.М., Малюкова М.В., Морозова Т.В. Повышение архитектурной выразительности плит бетонных тротуарных // Научные технологии и инновации.

Сборник докладов Юбилейной Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова (XXI научные чтения). 2014. С. 347–353.

5. Сулейманова Л.А. Декоративные элементы как способ эстетического осмысления пространства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 109–115.

6. Лукутцова Н.П., Еремочкин Р.А., Борсук О.И., Головин С.Н. Фотокаталитически активный самоочищающийся мелкозернистый бетон // Строительные материалы. 2020. № 1-2. С. 8–16. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-8-15.

7. Сулейманова Л.А., Малюкова М.В., Корякина А.А. Исследование фотолюминесцентного пигмента для применения в светящемся архитектурно-декоративном бетоне // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 6. С. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-8-18

8. Сулейманова Л.А., Малюкова М.В., Погорелова И.А., Корякина А.А. Формирование пространственной среды с учетом колористики // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 10. С. 62–66. DOI: 10.12737/22028

9. Погорелова И.А., Малюкова М.В., Корякина А.А. Применение сверхэффективных бетонов // Научные технологии и инновации. Сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород. Том Часть 1. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. С. 133–137.

10. Корякина А.А. Бетон с фотолюминесцентными свойствами для малых архитектурных форм: специальность 2.1.5. «Строительные материалы и изделия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Корякина Алина Александровна. Белгород, 2022. 189 с.

11. DIN 6173-2 «Соответствие цветов и эталонным источником света» ASTM D1729; ISO

10526:1999 / CIE S005/E-1998. Стандартные осветительные приборы CIE для колориметрии

12. Zhi-jie Li, Yu-feng Z., Xiao W., Chu-yang Q., Gui-mei Sh. Synthesis and properties of SrAl_2O_4 : Eu^{2+} , Dy^{3+} nanowires // Physics Letters A. 2017. Vol. 381. Pp. 3519–3522. DOI: 10.1016/j.physleta.2017.08.051

13. Mothudi B.M., Ntwaeaborwa O.M., Kumar A. Phosphorescent and thermoluminescent properties of SrAl_2O_4 : Eu^{2+} , Dy^{3+} phosphors prepared by solid state reaction method // Physica Journal. 2012. Vol. 407. Pp. 1679–1682. DOI: 10.1016/j.physb.2011.10.033

14. Sharpe L.T. Into the twilight zone: the complexities of mesopic vision and luminous efficiency // Ophthalmic Physiol. Optic. 2006. Vol. 26(3). Pp. 225–239. DOI: 10.1111/j.1475-1313.2006.00325.x

15. Practical applications of phosphors / Taylor & Francis group, 2007. URL: www.taylor&francisgroup

16. Chen T.M. Effect of host compositions on the afterglow properties of phosphorescent strontium aluminate phosphors derived from the sol-gel method // Journal Materials Research. 2001. Vol. 16(05). Pp. 1293–1300. DOI: 10.1111/jace.14188

17. Takanori W. Giant improvement on the afterglow of phosphor by systematic investigation on various parameters // Journal of materials. 2013. Vol. 66. Pp. 89–100. DOI: 10.1155/2013/613090

18. Matsuzawa Y.A., Takeuchi N., Murayama Y.A. New Long Phosphorescent Phosphor with High Brightness SrAl_2O_4 : Eu^{2+} , Dy^{3+} // Journal of The Electrochemical Society. 1996. Vol. 143. Pp. 2670–2673. DOI: 10.1149/1.1837067

19. Большухин В.А., Булычев Н.А., Васильева Н.Н., Гарелина С.А., Гусев А.Л., Казарян М.А., Красовский В.И., Пляка П.С., Собко А.А., Сочков В.И. Люминофоры длительного послесвечения – возможность применения для целей МЧС // Альтернативная энергетика и экология. 2013. №6 (128). С. 116–130.

Информация об авторах

Кравченко Дарья Эдуардовна, ассистент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: darya.levshimna@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Сулейманова Людмила Александровна, доктор технических наук, профессор, зав. 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.

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

Поступила 05.07.2024 г.

© Кравченко Д.Э., Сулейманова Л.А., Лукутцова Н.П., 2024

^{1,*}Kravchenko D.E., ¹Suleymanova L.A., ²Lukutsova N.P.¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov²Bryansk Technological University of Engineering

*E-mail: darya.levshimna@mail.ru

THE EFFECT OF THE COLOR AND CHARGE SOURCE OF THE LUMINESCENT PIGMENT ON THE PROPERTIES OF LUMINOUS CONCRETES

Abstract. When designing luminescent concrete, an important factor is the functionality of the material, ensuring initial brightness and a long afterglow time. The color of the luminescent pigment affects the performance properties of the material. The research was made to study the effect of pigment color and reflective powder content in luminescent concrete on performance properties when charged with different light sources. In this study, authors used white Portland cement CimSA CEM I 52.5 R with a light reflectivity of 80%; reflective powder with a particle size of 75 μm ; luminescent pigment $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ of various colors: sky-blue, blue-green, yellow-green with a particle size of 25-55 μm . The intensity of the afterglow of the luminescent pigment in concrete is affected by two factors: the power of the luminous flux and the color temperature. To study the phase of intense afterglow and its duration, researchers used a charging method with different light sources. The influence of external factors on the afterglow brightness of a luminescent pigment for a specific chemical composition and pigment layer thickness is determined by the charging time, the luminescence intensity of the radiation source, and the spectrum structure of the radiation source. After adding reflective powder, the number of light transmission channels increases, so the luminescent effect of the material improves. The analysis showed that the order of intensity of the emission spectrum of luminescent pigments at the same excitation time is: yellow-green > blue-green > sky-blue.

Keywords: luminescent pigment, reflective powder, luminous concrete, concrete with luminescent properties, paving elements.

REFERENCES

1. Katsumata T. Effects of Composition on the Long Phosphorescent $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ Phosphor Crystals. Journal of The Electrochemical Society. 2007. Vol. 144. Pp. 243–245. DOI: 10.1149/1.1837931

2. Lima N.B., Goncalves S.M., Junior S.A., Simas A.A. A Comprehensive Strategy to Boost the Quantum Yield of Luminescence of Europium Complexes. Scientific Reports. 2013. No. 3. Pp. 203–211. DOI: 10.1038/srep02395

3. Ledeneva G.L., Voronov V.V. Lumobeton and the method of natural spectacularity [Lyumobeton i metod estestvennoj spektakul'ynosti]. Business and design review. 2019. No. 3 (15). Pp. 10–22. (rus)

4. Suleimanova L.A., Gridchin A.M., Malyukova M.V., Morozova T.V. Increasing the architectural expressiveness of concrete pavement slabs [Povyshenie arhitekturnoj vyrazitel'nosti plit betonnyh trotuarnyh]. Naukoemkie tekhnologii i innovacii. Sbornik dokladov YUбилейnoj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 60-letiyu BGTU im. V.G. Shuhova (XXI nauchnye chteniya). 2014. Pp. 347–353. (rus)

5. Suleimanova L.A. Decorative elements as a way of aesthetic understanding of space [Dekorativnye elementy kak sposob esteticheskogo osmysleniya prostranstva]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 6. Pp. 109–115. (rus)

6. Lukutsova N.P., Eremochkin R.A., Borsuk O.I., Golovin S.N. Photocatalytically active self-

cleaning fine-grained concrete [Fotokataliticheski aktivnyj samoochishchayushchijsya melkozernistyj beton]. Construction materials. 2020. No. 1-2. Pp. 8–16. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-8-15. (rus)

7. Suleymanova L.A., Malyukova M.V., Koryakina A.A. Study of photoluminescent pigment for use in luminous architectural and decorative concrete [Issledovanie fotolyuminescentnogo pigmenta dlya primeneniya v svetyashchemsya arhitekturno-dekorativnom betone]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 6. Pp. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-8-18 (rus)

8. Suleymanova L.A., Malyukova M.V., Pogorelova I.A., Koryakina A.A. Formation of the spatial environment taking into account color [Formirovanie prostranstvennoj sredy s uchetom koloristiki]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 10. Pp. 62–66. DOI: 10.12737/22028 (rus)

9. Pogorelova I.A., Malyukova M.V., Koryakina A.A. Application of super-efficient concrete [Primenenie sverheffektivnyh betonov]. Naukoemkie tekhnologii i innovacii. Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 65-letiyu BGTU im. V.G. Shuhova, Belgorod. Tom CHast' 1. Belgorod: BGTU im. V.G. Shuhova. 2019. Pp. 133–137. (rus)

10. Koryakina A.A. Concrete with photoluminescent properties for small architectural forms: specialty 2.1.5. "Construction materials and products": dissertation for the degree of candidate of technical sciences [Beton s fotolyuminescentnymi svojstvami

dlya malyh arhitekturnykh form: special'nost' 2.1.5. «Stroitel'nye materialy i izdeliya»: dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk]. Belgorod, 2022. 189 p. (rus)

11. DIN 6173- 2 "Colour Matching with Standard Illuminants" ASTM D1729; ISO 10526:1999. CIE S005/E-1998. CIE Standard Illuminants for Colorimetry.

12. Zhi-jie Li, Yu-feng Z., Xiao W., Chu-yang Q., Gui-mei Sh. Synthesis and properties of SrAl_2O_4 : Eu^{2+} , Dy^{3+} nanowires. Physics Letters A. 2017. Vol. 381. Pp. 3519–3522. DOI:10.1016/j.physleta.2017.08.051

13. Mothudi B.M., Ntwaeaborwa O.M., Kumar A. Phosphorescent and thermoluminescent properties of SrAl_2O_4 : Eu^{2+} , Dy^{3+} phosphors prepared by solid state reaction method. Physica Journal. 2012. Vol. 407. Pp. 1679–1682. DOI:10.1016/j.physb.2011.10.033

14. Sharpe L.T. Into the twilight zone: the complexities of mesopic vision and luminous efficiency. Ophthalmic Physiol. Optic. 2006. Vol. 26(3). Pp. 225–239. DOI: 10.1111/j.1475-1313.2006.00325.x

15. Practical applications of phosphors. Taylor & Francis group, 2007. URL: www.taylor&francisgroup

16. Chen T.M. Effect of host compositions on the afterglow properties of phosphorescent strontium aluminate phosphors derived from the sol-gel method. Journal Materials Research. 2001. Vol. 16(05). Pp. 1293–1300. DOI: 10.1111/jace.14188

17. Takanori W. Giant improvement on the afterglow of phosphor by systematic investigation on various parameters. Journal of materials. 2013. Vol. 66. Pp. 89–100. DOI: 10.1155/2013/613090

18. Matsuzawa Y.A., Takeuchi N., Murayama Y.A. New Long Phosphorescent Phosphor with High Brightness SrAl_2O_4 : Eu^{2+} , Dy^{3+} . Journal of The Electrochemical Society. 1996. Vol. 143. Pp. 2670–2673. DOI: 10.1149/1.1837067

19. Bolshukhin V.A., Bulychev N.A., Vasilyeva N.N., Garelina S.A., Gusev A.L., Kazaryan M.A., Krasovsky V.I., Plyaka P.S., Sobko A.A., Sochkov V.I. Phosphors with long afterglow - the possibility of application for the purposes of the Ministry of Emergency Situations [Lyuminofory dlitel'nogo poslesvecheniya – vozmozhnost' primeneniya dlya celei MCH]. Alternative energy and ecology. 2013. No. 6 (128). Pp. 116–130. (rus)

Information about the authors

Kravchenko, Daria E. Postgraduate student. E-mail: darya.levshimna@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostiukovst. 46.

Suleymanova, Lyudmila A. Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: kafedrasigsh@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostiukovst. 46.

Lukutsova, Natalya P. Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: natluk58@mail.ru. Bryansk Technological University of Engineering. Russia, 241037, Bryansk, st. Stanke Dimitrova, 3.

Received 05.07.2024

Для цитирования:

Кравченко Д.Э., Сулейманова Л.А., Лукутцова Н.П. Влияние цвета и источника заряда люминесцентного пигмента на свойства светящихся бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 10. С. 35–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-35-43

For citation:

Kravchenko D.E., Suleymanova L.A., Lukutsova N.P. The effect of the color and charge source of the luminescent pigment on the properties of luminous concretes. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 10. Pp. 35–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-35-43

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-44-52

^{1,*}Зайцев О.Н., ²Сиваченко Ю.А.¹Юго-Западный государственный университет им. И.И. Ишутина²Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского

*E-mail: zon071941@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВИРОВАННОГО РАДИАЛЬНОЙ СТРУЕЙ ВСАСЫВАЮЩЕГО ПОТОКА ИЗ ЗОНЫ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ

Аннотация. В статье представлены данные, полученные при проведении исследования локального вытяжного устройства, активируемого перпендикулярной прямооточной струей позиционируемого в зоне плазменной резки в выходном пространстве тепловой гетерогенной струи, а также результаты численного моделирования различных вариантов активации всасывающего течения (увеличение дальности всасывающего потока), позволившие определить геометрические параметры устройства и определения диапазона варьирования расходов для формирования ограничивающей радиальной струи и добиться отсутствия негативного взаимодействия приточной радиальной ограничивающей струи и всасывающего потока для предложенной конструкции локального вытяжного устройства. Представлены данные, полученные при экспериментальном исследовании предложенной конструкции всасывающего устройства, разработанного по результатам численного моделирования. Изложены конструктивные особенности устройства, реализующего указанный способ активации всасывающего потока. Описаны технологические и производственные факторы технологии плазменного раскроя различных металлов, повлиявшие на выбор способа позиционирования вытяжного устройства предложенной по результатам моделирования конструкции, также рассмотрены вредные производственные факторы, преобладающим из которых является образующиеся в процессе плазменной резки вредные выбросы (пыль, аэрозоли, токсичные соединения, газы). Получены и обоснованы экспериментальные данные, в результате моделирования взаимодействия, всасывающего и радиально направленного ограничивающего потока.

Ключевые слова: местный отсос, плазменная резка, всасывающий факел, удаление вредных, локальное всасывание, плазменная резка

Введение. В Российской Федерации за последние годы производство металлорежущих станков увеличилось с 2928 до более чем 5500 единиц, среди которых количество станков плазменной резки составляет около 1,8–2 тыс. штук [1–3]. Для локализации используется широкий спектр различных вытяжных устройств, которые удаляют значительные объемы воздуха и не всегда способны локализовывать и устранять из рабочей зоны вредные выбросы при плазменной резке. Для таких систем средний объем удаляемого воздуха составляет от 6000–8000 м³/ч до 12000 м³/ч [4, 5].

Существующие способы и средства локализации вредных веществ разнообразны. Исследованиям в области локализации вредных веществ и повышении эффективности всасывающих течений посвящены труды [6–8], вместе с тем вытяжные системы от столов для плазменной резки отличаются разнообразием и широкой номенклатурой реализуемых технических решений, которые требуют значительных объемов вытяжного воздуха и характеризуются низкой эффективностью из-за быстрого снижения скорости всасывания [9, 10].

Таким образом, основной задачей исследования является выявление путей повышения эффективности локализации и удаления вредных

выбросов при плазменной резке металлов, из области под поверхностью металла с помощью локального вытяжного устройства, с увеличенной эффективностью локализации вредных веществ, как одного из наиболее перспективных направлений, с учетом технологических особенностей [11–14, 15].

Применение, для локализации и удаления вредных выбросов из области под поверхностью металла с помощью локального всасывания, активируемого радиальной струей воздуха, имеет существенный потенциал в развитии локальных вытяжных устройств, в том числе и для модернизации средств местной вытяжной вентиляции, используемых при плазменной обработке металлов, с целью улучшения качества условий труда и снижения затрат.

Целью исследования являлось определение геометрических параметров устройства, благодаря которому станет возможно реализовать принцип локализации вредных веществ с учетом технологических особенностей существующего оборудования для плазменной резки и повысить эффективность локализации и удаления вредных веществ от стационарных и нестационарных (автоматизированных) постов плазменной резки.

Материалы и методы. Задачи, продиктованные целями исследования, решались с помощью математических методов физического моделирования и численного моделирования [16–18]. Численное моделирование было использовано для получения пространственного представления линий потока, полей температуры, скорости и давления. Физическое моделирование было применено для получения зависимостей, которые формулируют методы расчета аэродинамических, экологических и энергетических параметров результирующего потока при взаимодействии плазменного потока со спектром всасывания и радиально активируемой струей [19–21]. Достоверность полученных выводов и рекомендаций основана на современных взглядах на аэродинамику и теплопередачу и подтверждается тем фактом, что полученные результаты не противоречат выводам из известных положений. Аэродинамические исследования процесса удаления вредных выбросов из мест плазменной резки металла проводились на экспериментальной установке, в основе которой лежит устройство предлагаемого локального отсоса, приводимого в действие устройством, создающим радиальную подающую ограничивающую струю.

Основная часть. Плазменная резка многофакторный процесс, зависящий от многих параметров, таких как применяемые газы, толщина заготовки, скорость резки и ряд других [22]. К примеру, эффективность резки металлов растет при использовании газов, экзотермически реагирующих с кислородом. Благодаря этому повышается производительность резки [23], но при этом также и повышается количество плавильной пыли, выброшенной в окружающую среду, которое также зависит от ширины разреза, толщины металла, его вида. Мощность выброса зависит также от скорости резки, а, следовательно, и от установленного режима. Стоит также учитывать и позиционирование заготовки для обеспечения закрывания площади стола не менее 75–80 % от рабочей площади [24]. В случае если резка начинается вне контура детали на поверхности листа, то такой способ именуют пробитием на отходе. Скорость движения плазматрона при пробивке уменьшается в 1,5–2 раза от заданной. Для толщин 20–30 мм врезание или пробивка особых регулировок не требует [25]. На криволинейных участках с целью недопущения искажения кромок детали скорость реза также снижают до 40–50 %. При завершении реза скорость также понижают для осуществления прорезания на конечном участке [26, 27]. Все вышеуказанные факторы влияют на мощность выброса, количество пыли, которая образовалась при резке. Под воз-

действием высокотемпературной струи происходит окисление металла, в том числе и легирующих элементов, а также образуются вредные газы, такие как окислы азота, окись углерода. Данные газы пагубно влияют на организм, вызывая поражение органов дыхания и крови, пищеварительной системы [28]. Количество плавильной пыли, образующейся при плазменной резке ниже, чем при газовой, ввиду того, что ширина реза металла получается уже, однако скорость реза значительно выше, что обеспечивает большую мощность выброса [29], но стоит также учитывать, что, несмотря на это выбросы вредных веществ при использовании этой технологии значительны и опасны для здоровья рабочих, что обуславливает необходимость поддержания требуемых параметров микроклимата на рабочих местах. Установлено, что наибольшая локализация образующихся вредностей происходит под нижней плоскостью заготовки, что обуславливает способ локализации и удаления вредностей из нижней зоны реза заготовки.

Устройство, в котором реализуется вышеизложенный принцип локального всасывания, активируемого радиальной струей воздуха, реализовывался моделью, состоящей из двух труб, установленных коаксиально и соосно, таким образом, что образуют межтрубное пространство для подачи ограничивающего потока (наружное пространство) и пространство для удаления воздуха (внутреннее пространство). Всасывающий поток движется по внутреннему воздуховоду. В межтрубном пространстве подающая поток движется в противоположном направлении. После истечения из отверстия подаваемый поток создает ограничивающую зону, путем натекания на ограничивающий диффузор и распространяется радиально в пространстве. В качестве исходных условий для моделирования были приняты следующие данные: атмосферное давление – $P_a = 101\,325$ Па; температура воздуха – $t_n = 20$ °С; расход воздуха, проходящего в межтрубном пространстве и во внутренней трубе – $Q_{vy} = 200–1000$ м³/ч шагом в 200 м³/ч для модели с ограничивающим потоком и $Q_{vy} = 1000$ м³/ч для модели без ограничивающего потока; длина участка внутренней трубы – $l_{vy} = 500$ мм; длина наружного сечения трубы $l_n = 490$ мм. Ширина воздухораздающей щели $l_1 = 20$ мм. Диаметры внутреннего воздуховода D_v и наружного воздуховода D_n составляли 100 мм и 115 мм соответственно. В первом приближении диаметр ограничивающего диффузора составлял $D_d = 100$ мм, затем он был увеличен на 100 мм с конечным значением 200 мм. Угол наклона ограничивающего диффузора относительно оси воздухопроводов составлял 90°.

Принципиальная схема модели показана на рисунке 1. В этой задаче движение текучих сред, т.е. удаляемых газов и подаваемой струи, моделируется с применением уравнений Навье–Стокса, которые в нестационарной формулировке описывают законы сохранения массы, импульса и энергии этих сред, численная реализация которых выполняется в программный пакет SolidWorks.

Принципиальная схема установки с коаксиальным вытяжным устройством представлена на рисунке 2 и состоит из коаксиального вытяжного устройства (1), корпуса (2), поворотной камеры (3), побудителя (4).

Коаксиальное вытяжное устройство (рис. 3) в свою очередь состоит из диффузора-ограничителя (5), наружного трубопровода (6), внутреннего трубопровода (7), регулирующей манжеты (8), центрирующих шпилек (9).

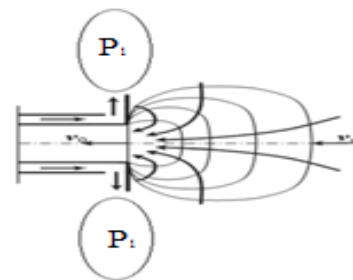


Рис. 1. Принципиальная схема организации удаления воздуха предложенным способом

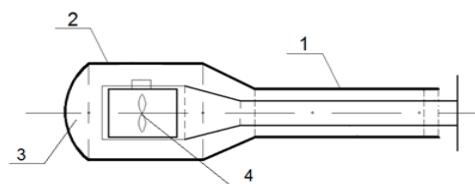


Рис. 2. Схема установки с коаксиальным вытяжным устройством

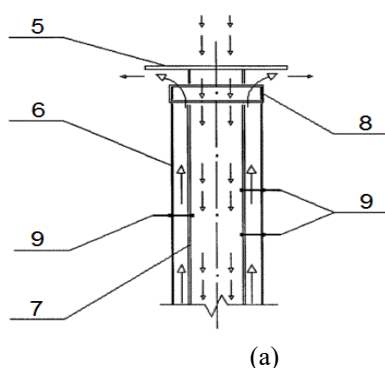


Рис. 3. Принципиальная схема (а) и геометрические параметры (б) коаксиального вытяжного устройства

Принцип работы экспериментальной установки заключается в следующем: воздушный поток всасывается через внутреннюю трубу (7), на которой закреплен круглый ограничительный диффузор (5); внутренний воздуховод меньшего диаметра вставляется во внешний воздуховод большего диаметра, а наружный воздуховод меньшего диаметра – в наружный воздуховод большего диаметра. Воздуховод установлен на некотором расстоянии от диффузора, который закреплен на воздуховоде меньшего диаметра, образуя воздухораспределительное устройство. Второй поток проходит через межтрубное пространство, образованное внутренней трубой (7) и внешней трубой (6). Трубы закреплены вместе центрирующими направляющими (9) для регулировки расстояния между трубами. Регулировка ширины воздухораспределительной щели осуществляется манжетой (8) путем изменения расстояния от наружной трубы до диффузора-ограничителя. Поток, проходящий через межтрубное простран-

ство, перемещается к выпускному отверстию, образованному внешней трубой (6), и ограничивающий диффузор (5) натекает на ограничивающий диффузор и затем распределяется в пространстве вокруг устройства, образуя тем самым область повышенного давления.

Для определения основных характеристик всасывающего потока был проведен комплекс экспериментальных исследований, заключавшихся в определении зоны действия всасывающего потока, распределении скоростей на различных расстояниях от всасывающего отверстия, а также определении осевой скорости потока.

На первом этапе была определена зона действия всасывающего потока. Для этого на расстоянии 800 мм от всасывающего патрубка был установлен штатив с анемометром АТЕ 1034 Актacom. На ограничивающий диффузор была нанесена осевая разметка для определения центра отверстия. Штатив устанавливался соосно центру всасывающего отверстия. В ходе экспери-

мента штатив был размещен на трафарете размером 1000×1000 мм, размеченном с шагом 50 мм, одна сторона которого в свою очередь располагалась таким образом, чтобы ось диффузора совпала с центральной осью трафарета. Ориентируясь на значения расстояний, полученные по результатам моделирования при проведении измерений, штатив перемещался от всасывающего отверстия в противоположном направлении, смещаясь к ранее определенной границе зоны всасывающего потока при контроле в каждой точке на фиксированном расстоянии 50 мм с фиксацией показаний на табло анемометра; при проведении экспериментов в конечных точках показания усреднялись, по результатам проведения серии из не менее чем пяти измерений в точке с разницей между результатами не более чем на $\pm 5\%$ показания фиксировались, в обратном случае серии измерений повторялись.

В результате проведенного моделирования и экспериментального исследования воздушного потока, образующегося при работе местного активированного отсоса и не активированного отсоса с заданным расходом $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$, получено, что подтекание воздушных потоков происходит из всей сферы во всасывающее отверстие, что соответствует утверждениям, изложенным в [9] и изображенным на визуализации на рисунке 4.

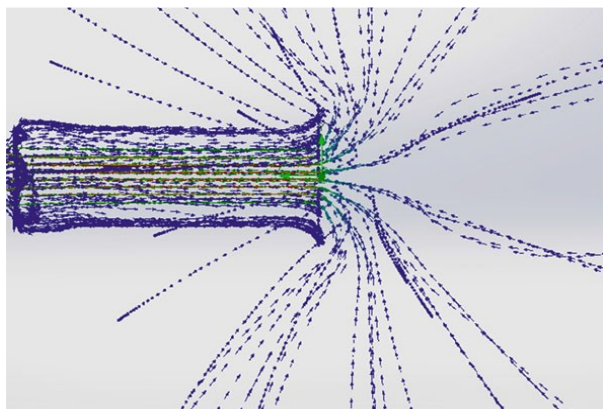


Рис. 4. Визуализация линий потока при работе неактивированного отсоса

Осевая скорость составляла $0,8\text{--}1,2 \text{ м/с}$ на расстоянии $10\text{--}15 \text{ см}$ от всасывающего отверстия; $0,4\text{--}0,6 \text{ м/с}$ на расстоянии 30 см ; скорость воздуха составляла $0,1 \text{ м/с}$ на расстоянии 45 см . При заданном расстоянии $l_1 = 15 \text{ мм}$ (рис. 5) была получена схема течения, при которой было достигнуто ограничение подтекания воздушных потоков из задней полусферы; в то же время во фронтальной зоне стабильность потоков относительно друг друга достигнута не была. При заданном расстоянии $l_1 = 35 \text{ мм}$ ограничение подтекания воздуха из задней полусферы не достигается (рис. 6).

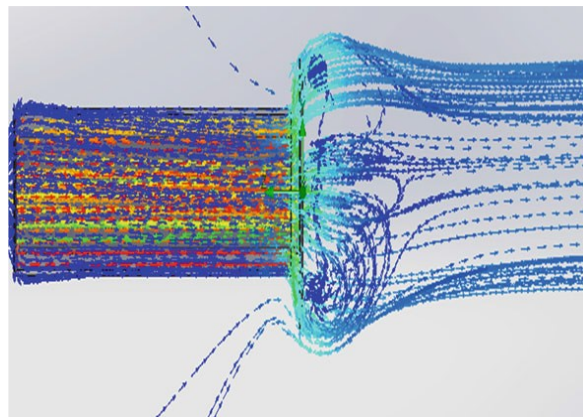


Рис. 5. Визуализация линий потока при ширине отверстия для раздающего потока $l_1 = 15 \text{ мм}$

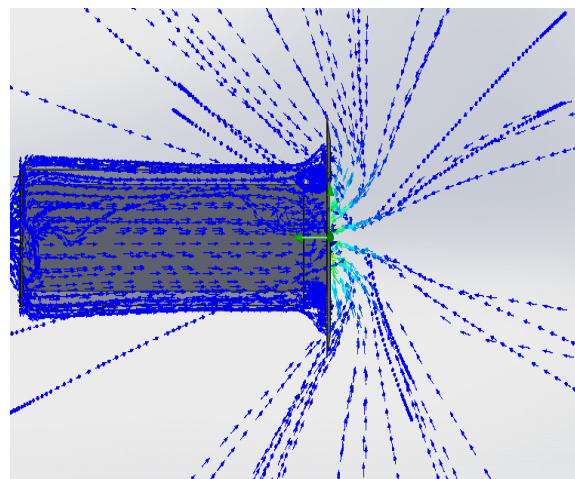


Рис. 6. Визуализация линий потока при ширине отверстия для раздающего потока $l_1 = 35 \text{ мм}$

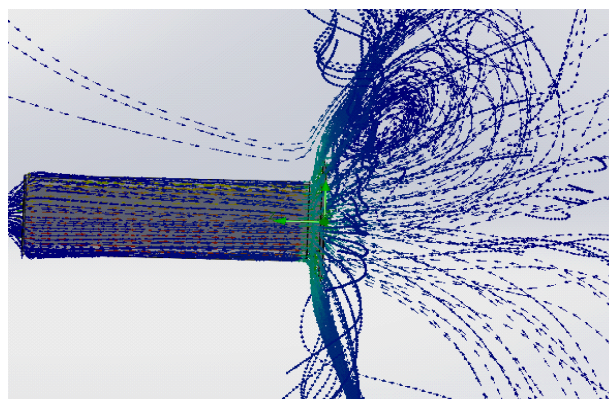


Рис. 7. Визуализация линий потока при ширине отверстия для раздающего потока $l_1 = 20 \text{ мм}$

Результаты моделирования показывают, что для равных соотношений расходов с заданными параметрами устройства (рис. 7), достигнуто отсутствие негативных факторов струйного взаимодействия при формировании воздушного приточного потока в виде воздушной радиальной струи при заданных геометрических параметрах устройства с шириной воздухоподающей щели $l_1 = 20 \text{ мм}$.

В результате сравнения данных полученных при численном моделировании, а также при проведенных экспериментальных исследованиях на

собранной установке для точек с расходом 380, 450 м³/ч и точки с расходом в 1000 м³/ч для неактивированного отсоса построен сравнительный график осевых скоростей.

На основании полученных данных была построена зависимость осевых скоростей от расстояния от оси всасывающего отверстия при различных значениях Q и величине соотношения потоков $\beta = 1$. На рисунке 8 показан сводный график

зависимости осевых скоростей от расстояния от оси всасывающего отверстия при заданных расходах Q_1, Q_2, Q_3 и равном значении соотношений расходов всасывающего и подающего воздушных потоков для значений, полученных в результате моделирования и по результатам экспериментальных исследований.

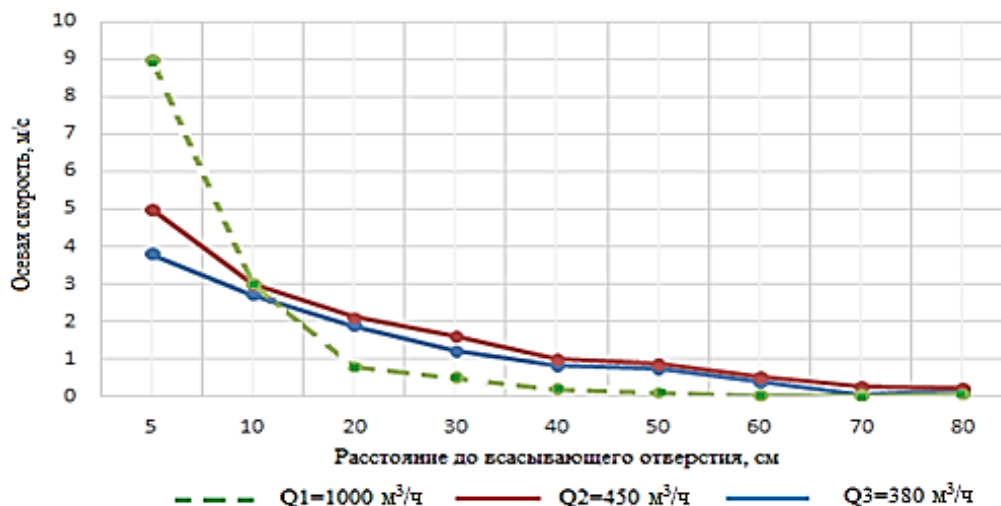


Рис. 8. График зависимости осевых скоростей от удаленности от оси всасывающего отверстия при заданных расходах для неактивированного Q_1 (м³/ч) и активированного отсоса Q_2, Q_3 (м³/ч)

Анализируя график, видно, что осевые скорости для устройства, активированного приточной радиальной струей, значительно выше по сравнению с неактивированным местным отсосом.

Таким образом, на основе сведений, полученных в результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований всасывающего потока коаксиального вытяжного устройства предложенной конструкции, выявлено снижение влияния негативных факторов взаимодействия струй (приточного и вытяжного потоков), позволяющие добиться повышения осевой скорости всасывающего потока для равного соотношения расходов воздуха. Были предложены некоторые конструктивные решения вытяжного устройства для систем локальной вентиляции для удаления вредных выбросов при плазменной обработке металлов, позволяющие улучшить условия труда [30].

Выводы. В результате проведенного эксперимента были обоснованы данные численного моделирования взаимодействия, всасывающего и радиально направленного ограничивающего потока. Также получены геометрические параметры устройства, которое формирует ограничивающий радиально направленный распределяющий поток, при которых достигается улучшение условий формирования всасывающего потока,

спектр всасывания и дальнобойность всасывающего течения, что также подтвердилось в результате проведенного экспериментального исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бутов А.М. Рынок продукции станкостроения //Официальный сайт Национального исследовательского университета «Высшей школы экономики». Институт «Центр развития». 2020. С. 1–4. URL: <https://dcenter.hse.ru/data/2020/11/07/1361776905/Рынок%20продукции%20станкостроения-2020.pdf> (дата обращения 24.07.2024).
2. Концепция ускоренного экспортного развития станкостроительной отрасли на 2018-2025 годы, разработанная в рамках реализации национального проекта «Международная кооперация и экспорт в промышленности»: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 5 ноября 2020 г. № 2869-р // Официальный сайт Правительства Российской Федерации РФ. 2020, С. 8–11. URL: <http://static.government.ru/media/files/NyeLKqLhrJrydnGRBm39nHl0hJNOzHzQ.pdf>. (дата обращения 24.07.2024).
3. Основные направления деятельности Правительства Российской Федерации на период до 2024 года // Официальный сайт

Правительства Российской Федерации. Москва, 2018. С. 16. URL: <http://static.government.ru/media/files/ne0vGNJuk9SQjIGNNsXIX2d2CpCho9qS.pdf>. (дата обращения 24.07.2024).

4. Каталог оборудования для плазменной резки ОАО «Зонт». URL: http://www.artadmires.com/www/zont/production/dop_obo-rud/stol/. (дата обращения 10.06.2024).

5. Atabi F., Nouri A. Study of air pollution due to plasma cutting process and designing local ventilation system with collector in central workshop of mobarakeh steel company // Journal of Occupational Hygiene Engineering. 2014. № 1(2). Pp. 10–19.

6. Zaitsev O.N., Logachev K.I., Goltsov A.B. Increasing the pollutants capture rate by local exhaust due to the use of external swirling jet // Research methods refractories and industrial ceramics. 2022. № 3. Pp 332–336. DOI:10.1007/s11148-022-00731-8

7. Аверкова О.А., Крутикова Д.Н., Логачев И.Н. К вопросу о моделировании воздушного течения вблизи бортового отсоса от гальванической ванны // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 8. С. 75–81. DOI:10.12737/article_5968b450702221.87072424

8. Зайцев О.Н., Степанцова Н.А., Аверкова О.А., Логачев К.И., Уваров В.А. Исследование свободной закрученной струи с прецессирующим вихревым ядром // Строительство и технологическая безопасность. 2017. № 8. С. 109–113.

9. Писаренко В.Л. Вентиляция рабочих мест в сварочном производстве. М.: Изд-во «Машиностроение». 1981. 119 с.

10. Девисилов В.А. Охрана труда. 3-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во ФОРУМ: ИНФРА-М, 2013. 440 с.

11. Гельберг Б.Т., Пекелис Г.Д. Ремонт промышленного оборудования. Изд. 9-е, перераб. и доп. М.: Изд-во «Высшая школа», 1988. 61 с.

12. Анахов С.В. Принципы и методы проектирования в электроплазменных и сварочных технологиях. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2014. 143 с.

13. Michael R. Flynn, Pam Susi. Local Exhaust Ventilation for the Control of Welding Fumes in the Construction Industry—A Literature Review // Oxford University Press Ann. Occup. Hyg. 2012. № 7. Pp. 764–776. DOI: 10.1093/annhyg/mes018

14. Jeong S.-H., Kwon H.-M., Ahn S.-J., Yang J.-H. A Study on the Improvement of Ventilation Rate Using Air-flow Inducing Local Exhaust Ventilation System // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2016. № 15. Pp. 119–126. DOI: 10.3130/jaabe.15.119

15. Zaidi S., Sathawara N., Kumar S., Gandhi S., Parmar C., Saiyed H. Development of Indigenous Local Exhaust Ventilation System: Reduction of Welders Exposure to Welding Fumes // Journal of Occupational Health. 2004. № 46. Pp. 323–328. DOI:10.1539/joh.46.323

16. Алямовский А.А. SolidWorksSimulation: Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. Москва: Изд-во «ДМК Пресс», 2015. 562 с.;

17. Прохоренко В.П. SolidWorks Практическое руководство. Москва: Изд-во «Бином», 2004. 448 с.

18. Алямовский А.А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. Санкт-Петербург: Изд-во "БХВ-Петербург", 2005. 1019 с.

19. Бояршинова А.К. Теория инженерного эксперимента. Челябинск: ЮУрГУ, 2006. 85 с.

20. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. Пер. с нем. М.: Изд-во «Мир», 1977. 552 с.

21. Ермаков С.М. Математическая теория планирования эксперимента. М.: Изд-во «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 392 с.

22. Gostimirović M., Rodić D., Sekulić M., Aleksić A. An Experimental Analysis of Cutting Quality in Plasma Arc Machining // Advanced technologies and materials. 2020. № 1. Pp. 1–8. DOI:10.24867/ATM-2020-1-001

23. Кортес А.Р. Сварка, резка, пайка металлов. М.: Изд-во ООО «Арфа СВ», 1999. С. 192.

24. Тимофеева О.Н., Векслер Г.С. Местные вытяжные устройства к оборудованию для сварки и резки металлов. Л.: Изд-во ВНИИ охраны труда ВЦСПС в Ленинграде, 1980. С. 24–29.

25. Васильев К.В. Плазменно-дуговая резка. М.: Изд-во «Машиностроение», 1974. 77 с.

26. Ширшов И.Г., Котикова В.Н. Плазменная резка. Л.: Изд-во «Машиностроение». Ленингр. отд-ие, 1987. 192 с.

27. Малаховский В.А. Руководство для обучения газосварщика и газорезчика. М.: Изд-во «Высшая школа», 1990. 296 с.

28. Левченко О.Г., Метлицкий В.А. Современные средства защиты сварщиков. Киев: Изд-во «Экотехнология», 2001. 84 с.

29. Соколов И.И. Газовая сварка и резка металлов. М.: Изд-во «Высшая школа», 1978. 318 с.

30. Пат. №. 207611 РФ.F24F 7/08 (2021.05) Патент на полезную модель - Коаксиальное локальное вытяжное устройство/ Сиваченко Ю.А. №2021105119; заявл. 25.02.2021 опубл. 03.11.2021 Бюл. № 31. 2 с.

Информация об авторах

Зайцев Олег Николаевич, доктор технических наук профессор кафедры инфраструктурных энергетических систем. E-mail: zon071941@mail.ru. Юго-Западный государственный университет им. И.И. Ишутина. Россия, 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Сиваченко Юрий Анатольевич, аспирант кафедры Теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: strikermk12@mail.ru. Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского. Республика Крым, 295007, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, 4.

Поступила 24.07.2024 г.

© Зайцев О.Н., Сиваченко Ю.А., 2024

^{1,*}**Zaitsev O.N.**, ²**Sivachenko Yu.A.**

¹Southwest State University

²V.I. Vernadsky Crimean Federal University

*E-mail: zon071941@mail.ru

INVESTIGATION OF THE SUCTION FLOW ACTIVATED BY A RADIAL JET FROM THE PLASMA CUTTING ZONE

Abstract. The article presents the data obtained during the study of a local exhaust device activated by a perpendicular ramjet positioned in the plasma cutting zone in the outlet space of a thermal heterogeneous jet. In addition, there are the results of numerical modeling of various options for activating the suction flow (increasing the range of the suction flow), which made it possible to determine the geometric parameters of the device and determine the range of variation of flow rates for the formation of a limiting radial jet and to achieve the absence of negative interaction between the supply radial limiting jet and the suction flow for the proposed design of the local exhaust device. The results of experimental studies of the proposed design of the suction device obtained by numerical simulation are presented. The design features of the device implementing the specified method of activating the suction flow are described. The technological and production factors of plasma cutting technology of various metals are described, which influenced the choice of the method of positioning the exhaust device of the design proposed based on the results of modeling, and harmful production factors are also considered, the predominant of which is harmful emissions formed during plasma cutting (dust, aerosols, toxic compounds, gases). Experimental data obtained by modeling the interaction of a suction and radially directed limiting flow are obtained and substantiated.

Keywords: local suction, plasma cutting, suction torch, removal, local suction, plasma cutting.

REFERENCES

1. Butov A.M. Market for machine tool products. Official website of the National Research University Higher School of Economics. Development Center Institute. 2020. Pp. 1–4 URL: <https://dcenter.hse.ru/data/2020/11/07/1361776905/> (Accessed 24.07.2024) (rus)
2. The concept of accelerated export development of the machine tool industry for 2018-2025, developed as part of the implementation of the national project «International cooperation and export in industry»: Order of the Government of the Russian Federation of November 5, 2020 No. 2869-r. Official website of the Government of the Russian Federation of the Russian Federation. 2020. Pp. 8–11. URL: <http://static.government.ru/media/files/NyeLKqLhrJrydnGRBm39nHl0hJNOzHzQ.pdf>. (Accessed 24.07.2024) (rus)
3. Main directions of activity of the Government of the Russian Federation for the period until 2024. Official website of the Government of the Russian Federation. Moscow. 2018. Pp. 16. URL: <http://static.government.ru/media/files/ne0vGNJuk9SQjIGNNsXlX2d2CpCho9qS.pdf>. (Accessed 24.07.2024) (rus)
4. Official website (JSC «Umbrella»). Catalog of equipment for plasma cutting [Electronic resource] URL: http://www.artadmires.com/www/zont/production/dop_oborud/stol/. (Accessed 10.06.2024) (rus)
5. Atabi F., Nouri A. Study of air pollution due to plasma cutting process and designing local ventilation system with collector in central workshop of Mobarakeh steel company. Journal of Occupational Hygiene Engineering. 2014. Vol. 1. Pp. 10–19.
6. Zaitsev O.N., Logachev K.I., Goltsov A.B. Increasing the pollutants capture rate by local exhaust due to the use of external swirling jet. Research methods refractories and industrial ceramics. 2022. Vol. 63. No. 6. Pp. 332–336. DOI:10.1007/s11148-022-00731-8

7. Averkova O.A., Krutikova D.N., Logachev I.N. On the issue of modeling the air flow near the onboard suction from the galvanic bath [K voprosu o modelirovanii vozdušnogo techeniya vblizi bortovogo otsosa ot gal'vanicheskoy vannы]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 8. Pp. 75–81. DOI:10.12737/article_5968b450702221.87072424(rus)
8. Zaitsev O.N., Stepantsova N.A., Averkova O.A., Logachev K.I., Uvarov V.A. Investigation of a free swirling jet with a precessing vortex core [Issledovanie svobodnoj zakruchennoj strui s precessiruyushchim vikhrevym yadrom] Construction and technogenic safety [Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost']. 2017. No. 8. Pp. 109–113. (rus)
9. Pisarenko V.L. Ventilation of workplaces in welding production [Ventilyaciya rabochih mest v svarochnom proizvodstve]. Moscow.: «Mechanical Engineering». 1981. 119 p. (rus)
10. Devisilov V.A. Labor protection [Ohrana truda] Moscow.: FORUM: INFRA-M, 2013. 157 p. (rus)
11. Gelberg B.T., Pekelis G.D. Repair of industrial equipment [Remont promyshlennogo oborudovaniya]. Moscow.: «Higher School», 1988. 61 p. (rus)
12. Anakhov S.V. Principles and methods of design in electroplasma and welding technologies [Principy i metody proektirovaniya v elektroplazmennyyh i svarochnyh tekhnologiyah]. Yekaterinburg: Publishing House of the Russian State Prof.-Ped. Unita, 2014. 10–13 p. (rus)
13. Michael R. Flynn, Pam Susi. Local Exhaust Ventilation for the Control of Welding Fumes in the Construction Industry – A Literature Review. Oxford University Press Ann. Occup. Hyg. 2012. Vol. 56. Pp. 764–776. DOI: 10.1093/annhyg/mes018
14. Jeong S.-H., Kwon H.-M., Ahn S.-J., Yang J.-H. A Study on the Improvement of Ventilation Rate Using Air-flow Inducing Local Exhaust Ventilation System. Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2016. Vol. 15. Pp. 119–126. DOI: 10.3130/jaabe.15.119
15. Zaidi S., Sathawara N., Kumar S., Gandhi S., Parmar C., Saiyed H. Development of Indigenous Local Exhaust Ventilation System: Reduction of Welders Exposure to Welding Fumes. Journal of Occupational Health. 2004. Vol. 46. Pp. 323–328. DOI:10.1539/joh.46.323
16. Alyamovsky A.A. SolidWorksSimulation: Engineering analysis for professionals: tasks, methods, recommendations [Inzhenernyj analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendacii]. Moscow: DMK Press, 2015. 562 p. (rus)
17. Prokhorenko V.P. SolidWorks Practical guide [SolidWorks Prakticheskoe rukovodstvo]. Moscow: Binom, 2004. 448 p. (rus);
18. Alyamovsky A.A. SolidWorks. Computer modeling in engineering practice [Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike]. St. Petersburg: «BHV-Petersburg», 2005. Pp. 170–191. (rus)
19. Boyarshinova A.K. Theory of engineering experiment [Teoriya inzhenernogo eksperimenta]. Chelyabinsk: SUSU, 2006. 85 p. (rus)
20. Hartman K. Planning an experiment in the study of technological processes [Planirovanie eksperimenta v issledovanii tekhnologicheskikh processov]. Trans. from German. Moscow: "Mir", 1977. 552 p. (rus)
21. Ermakov S.M. Mathematical theory of experiment planning [Matematicheskaya teoriya planirovaniya eksperimenta]. Moscow: Nauka, 1983. 392 p. (rus)
22. Gostimirović M., Rodić D., Sekulić M., Aleksić A. An Experimental Analysis of Cutting Quality in Plasma Arc Machining. Advanced technologies and materials. 2020. Vol. 45. Pp. 1–8. DOI:10.24867/ATM-2020-1-001
23. Cortes A.R. Welding, cutting, soldering of metals [Svarka, rezka, pajka metallov]. Moscow.: LLC «Arfa SV», 1999. Pp. 138–141. (rus)
24. Timofeeva O.N., Veksler G.S. Local exhaust devices for equipment for welding and cutting metals. Leningrad [Mestnye vytyazhnye ustrojstva k oborudovaniyu dlya svarki i rezki metallov].: Publishing House of the Institute of Labor Protection of the All-Russian Union of Industrial Safety in Leningrad, 1980. Pp. 24–29. (rus)
25. Vasiliev K.V. Plasma arc cutting [Plazmenno-dugovaya rezka]. Moscow: «Mechanical Engineering», 1974. Pp. 72–74. (rus)
26. Shirshov I.G., Kotikova V.N. Plasma cutting [Plazmennaya rezka]. Leningrad.: «Mechanical Engineering». Leningr. publishing house, 1987. Pp. 131–133. (rus)
27. Malakhovsky V.A. A guide for the training of a gas welder and a gas cutter [Rukovodstvo dlya obucheniya gazosvarshchika i gazorezchika]. Moscow.: Publishing «Higher School», 1990. Pp. 282–285.
28. Levchenko O.G., Metlitsky V.A. Modern means of protection for welders [Sovremennye sredstva zashchity svarshchikov]. Kiev: «Ecotechnology», 2001. P.5. (rus)
29. Sokolov I.I. Gas welding and metal cutting [Gazovaya svarka i rezka metallov] Moscow: Higher School, 1978. P.167, 204. (rus)
30. Sivachenko Yu.A. Coaxial local exhaust device. Patent RF, no. 207611. 2021.

Information about the authors

Zaitsev, Oleg N. DSc, Professor. E-mail: zon071941@mail.ru. Southwest State University. 94, Str. 50 Let Oktyabrya, Kursk, Russia, 305040,

Sivachenko, Yuri A. Postgraduate student. E-mail: strikermk12@mail.ru. V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Prospekt Vernadskogo 4, Simferopol, Republic of Crimea, 295007

Received 24.07.2024

Для цитирования:

Зайцев О.Н., Сиваченко Ю.А. Исследование активированного радиальной струей всасывающего потока из зоны плазменной резки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 10. С. 44–52. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-44-52

For citation:

Zaitsev O.N., Sivachenko Yu.A. Investigation of the suction flow activated by a radial jet from the plasma cutting zone. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 10. Pp. 44–52. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-44-52

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-53-62

Уляшева В.М., Мартыанова А.Ю., Анишкова Е.А.Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет***E-mail: ulyashevavm@mail.ru*

К РАСЧЕТУ СКОРОСТИ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

Аннотация. *Аэродинамический режим систем аспирации и пневмотранспорта зависит от многих факторов, в первую очередь от физических характеристик перемещаемых твердых частиц, а также от особенностей технологических процессов с выделением твердых частиц различного происхождения и конструктивного устройства рассматриваемых систем. При проектировании систем аспирации и пневмотранспорта для различных отраслей промышленности обычно решается комплекс задач, связанных с обеспечением предельно допустимых концентраций пыли в производственных помещениях и в атмосферном воздухе, ресурсосбережением и энергоэффективностью. Предприятия производства строительных материалов характеризуются значительными пылевыведениями. При этом в процессах дробления, размола, сортировки, перемещения сырья и строительных материалов образуются твердые частицы, имеющие в общем случае широкий диапазон размеров – от 0,01 мкм до 20 мм и более. Это создает значительные трудности при конструировании приемников вредностей, воздухопроводов, устройств для очистки воздуха. В практике проектирования расчеты систем аспирации и пневмотранспорта выполняются по инженерным методикам, основанным преимущественно на данных экспериментальных исследований 1970–1990 гг., в связи с чем имеет место существенное различие результатов. Практически все инженерные методики основаны на экспериментальных значениях скорости витания твердых частиц. Значения скорости витания твердых частиц, идентичных по физическим характеристикам, различаются на более 30 %. Что касается одной из наиболее важных аэродинамических характеристик, скорости транспортирования, то для совершенствования методов инженерных расчетов необходимы новые данные для различных видов твердых частиц. Учитывая наличие в аэродисперсных потоках рассматриваемых систем твердых частиц различных размеров, использование численного моделирования достаточно ограничено. Имеются результаты численного эксперимента, в основном, для оборудования очистки воздуха, в частности, циклонов. В работе приведены экспериментальные данные определения скорости транспортирования для твердых частиц, характерных для предприятий строительной отрасли.*

Ключевые слова: *аспирация, аэродисперсная система, твердая частица, скорость витания, скорость транспортирования*

Введение. Аэродинамический режим систем аспирации и пневмотранспорта, широко применяемых в различных отраслях промышленности при необходимости перемещения компонентов материалов после их измельчения, зависит от особенностей технологического процесса, характеристики перемещаемых твердых частиц, конструктивных и функциональных особенностей рассматриваемых систем. Исследованиям аэродисперсных систем посвящено значительное число работ. Необходимо отметить многочисленные исследования В.Е. Воскресенского, обобщенные в работах [1, 2], связанные с изучением систем аспирации и пневмотранспорта в деревообрабатывающей промышленности, разработкой инженерных методов расчета систем и подбора пылеулавливающего оборудования. Оценка энергетической и экологической безопасности аспирационных систем рассмотрена в работе [3]. Учитывая значительные сложности в изучении аэродисперсных систем вследствие существенного влияния различных физических факторов,

большинство исследователей наряду с лабораторными экспериментами [4, 5] используют компьютерное моделирование. Кроме того, во многих случаях необходимо учитывать влияние на аэродинамический режим процессов тепломассообмена [6]. Использование методов математического моделирования позволяет рассматривать аэродинамические процессы с точки зрения нестационарности их формирования [7], учета влияния особенностей подачи пылевидных частиц [8, 9], конфигурации возмущающих элементов в воздухопроводах [10] и местных отсосах [11]. Значительный вклад в развитие теории и практики аспирационных систем принадлежит Белгородской научной школе БГТУ им. В.Г. Шухова. В публикациях [12, 13] рассмотрены различные аспекты формирования пылевоздушных течений во входных отверстиях и патрубках, формирования отрывных течений и вихревых зон в пылеприемниках [14–16]. Особое внимание уделено изучению потоков в зоне их отрыва, оптимизации конфигурации систем и конструктивного оформления

всасывающих отверстий для снижения аэродинамического сопротивления. Авторы настоящей статьи рассматривали применение лабораторного и численного экспериментов в аспирационных системах, некоторые результаты которых представлены в работах [4, 17]. Зарубежными исследователями в работах, посвященных данной проблеме, также использованы и физические эксперименты [18, 19], и методы компьютерного моделирования, например, в работе [20].

В инженерной практике расчета инженерных систем необходимо иметь обобщенные характеристики, позволяющие учесть их гидравлические особенности. Это в полной мере касается и аэродисперсных систем. Одной из основных характеристик данных систем является скорость витания перемещаемых твердых частиц. В общем случае в зависимости от вида и физических характеристик исходного материала, технологических особенностей переработки, обработки или перемещения материалов перемещаемые частицы могут иметь различную форму и размеры. На предприятиях строительной отрасли источниками образования твердых частиц являются дробильные, помольные и сортировочные линии, места перегрузки и транспортирование сыпучих материалов, неплотности в укрытиях различного технологического оборудования. При этом, в силу особенностей образования твердых частиц под действием, в основном, гравитационных и инерционных сил твердые частицы приобретают округлую или шарообразную форму, поскольку выступы на поверхности твердых частиц подвергаются интенсивному истиранию в процессе вышеуказанных технологических и транспортных операций. В исследованиях систем аспирации и пневмотранспорта преимущественно рассматриваются шарообразные частицы, в большинстве случаев такой подход адекватен результатам физических экспериментов.

Как отмечено выше, основной характеристикой аэродисперсных систем является скорость витания твердой частицы, определяющая практически все остальные аэродинамические характеристики, такие как скорости трогания, транспортирования, движения частиц твердой фазы, аэродинамического сопротивления. Некоторые исследователи не считают скорость витания твердой частицы в потоке воздуха основополагающей характеристикой для расчета рассматриваемых систем, предлагая перейти к использованию в качестве основной характеристики, например, скорости трогания. Несмотря на это, скорость витания остается определяющей для решения задач

исследований аэродисперсных систем, что в первую очередь связано с существенно более удобными методами для проведения физических измерений. Необходимость исследований скоростей витания и транспортирования обусловлена отсутствием систематизированной информации по аэродинамическим характеристикам для различных видов перемещаемых твердых частиц в системах аспирации и пневмотранспорта, отличающихся сложностью конфигурации и значительными затратами материальных и энергетических ресурсов. Для снижения потребления ресурсов независимо от конфигурации систем (разветвленные или с аспирационными коллекторами) и во избежание образования отложений твердых частиц рекомендуется использовать вертикальные и/или наклонные воздухопроводы. Таким образом, целью работы является экспериментальное исследование скорости транспортирования твердых частиц с различными плотностью и диаметром в наклонных воздухопроводах в зависимости от угла наклона. Для поставленной цели исследований решены следующие задачи:

- усовершенствована лабораторная установка для выполнения измерений при различных углах наклона воздухопровода;
- выполнены измерения и статистическая обработка скорости транспортирования для твердых частиц с различной плотностью и диаметром, характерных для строительной отрасли;
- на основании обработки результатов измерений предложена новая критериальная зависимость, позволяющая определить скорость транспортирования в зависимости от режима течения, массовой концентрации и угла наклона воздухопровода.

Методы. Для определения аэродинамических характеристик систем аспирации и пневмотранспорта широко применяются лабораторные эксперименты. В.Е. Воскресенский [1] считает результаты таких исследований наиболее достоверными, что связано с крайней неоднородностью аэродисперсных потоков, удаляемых от мест образования твердых частиц. Несмотря на то, что в работах [1, 2] речь идет о деревообрабатывающих цехах, в которых имеют место особые виды отходов производства в виде стружек и опилок, такая ситуация характерна и для других технологических процессов, в том числе для строительной отрасли. При производстве строительных материалов и изделий в большинстве случаев твердые частицы имеют более компактную геометрическую форму, чем в вышеуказанном

производстве. Однако, в аспирационных системах строительной отрасли удаляемые твердые частицы имеют широкий диапазон размеров. Дисперсный состав пылевоздушных потоков в аспирационных системах зависит от многих факторов, среди них в первую очередь необходимо отметить состояние исходного сырья, периодический и постоянный режим работы определенного технологического процесса. В любой момент времени представляется достаточно сложным получить подробную характеристику дисперсного состава потока взвешенных частиц. В отличие от расчетов с целью экологической безопасности для аэродинамических расчетов систем аспирации необходимо определить рациональные значения скоростей транспортирования твердых частиц определенной совокупности физических характеристик, таких как плотности, размеров, температуры, влажностного состояния. В связи с этим основным методом изучения остается физический натурный или лабораторный эксперимент.

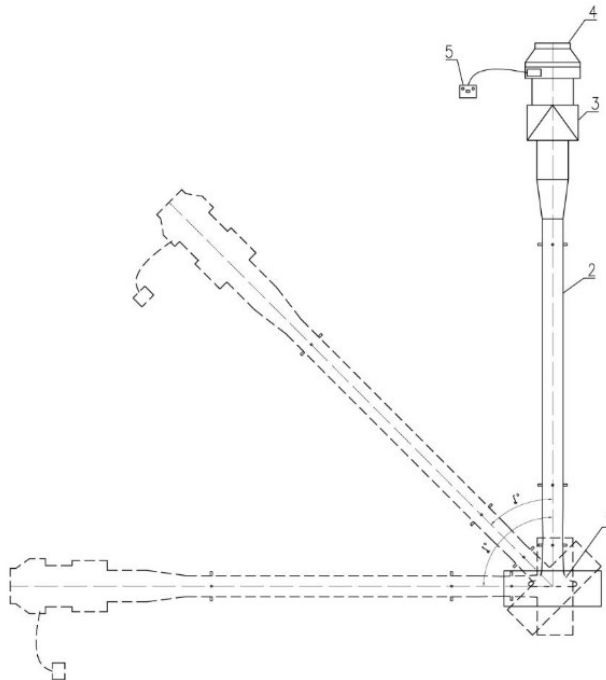
Однако, натурный эксперимент сопряжен со значительными трудностями с точки зрения его планирования, в частности, использования средств измерений. Исследования в условиях действующего производства может быть исполь-

зован для оценки эффективности удаления твердых частиц от мест их образования и очистки в пылеуловителях, совершенствования конструкции и места размещения местного отсоса (пылеприемника), конфигурации системы воздухопроводов. Что касается лабораторного эксперимента, есть возможность определить необходимые аэродинамические характеристики для твердых частиц различного размера и плотности. В практике проектирования данные исследований позволят выбрать рациональные значения искомых аэродинамических характеристик, а также в дальнейшем учитывать неоднородность аэродисперсных систем при построении математических моделей пылевоздушных потоков в воздуховодах.

На рисунке 1 представлены общий вид усовершенствованной лабораторной установки кафедры теплогазоснабжения и вентиляции СПбГАСУ(а) и схема для исследований скорости транспортирования при различных положениях наклонного воздуховода (б). При планировании эксперимента в качестве факторов варьирования приняты размеры (диаметр) твердой частицы, плотность материала и массовая концентрация. В качестве функции отклика принята скорость транспортирования твердой частицы в воздуховоде при различных углах наклона.



а)



б)

Рис. 1. Лабораторная установка для исследования скорости транспортирования:

1 – коллектор входной, 2 – прозрачный воздуховод постоянного сечения, 3 – Фильтр ФЛК 160, 4 – вентилятор Rosenberg R200, 5 – лабораторный автотрансформатор

Для экспериментов данной работы применены частицы бетона диаметром 2,5; 5; 7,5; 10; 15 мм и плотностью 400, 800, 1500, 2200 и

2300 кг/м³. При экспериментальных исследованиях скорости транспортирования мономодисперс-

ного материала использован наклонный воздуховод постоянного сечения, угол наклона воздуховода изменялся от 0 до 90° с шагом 15°. Максимальный расход воздуха 900 м³/ч, рабочее давление до 450 Па.

Статистическая обработка проведена для каждой серии опытов с твердыми частицами определенного диаметра и плотности. Проведены по три параллельных измерения для нахождения средних арифметических значений для каждого из диаметров и плотности. Выполнена проверка однородности дисперсий, опытное значение критерия Кохрена 0,42, что меньше критического значения 0,516. Опытное значение критерия Фишера 1,6, что также не превышает критическое значение.

Подобные лабораторные установки использованы и другими авторами, результаты обработки представлены регрессионными уравнениями, неудобными для включения в инженерные методики, или эмпирическими зависимостями с числовыми коэффициентами преимущественно для нахождения скорости витания твердой частицы, исходя из ее диаметра, d_q , и плотности, ρ_q , типа $w_b = f(d_q, \rho_q)$. В отдельных случаях учтены плотность газа (воздуха), ускорение свободного падения. При этом в некоторых зависимостях указан диапазон чисел Рейнольдса.

Что касается нахождения скорости транспортирования, то в этом случае в эмпирические формулы для скорости витания введены еще ряд эмпирических коэффициентов для учета характеристик воздухопроводов (диаметра и шероховатости стенок), формы и концентрации твердых частиц. Зависимости получены для горизонтальных и вертикальных воздухопроводов. При этом, в проектной практике в основном применяют наклонные воздухопроводы. Таким образом, несомненно, актуальным является исследование скорости транспортирования в наклонных воздухопроводах. При этом, горизонтальные и вертикальные воздухопроводы рассмотрены как частные случаи.

В теории и практике тепломассообмена и аэродинамики широко используется теория подобия, позволяющая обобщать экспериментальные данные в удобные критериальные зависимости. В работе [4] получены скорости транспортирования для частиц диаметром 5 мм и плотностью 800 кг/м³. В результате статистической обработки данных результатов и применения теории подобия получено критериальное уравнение в виде зависимости для критерия Фруда, определенного по скорости транспортирования:

$$Fr_T = Re_b^{0,89} \cdot (1 + \sin 2\alpha)^{0,5}, \quad (1)$$

где α – угол наклона измерительной трубы по отношению к горизонтали, град; Re_b – критерий

Рейнольдса, определенный по скорости витания; Fr_T – критерий Фруда, определенный по скорости транспортирования.

Критерий Рейнольдса определен по формуле:

$$Re_b = \frac{w_b \cdot d_q}{\nu}, \quad (2)$$

где w_b – скорость витания твердой частицы, м/с; d_q – диаметр частицы, м; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

Критерий Фруда:

$$Fr_T = \frac{w_T^2}{g \cdot d_q}, \quad (3)$$

где w_T – скорость транспортирования, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Используя зависимость (3), получены значения скорости транспортирования для частиц диаметром 5 мм и плотностью 800 кг/м³. Критериальная зависимость адекватно описывает результаты эксперимента только для данных условий.

Однако, после проведения серии экспериментов по определению скорости транспортирования твердых частиц, оказалось, что для настоящего исследования скорости транспортирования твердых частиц разной плотности формула (1) не является корректной. Необходимо учитывать также другие характеристики аэродисперсных систем. В данной работе предложено использовать дополнительно массовую концентрацию твердых частиц, μ . В работе принята массовая концентрация $\mu = 0,2$ кг/кг, исходя из условий проведения эксперимента. В результате предложена формула для определения критерия Фруда в следующем виде:

$$Fr_T = \frac{Re_b^{0,5} \cdot (1 + \sin 2\alpha)^{0,5}}{\mu}, \quad (4)$$

где μ – массовая концентрация, кг/кг.

Основные научные результаты. Для анализа результаты исследований представлены на рисунках 2-4. На рис. 2 приведены зависимости скорости транспортирования от плотности твердых частиц, полученные по формуле 4. Можно отметить существенное влияние на значения скорости транспортирования диаметров твердых частиц. Влияние плотности менее выражено. Эта зависимость особенно явно отражена на рис. 3 и характерна для любой плотности. Аналогичные зависимости получены для углов наклона – 0, 15, 45, 60 и 90°.

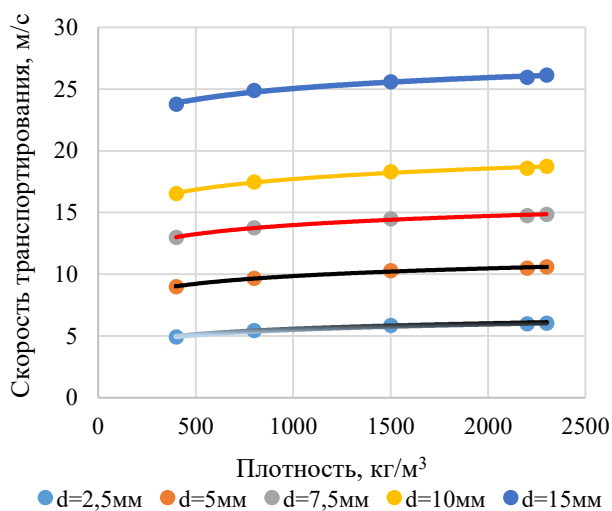
Зависимости скорости транспортирования для выбранного диапазона диаметров и плотности твердых частиц носят логарифмический характер

На рисунке 4 приведены зависимости скоро-

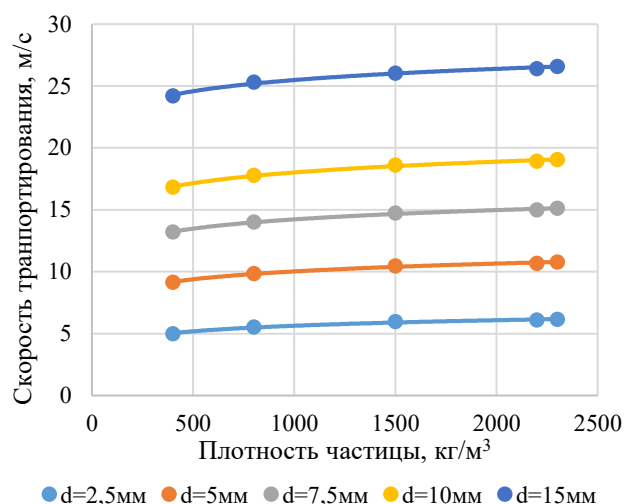
сти транспортирования от угла наклона воздуха для частиц диаметром 2,5 и 5 мм и, соответственно, плотностью 2200 и 800 кг/м³, полученные по формуле 4 и по результатам экспериментальных измерений на лабораторной установке (рис. 1). При этом результаты для частиц диаметром 5 мм и плотностью 800 кг/м³ приняты по данным работы [4] для углов наклона 0, 15, 30, 45 и 60°.

Анализ зависимостей на рис. 4 показывает, что имеет место отклонение данных теоретического расчета по формуле 4 и экспериментальных данных. При этом на рис. 4 (а) отклонение может и положительным, и отрицательным, а выполненный прогноз экспериментальных данных для 75° и 90° показывает тенденцию на уменьшение скорости транспортирования. На рис. 4 (б)

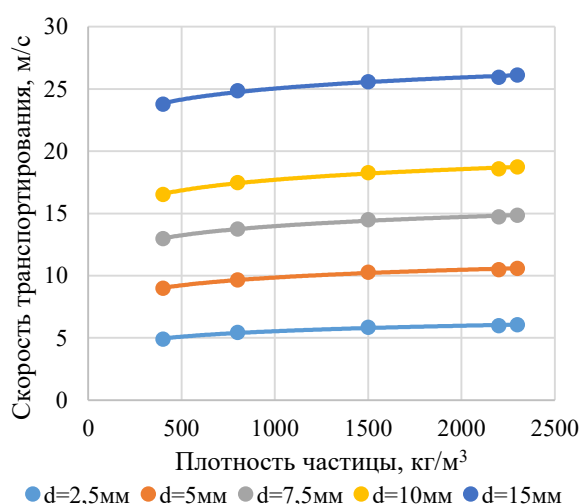
теоретические значения скорости транспортирования для любых углов наклона меньше экспериментальных, что можно объяснить особенностями проведения эксперимента. Учитывая сложности проведения эксперимента, результаты, полученные экспериментальным путем и по предлагаемой формуле 4, можно считать адекватными. Результаты экспериментов показывают, что наибольшие значения скорости транспортирования имеют место при углах наклона от 30° до 60°. При меньшей плотности (800 кг/м³) максимальные значения наблюдаются при 30-45°, а для плотности 2200 и 2300 кг/м³ максимальные значения скорости транспортирования имеют место ближе к 60°



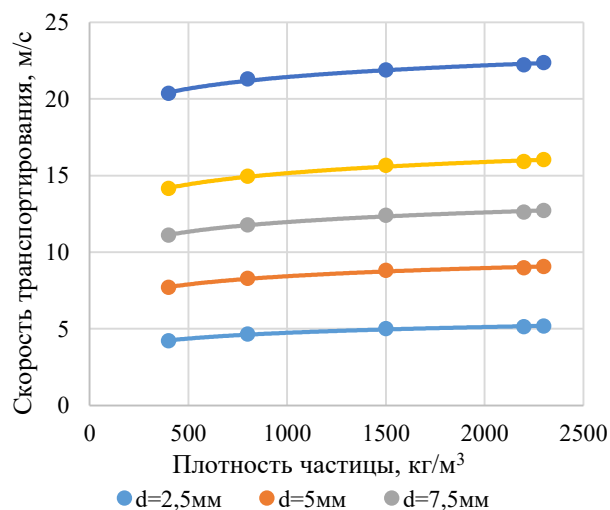
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Зависимость скорости транспортирования от плотности частиц при угле наклона 30° (а); 45°(б); 60 °(в); 90° (г)

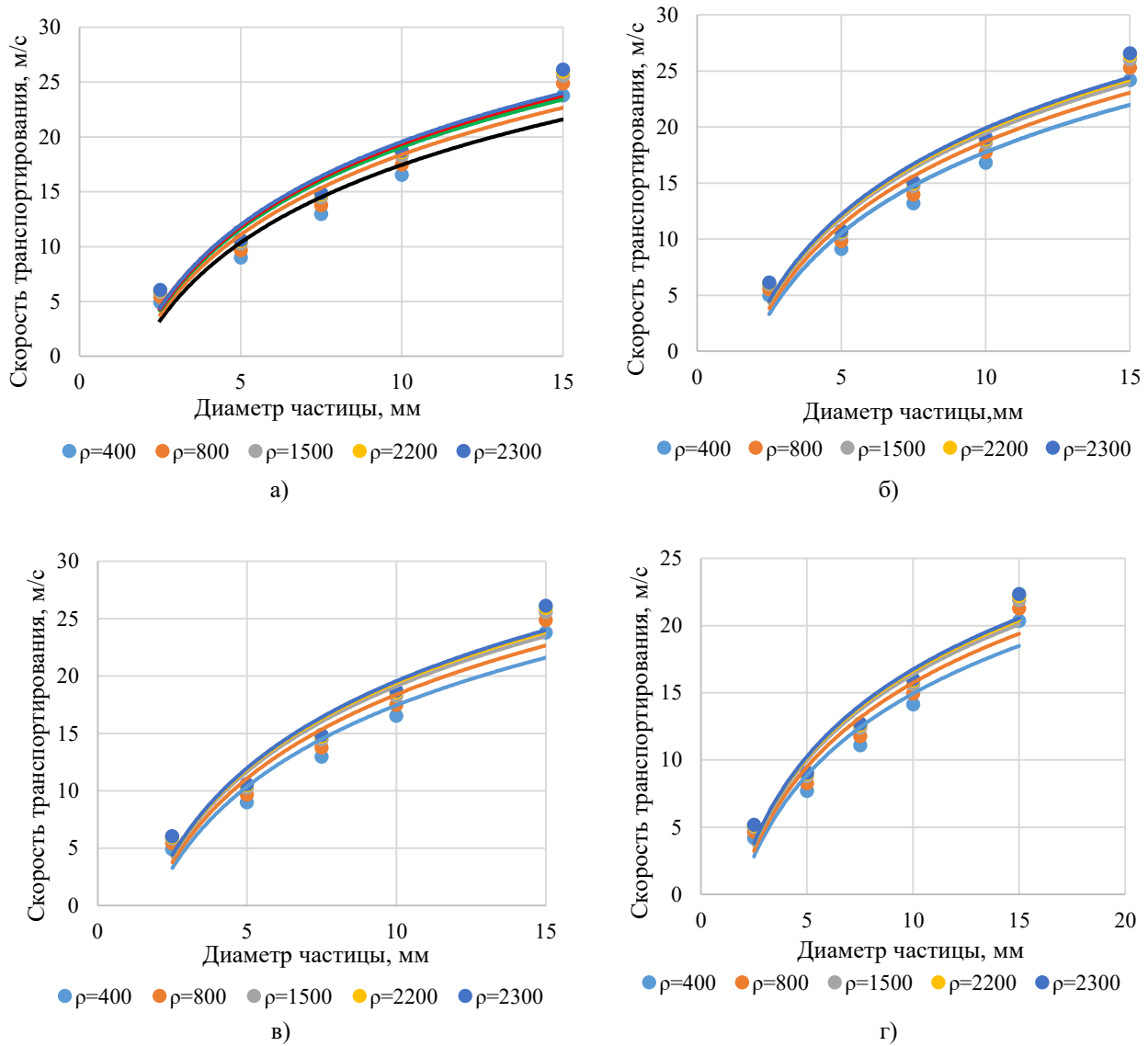


Рис. 3. Зависимость скорости транспортирования от диаметра частиц при угле наклона 30° (а); 45°(б); 60° (в); 90° (г)

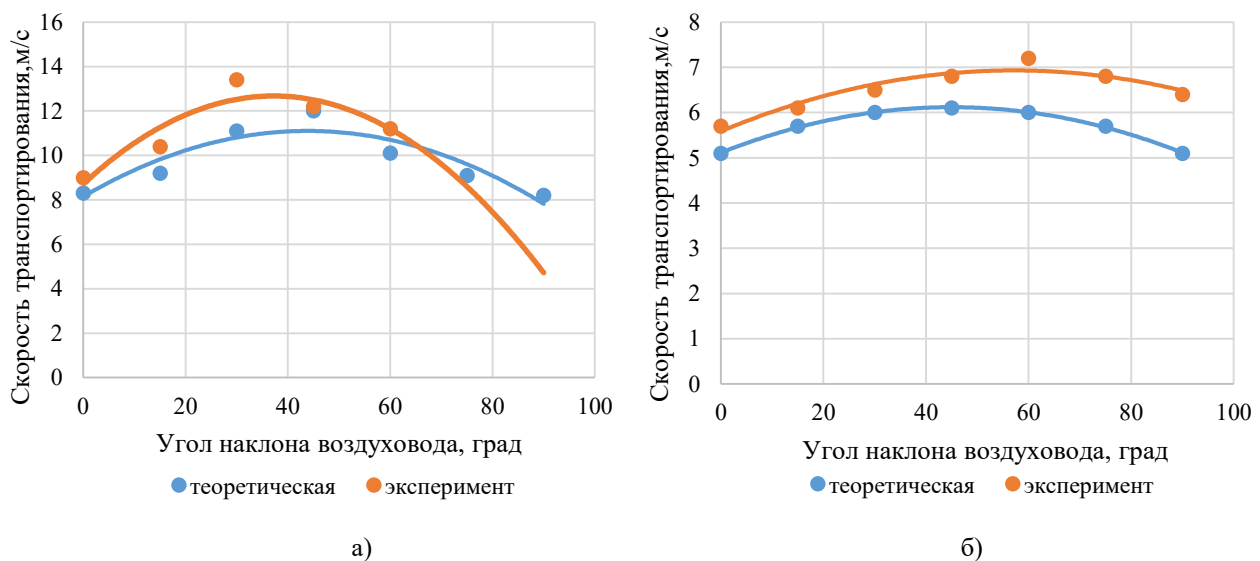


Рис. 4. Сравнение теоретических и экспериментальных данных для частиц: диаметров 5 мм и плотностью 800 кг/м³ (а); диаметром 2,5 мм и плотностью 2200 кг/м³

Выводы.

Подтверждено, что аэродинамический режим систем аспирации и пневмотранспорта существенно зависит от пространственного расположения воздухопроводов систем аспирации и пневмотранспорта, диаметра и плотности твердых частиц.

2. Предложена критериальная зависимость $Fr=f(Re, \mu, \sin \alpha)$ для воздухопроводов, размещенных под различными углами от 0 до 90°, для определения скорости транспортирования, позволившие обобщить результаты исследований при различных диаметрах и плотности с учетом массовой концентрации твердых частиц.

3. Полученные результаты могут стать основой для систематизации многочисленных исследований аэродинамических характеристик аспирационных систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воскресенский В.Е. Системы пневмотранспорта, пылеулавливания и вентиляции на деревообрабатывающих предприятиях. Теория и практика: в 2 т. Т. 1: Аспирационные и транспортные пневмосистемы. СПб.: Политехника, 2008. 430 с.
2. Воскресенский В.Е. Системы пневмотранспорта, пылеулавливания и вентиляции на деревообрабатывающих предприятиях. Теория и практика: в 2 т. Т. 2. Ч. 1 Системы пылеулавливания. СПб.: Политехника, 2009. 309 с.
3. Королева Т.И., Качан О.М., Шереметьев И.В. Энергосберегающие и экологически безопасные рециркуляционные аспирационные системы деревообрабатывающих предприятий // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. 2011. № 8. С. 103–109.
4. Мартянова А.Ю. Совершенствование методов расчета вакуумных систем обеспыливания на предприятиях по производству цемента и сухих строительных смесей. Дис. канд. техн. наук. СПб.: 2017. 192 с.
5. Евдокимов О.А., Михайлов А.С., Веретенников С.В., Серов Р.А. Экспериментальное определение скорости витания коэффициента сопротивления частиц пылевидного торфяного топлива // Химия твердого топлива. 2020. № 5. С. 51–57.
6. Шияев М.И., Хромова Е.М., Богомолов А.Р. Моделирование гидродинамики и тепломассобмена в дисперсных средах. Сер. Научная мысль. 2022. 249 с.
7. Хоперсков А.В., Азаров В.Н., Хоперсков С.А., Коротков Е.А., Жумалиев А.Г. Формирование нестационарных режимов при моделировании аспирационных течений: неустойчивость Кельвина-Гельмгольца // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1, Математика. Физика. 2011. № 1 (14). С. 151–155.
8. Попов Е.Н. Перемещение пылевых частиц в падающем потоке полифракционного материала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 2. С. 34–38. DOI: 10.12737/article_5a816bdb66f2f4.03201657
9. Попов Е.Н. Исследование эжектирующих свойств потока полифракционного сыпучего материала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 3. С. 46–51. DOI: 10.12737/article_5abfc9b98fb328.24921610
10. Маклаков Д.В., Посохин В.Н., Сафиуллин Р.Г. О снижении потерь давления в возмущающих элементах воздухопроводных систем // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 8 (704). С. 80–87.
11. Гольцов А.Б., Логачёв К.И., Аверкова О.А. Моделирование пылевоздушных течений в аспирируемом укрытии // Новые огнеупоры. 2016. № 6. С. 61–66. DOI: 10.17073/1683-4518-2016-6-61-66
12. Гольцов А.Б., Логачёв К.И., Овсянников Ю.Г., Киреев В.М. Численное моделирование воздушных течений в загрузочном желобе аспирационного укрытия с многоступенчатым рециркуляционным воздушным затвором // Новые огнеупоры. 2020. № 12. С. 61–68. DOI: 10.17073/1683-4518-2020-12-61-68
13. Logachev I.N., Popov E.N., Logachev K.I., Averkova O.A. Refining the method for determining the flow rate of air entrained by freely falling polydisperse loose material // Powder Technology. 2020. Vol. 373. Pp. 323–335. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.06.055
14. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Huang Ya., Wang Yi., Averkova O.A., Popov E.N., Gol'tsov A.B., Tiron O.V. Investigating changes in geometric dimensions of vortex zones at the inlet of an exhaust hood set over a plane // Building and Environment. 2022. Vol. 222. 109377. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109377
15. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Huang Y.A., Wang Y.I., Averkova O.A., Popov E.N., Kozlov T.A. Developing a mathematical simulation method for three-dimensional separated airflow at inlet of local exhaust devices // Journal of building engineering. 2023. Vol. 63. 105490. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105490
16. Ziganshin A.M., Logachev K.I., Kareeva J.U. Vortex zones in an exhaust hood in front of an impermeable plane // Magazine of Civil Engineering. 2023. № 7(123). 12307. DOI: 10.34910/MCE.123.7
17. Уляшева В.М., Мартянова А.Ю., Толстик А.В. Численное исследование процесса теп-

ломассообмена при смешивании потоков в аспирационной системе // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6 (71). С. 257–261. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-6-257-261

18. Akhmedova M.A., Kholboyev U. Improving the efficiency of trapping moving dust flow in aspiration networks and dry dust catcher equipment // Texas Journal of engineering and technology. 2022. Vol. 15. Pp. 194–199.

19. Zholmagambetov N.R., Balgabekov T.K., Aidarbek A.O. Zholmagambetov S.R., Kaliyaskarova A.Zh., Narodhan D. Research on the procedure

of dust particles increase in the airtube of industrial aspiration system <https://bulletinofscience.kazatu.edu.kz/index.php/bulletinofscience/article/view/385/352> (дата обращения: 28.05.2024).

20. Zhuang Wu, Chang Su, Hua Xu, Liu Wang. Numerical simulation of dust removal in the cyclone collector of a straw crusher based on a discrete phase model <https://www.techscience.com/fdmp/v19n5/50629/html> (дата обращения: 28.05.2024).

Информация об авторах

Уляшева Вера Михайловна, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: ulyashevavm@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Мартьянова Анна Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: marta@spbgasu.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Аншукова Екатерина Аркадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: anshukovaekaterina@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Поступила 12.06.2024 г.

© Уляшева В.М., Мартьянова А.Ю., Аншукова Е.А., 2024

**Ulyasheva V.M., Martianova A.Yu., Anshukova E.A.
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
E-mail: ulyashevavm@mail.ru

TO CALCULATE THE SPEED OF TRANSPORTATION OF SOLID PARTICLES

Abstract. The aerodynamic mode of aspiration and pneumatic transport systems depends on various factors, primarily on the physical characteristics of the transported solid particles, as well as on the characteristics of technological processes with the release of solid particles of various origins and the design of the systems under consideration. When designing aspiration and pneumatic transport systems for various industries, a set of tasks related to ensuring maximum permissible dust concentrations in industrial premises and in atmospheric air, resource conservation and energy efficiency is usually solved. Enterprises producing building materials are characterized by significant dust emissions. At the same time, solid particles are formed in the processes of crushing, grinding, sorting, and moving raw materials and building materials, which generally have a wide range of sizes – from 0.01 microns to 20mm or more. This creates significant difficulties in the design of hazard receivers, air ducts, and air purification devices. In the practice of design, calculations of aspiration and pneumatic transport systems are carried out according to engineering methods based mainly on the data of experimental studies of 1970-1990, in connection with which there is a significant difference in the results. Almost all engineering methods are based on experimental values of the floating velocity of solid particles. The values of the floating velocity of solid particles identical in physical characteristics differ by more than 30%. As for one of the most important aerodynamic characteristics, the transport velocity, new data for various types of particulate matter are needed to improve the methods of engineering calculations. Given the presence of particulate matter of various sizes in the aerodispersed flows of the systems under consideration, the use of numerical modeling is quite limited. There are results of numerical experiments, mainly for air purification equipment, in particular, cyclones. The paper presents experimental data for determining the transport velocity for solid particles typical for enterprises of the construction industry.

Keywords: aspiration, aerodisperse system, solid particle, floating velocity, transport velocity.

REFERENCES

1. Voskresensky V.E. Systems of pneumatic transport, dust collection and ventilation at wood-working enterprises. Theory and practice [Sistemy pnevmotransporta, pileulavlivaniia i ventilatsii na derevoobrabatyvaiushchikh predpriatiiakh. Teoriia i praktika. Aspiratsionnye i transportnye pnevmosistemy]. In 2 Vols. Vol. 1: Aspiration and transport pneumatic systems. St. Petersburg: Polytechnic, 2008. 430 p. (rus)
2. Voskresensky V.E. Systems of pneumatic transport, dust collection and ventilation at wood-working enterprises. Theory and practice: Dust collection systems [Sistemy pnevmotransporta, pileulavlivaniia i ventilatsii na derevoobrabatyvaiushchikh predpriatiiakh. Teoriia i praktika: Sistemy pileulavlivaniia]. In 2 Vols. Part 1. Vol.2. St. Petersburg: Polytechnic, 2009. 309 p. (rus)
3. Koroleva T.I., Kachan O.M., Sheremetyev I.V. Energy-saving and environmentally safe reciprocating aspiration systems of woodworking enterprises [Energosberegaiushchie i ekologicheski bezopasnye retsirkulatsionnye aspiratsionnye sistemy derevoobrabatyvaiushchikh predpriatii]. Bulletin of the Polotsk State University. Series F. 2011. No. 8. Pp. 103–109. (rus)
4. Martianova A.Yu. Improvement of calculation methods for vacuum dedusting systems at enterprises producing cement and dry building mixes [Sovershenstvovanie metodov rascheta vakuumnykh sistem obespylivaniia na predpriatiiakh po proizvodstvu tsementa i sukhikh stroitel'nykh smesei]. Candidate's thesis. St. Petersburg.: 2017. 192p. (rus)
5. Evdokimov O.A., Mikhailov A.S., Veretenikov S.V., Serov R.A. Experimental determination of the soaring velocity of the particle resistance coefficient pulverized peat fuel [Eksperimental'noe opredelenie skorosti vitaniia koeffitsienta soprotivleniia chastits pilevidnogo torfianogo topliva]. Chemistry of solid fuels. 2020. No. 5. Pp. 51–57. (rus)
6. Shilyaev M.I., Khromova E.M., Bogomolov A.R. Modeling of hydrodynamics and heat and mass transfer in dispersed media [Modelirovanie gidrodinamiki i teplomassobmena v dispersnykh sredakh]. [Seriia Nauchnaia mysl']. 2022. 249 p. (rus)
7. Khoperskov S.A., Azarov V.N., Khoperskov S.A., Korotkov E.A., Zhumaliev A.G. Formation of transient regimes in the simulation of aspiration flows: Kelvin-Helmholtz instability [Formirovanie nestatsionarnykh rezhimov pri modelirovanii aspiratsionnykh techenii: neustoichivost' Kel'vina-Gel'mgol'tsa] Vestn. Volgogr. State University. Ser. 1, Mat. Phys. 2011. No. 1 (14). Pp. 151–155. (rus)
8. Popov E.N. Movement of dust particles in an incident flow of a polyfractive material [Peremeshchenie pylevykh chastits v padaiushchem potoke polifraktsionnogo materiala]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 2. Pp. 34–38. DOI: 10.12737/article_5a816bdb66f2f4.03201657 (rus)
9. Popov E.N. Ejection research: their properties of the flow of a polyfractive bulk material [Issledovanie ezhektiruiushchikh svoistv potoka polifraktsionnogo sypuchego materiala]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 3. Pp. 46–51. DOI: 10.12737/article_5abfc9b98fb328.24921610 (rus)
10. Maklakov D.V., Posokhin V.N., Safiullin R.G. On reducing pressure losses in disturbing elements of air duct systems [O snizhenii poter' davleniia v vozmushchaiushchikh elementakh vozdukhovodnykh sistem] News of higher educational institutions. Construction. 2017. No. 8 (704). Pp. 80–87. (rus)
11. Gol'tsov A.B., Logachev K.I., Averkova O.A. The dust-and-air flows simulation in the ventilated hood [Modelirovanie pylevozdushnykh techenii v aspiriruemom ukrytii]. Novye Ogneupory (New Refractories). 2016. No. 6. Pp. 61–66. DOI: 10.17073/1683-4518-2016-6-61-66
12. Gol'tsov A.B., Logachev K.I., Ovsyannikov Y.G., Kireev V.M. Numerical simulation of air flows in the loading chute of an aspiration shelter with a multistage recirculating air seal [CHislennoe modelirovanie vozdushnykh techenii v zagruzochnom zhelobe aspiratsionnogo ukrytiia s mnogostupenchatym retsirkulatsionnym vozdushnym zatvorom] Novye Ogneupory (New Refractories). 2020. No. 12. Pp. 61–68. DOI: 10.17073/1683-4518-2020-12-61-68
13. Logachev I.N., Popov E.N., Logachev K.I., Averkova O.A. Refining the method for determining the flow rate of air entrained by freely falling poly-disperse loose material. Powder Technology. 2020. Vol. 373. Pp. 323–335. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.06.055
14. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Huang Ya., Wang Yi., Averkova O.A., Popov E.N., Gol'tsov A.B., Tiron O.V. Investigating changes in geometric dimensions of vortex zones at the inlet of an exhaust hood set over a plane. Building and Environment. 2022. Vol. 222. 109377. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109377
15. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Huang Y.A., Wang Y.I., Averkova O.A., Popov E.N., Kozlov T.A. Developing a mathematical simulation method for three-dimensional separated airflow at inlet of local exhaust devices. Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 63. 105490. DOI: 10.1016/j.job.2022.105490

16. Ziganshin A.M., Logachev K.I., Kareeva J.U. Vortex zones in an exhaust hood in front of an impermeable plane. Magazine of Civil Engineering. 2023. No. 7(123). 12307. DOI: 10.34910/MCE.123.7

17. Ulyasheva V.M., Martianova A.Yu., Tolstik A.V. Numerical study of the heat and mass transfer process during mixing of flows in an aspiration system [CHislennoe issledovanie protsessa teplomassoobmena pri smeshivanii potokov v aspiratsionnoi sisteme]. Bulletin of Civil Engineers. 2019. No. 6 (71). Pp. 257–261. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-6-257-261 (rus)

18. Akhmedova M.A., Kholboyev U. Improving the efficiency of trapping moving dust flow in aspiration networks and dry dust catcher equipment.

Texas Journal of engineering and technology. Vol. 15. 2022. Pp. 194–199.

19. Zholmagambetov N.R., Balgabekov T.K., Aidarbek A.O., Zholmagambetov S.R., Kaliyaskarova A.Zh., Narodhan D. Research on the procedure of dust particles increase in the airtube of industrial aspiration system. <https://bulletinofscience.kazatu.edu.kz/index.php/bulletinofscience/article/view/385/352> (date of treatment: 28.05.2024).

20. Zhuang Wu, Chang Su, Hua Xu, Liu Wang. Numerical simulation of dust removal in the cyclone collector of a straw crusher based on a discrete phase model.

<https://www.techscience.com/fdmp/v19n5/50629/html> (date of treatment: 28.05.2024).

Information about the authors

Ulyasheva, Vera M. DSc, Professor. E-mail: ulyashevavm@mail.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, 2-ya Krasnoarmeiskaya st., 4.

Martianova, Anna Ya. PgD. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, 2-ya Krasnoarmeiskaya st., 4.

Anshukova, Ekaterina A. PhD, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, 2-ya Krasnoarmeiskaya st., 4.

Received 12.06.2024

Для цитирования:

Уляшева В.М., Мартянова А.Ю., Аншукова Е.А. К расчету скорости транспортирования твердых частиц // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 10. С. 53–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-53-62

For citation:

Ulyasheva V.M., Martianova A.Yu., Anshukova E.A. To calculate the speed of transportation of solid particles. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 10. Pp. 53–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-53-62

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-63-71

*Леонов Е.С., Трубаев П.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: wunnerr@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ БИОГАЗА НА ТЕПЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ

Аннотация. Продукты сгорания биогаза и природного газа различаются по содержанию компонентов, что оказывает влияние на их теплосодержание и теплообмен в котлах. Для определения возможности использования биогаза в котлах, разработанных для сжигания природного газа, в работе произведено сравнение теплофизических свойств продуктов сгорания природного газа и биогаза и их влияние на результаты расчета котлов. Были получены методы расчета теплопроводности и вязкости смеси газов в зависимости от их состава и температуры. Сравнение показало, что calorimetric и теплофизические свойства продуктов сгорания биогаза отличаются от свойств продуктов сгорания природного газа на величину до 4 %, а отличия от справочных свойств продуктов сгорания, приведенных в нормативном методе расчета котельных агрегатов, составляет в среднем 6 %. Произведено сравнение результатов поверочного тепловой расчета водогрейных котлов малой мощности КВМГ-1,0 и КСВ-1,0 с использованием свойств продуктов сгорания, приведенных в нормативном методе расчета котельных агрегатов, и при их расчете по предложенным уравнениям. Расчеты показали, что результаты расчета по справочным данным нормативного метода приводят к более высоким значениям температур отходящих газов и расходу топлива. Можно заключить, что природный газ в котлах может заменяться биогазом без необходимости реконструкции котла, но для тепловых расчетов необходимо учитывать изменение состава и свойств продуктов сгорания топлива.

Ключевые слова: биогаз, альтернативное топливо, местные газы, природный газ, свойства продуктов сгорания, теплопроводность, вязкость.

1. Введение. Биогаз – это газ, образующийся при анаэробном сбраживании органических веществ. Использование биогаза приводит к уменьшению потребления природного топлива, что имеет как экономическое, так и экологическое значение [1]. Кроме того, парниковый эффект от метана в 25 раз сильнее, чем от углекислого газа, поэтому сбор и сжигание метана, выделяющегося при разложении сельскохозяйственных отходов или на полигонах ТКО, решает задачи борьбы с глобальным потеплением [2]. В мире есть большое количество примеров использования биогаза для локальной выработки тепловой и электрической энергии [3] и создании на его основе распределенных систем энергоснабжения [4] или в системах централизованного теплоснабжения для сельской местности [5]. О влиянии биогаза на конструкцию котлов в исследованиях имеются различные мнения. В работе [6] при экспериментальном исследовании установлено, что основное влияние на процесс горения оказывает высокое содержание в биогазе CO_2 , но для разных смесей биогаза горелочное устройство может использоваться без каких-либо изменений. В работе [7] делается вывод, что наличие CO_2 указывает на необходимость увеличения размеров камеры сгорания. Как правило, биогаз является местным топливом (используется в местах его генерации) [8], поэтому его использование актуально в котлах и электрогенераторах небольшой мощности. Для использования биогаза

рассматривается как проектирование специальных котлов, так и использование существующих, выпускаемых для использования природного газа. В работе [9] предлагается перевод отопительного водогрейного котла на биогазовое топливо путем замены горелочного устройства для подачи большего объема газа. Но кроме замены горелок необходимо учитывать и изменение процессов теплообмена в котлах, что может привести к необходимости изменения их конструкции.

В работе рассматривалось изменение режимов работы котлов при замене природного газа на биогаз. Состав рассматриваемых топлив приведен в табл. 1.

Отличие состава продуктов сгорания природного газа и биогаза заключается в увеличении доли CO_2 в 1,6...1,7 раз (из-за большого содержания CO_2 в биогазе) и из-за этого уменьшении доли остальных газов (табл. 2). Но при расходе топлива, обеспечивающей одинаковое тепловыделение 1 МВт, расход воздуха, подаваемый на горение, и объем продуктов сгорания для природного газа и биогаза практически одинаковы. Тепловой расчет котельных агрегатов включает расчет теплового баланса и теплообмена. Теплосодержание отходящих газов зависит от их расхода и состава (определяющей так же их теплоемкость). В расчёте теплообмена используются коэффициенты теплоотдачи конвекцией от газов к поверхностям теплообмена, которые зависят от вязкости и теплопроводности газов, и

тепловой поток излучением, который зависит от доли трехатомных газов в продуктах сгорания.

Таблица 2

Отличия состава продуктов горения биогаза и природного газа ($\alpha = 1,1$)

Вид топлива	Состав продуктов сгорания при $\alpha = 1,1$				Объемные расходы при нормальных условиях					Теоретическая температура горения, t_r , °C
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	удельные, м ³ /м ³ топлива		м ³ /с (для тепловой мощности котла 1 МВт, при КПД = 87,4%)			
					воздуха	продуктов сгорания	топлива	воздуха	продуктов сгорания	
ПГ	8,7 %	17,4 %	72,1 %	1,7 %	10,44	11,45	0,0320	0,334	0,366	1813
Б57	13,8 %	16,6 %	68,0 %	1,6 %	5,87	6,88	0,0561	0,330	0,386	1713
Б35	14,8 %	15,9 %	67,9 %	1,5 %	3,40	4,40	0,0913	0,310	0,402	1660

Таким образом изменение объемов и состава продуктов сгорания будет влиять на теплообмен в котлах и на теплосодержание газового потока, то есть приведет к изменению режима работы котла. При тепловых расчетах котлов используется нормативный метод [10], в котором коэффициенты конвективной теплоотдачи принимаются по номограммам, составленным с использованием свойств продуктов сгорания природного газа среднего состава. При изменении состава продуктов сгорания предлагается пересчет их свойств (коэффициентов теплопроводности, вязкости и критерия Pr) с использованием коэффициента, зависящего от объемной доли водяных паров. Но согласно табл. 2 объемная доля водяных паров для продуктов сгорания биогаза и природного газа отличается незначительно, основное отличие – в объемной доле CO₂. Поэтому для расчета котлов, работающих на биогазе необходимо исследование, влияет ли изменение свойств продуктов сгорания на режим работы котла и необходимо ли разработка методов расчета этих свойств, или использование данных нормативного метода [10] обеспечит приемлемые для инженерных расчетов результаты.

Для этого в работе были решены следующие задачи:

- разработка методов расчета вязкости и теплопроводности для смеси газов;
- сравнение значений свойств продуктов сгорания различных топлив;
- выполнение поверочного расчета водогрейных котлов и исследование влияния изменения состава продуктов сгорания на тепловой режим;

2. Расчет калориметрических и теплофизических свойств смеси газов.

2.1. Теплоемкость смеси газов (калориметрические свойства).

Теплоемкость смеси газов подчиняется аддитивному правилу. Для расчета средней на интервале температур $0 \dots t$ объемной удельной теплоемкости газов использованы табличные данные свойств работы [12], где данные приведены в более широком диапазоне температур, чем в других источниках, и аппроксимирующее уравнение, включающее полином третьей степени и обратную зависимость:

$$c_p = a_0 + a_1\Theta + a_2\Theta^2 + a_3\Theta^3 + a_4/(\Theta + 0,273)^4, \text{ кДж/кг} \cdot \text{K}, \tag{1}$$

где $\Theta = 0,001t$ – нормированное значение температуры $t, ^\circ\text{C}$; a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 – коэффициенты.

Полученные коэффициенты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты аппроксимирующих уравнений для удельной объемной теплоемкости c_p

Газ	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	SO ₂
Коэффициенты уравнения (1):					
a_0	1,599	1,495	1,306	1,294	1,733
a_1	0,934	0,19	0,217	0,084	0,888
a_2	–0,384	0,058	–0,056	0,0184	–0,509
a_3	0,061	–0,017	0,0066	–0,0062	0,122
a_4	–	–0,003	–	–0,003	–
Коэффициент детерминации r^2	0,9980	0,9947	0,9988	0,9987	0,9991
Средняя абсолютная ошибка (MAPE)	0,218 %	0,37 %	0,336 %	0,321 %	0,208 %
Диапазон температур	0...3000 $^\circ\text{C}$				0...1700 $^\circ\text{C}$

2.2. Вязкость и теплоемкость смеси газов (теплофизические свойства).

Для уточнения теплового расчета котлов, работающих на биогазе, в работе получены уравнения расчета динамической вязкости и теплопроводности смеси газов заданного состава. Был произведен выбор способа расчета свойств смеси, для получения адекватного результата, и поиск и аппроксимация свойств отдельных газов на диапазоне температур до 2500 °С.

Динамическая вязкость смеси газов $\mu_{см}$ определялась по выражению, предложенному в работе [13]:

$$\mu_{см} = \frac{\sum(x_i \mu_i \sqrt{M_i \cdot T_{кр. i}})}{\sum(x_i \sqrt{M_i \cdot T_{кр. i}})}, \quad (2)$$

где i – компонент смеси; M_i – молекулярная масса, кг/моль; x_i – объемная доля; μ_i – динамическая вязкость, Па·с; $T_{кр. i}$ – критическая температура, К.

Теплопроводность смеси газов $\lambda_{см}$ определялась по выражению, предложенному в работе [14], которое на примере двухкомпонентной смеси имеет вид:

$$\lambda_{см} = \frac{\lambda_1}{1 + \sum A_{12} \frac{x_2}{x_1}} + \frac{\lambda_2}{1 + \sum A_{21} \frac{x_1}{x_2}}, \quad (3)$$

где 1, 2 – компоненты смеси; λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности; x_1, x_2 – объемные доли; коэффициенты A_{12}, A_{21} имеют вид:

$$\frac{A}{H}$$

где $d_{1,2}$ – диаметры молекул каждого из компонентов; $m_{1,2}$ – массы молекул каждого из компонентов.

В литературе имеется большое количество табличных данных для расчета вязкости и теплопроводности отдельных газов, но, как правило, они приводятся для диапазона температур до 1000 °С. Методы расчета свойств газа при более высоких температурах приведены для широкого диапазона давлений и основаны на вириальных уравнениях состояния, которые для рассматриваемых задач избыточны. Поэтому был произведен поиск экспериментальных данных свойств газа в диапазонах температур 0...2500 °С, выбраны аппроксимирующие уравнения, обеспечивающие необходимую точность при приемлемой сложности, и произведена оценка их коэффициентов.

Использовано уравнение для расчета кинематической вязкости:

$$\mu = (a_0 + a_1 \Theta + a_2 \Theta^2 + a_3 \Theta^3 + a_4 \Theta^4 + a_5 \Theta^5) 10^{-6}, \text{ Па·с}, \quad (5)$$

где $\Theta = 0,001t$ – нормированное значение температуры t , °С; $a_0, a_1, \dots, a_5$ – коэффициенты (табл. 3).

Таблица 4

Коэффициенты аппроксимирующих уравнений для динамической вязкости μ

Газ	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	SO ₂
Источник данных	[15]	[15, 16]	[15]	[17]	[15]
Коэффициенты уравнения (2):					
a_0	13,33	8,27	19,2	16,6	11,6
a_1	45,5	38,2	58,4	46,86	47,5
a_2	-12,9	9,53	-36,8	-32,08	-42,3
a_3	-2,42	-11,12	16,87	21,75	95,5
a_4	3,32	2,78	-3,22	-8,33	-111,9
a_5	-0,545	-0,213	0,215	1,27	44,8
Коэффициент детерминации r^2	0,9988	0,9991	0,9997	0,9999	0,9999
Средняя абсолютная ошибка (MAPE)	1,83 %	0,524 %	0,874%	0,133 %	0,203 %
Диапазон температур	100...3700°С	100...5700°С	178...5700°С	-73...2200°С	0...1000°С

Для расчета коэффициентов теплопроводности выбрано уравнение:

$$\lambda = \frac{a_0 + a_1 \Theta + a_2 \Theta^2 + a_3 \Theta^3}{1 + b_1 \Theta + b_2 \Theta^2 + b_3 \Theta^3 + b_4 \Theta^4} \cdot 10^{-2}, \text{ Вт/м·К}, \quad (6)$$

где $a_0, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, b_4$ – коэффициенты (табл. 4).

Критерий Прандтля смеси газов может быть

рассчитан по теплопроводности, динамической вязкости и массовой теплоемкости смеси.

На основе выбранных и полученных уравнений создана библиотека расчета теплофизических свойств смеси газов, которая в дальнейшем была использована при поверочном расчете котлов.

Таблица 5

Коэффициенты аппроксимирующих уравнений для теплопроводности λ

Газ	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	SO ₂
Источник данных	[15]	[15, 16]	[15]	[17]	[15]
Коэффициенты уравнения (5):					
a_0	14,5	16,8	24,3	23,7	8,3
a_1	-0,859	-1,5112	-0,7733	0,457	35
a_2	70,12	50,35	51	84,7	-11,2
a_3	0,244	0,8612	0,2009	-0,188	0
b_1	-77,6	-61,384	-53,85	-1,926	-0,556
b_2	-0,018	-0,21675	-0,01652	0,0373	0,114
b_3	24,1	16,897	13,92	0	0
b_4	0	0,020354	0	0	0
Коэффициент детерминации r^2	0,9991	0,9996	0,9998	0,9999	0,9999
Средняя абсолютная ошибка (MAPE)	1,6%	1,09%	1,14%	1,54%	0,296%
Диапазон температур	0...3300°C	100...3300°C	0...2200°C	0...3300°C	0...1000°C

3. Результаты и обсуждение.

продуктов сгорания, рассматриваемых в работе (табл. 1, 2).

3.1. Сравнение свойств продуктов сгорания.
Для сравнения в табл. 6 приведены свойства

Таблица 6

Свойства продуктов сгорания (ПС)

Тем- пера- тура, °C	Справочные данные для ПС природного газа при $\alpha = 1,1$ (ν , λ , Pr – [10]; c_p – [12])	Результаты расчета по полученным уравнениям, при сгорании топлив			Среднее отлчия свойств ПС биогаза от	
		природного газа (ПГ)	биогаза, 57% метана (Б57)	биогаза, 35% ме- тана (Б35)	спра- вочных данных	ПС при- род- ного газа
Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^{-6}$, Па·с						
100	20,8	20,2	19,5	19,4	-6,5 %	-3,8 %
500	73,0	74,6	72,3	71,8	-1,3 %	-3,5 %
1000	167	175	170	168	1,2 %	-3,6 %
1500	300	302	292	289	-3,1 %	-3,7 %
2000	448	447	434	430	-3,5 %	-3,2 %
Коэффициент теплопроводности $\lambda \cdot 10^{-2}$, Вт/м·К						
100	2,69	2,89	2,85	2,85	5,9 %	-1,3 %
500	5,64	5,67	5,64	5,63	0,0 %	-0,6 %
1000	9,37	9,32	9,27	9,22	-1,3 %	-0,8 %
1500	13,2	13,6	13,6	13,5	2,3 %	-0,5 %
2000	17,1	21,1	21,7	21,6	26,6 %	2,6 %
Удельная объемная теплоемкость c_p , кДж/м³·К						
100	1,37	1,389	1,406	1,409	2,7 %	1,3 %
500	1,44	1,485	1,513	1,517	5,2 %	2,0 %
1000	1,53	1,580	1,615	1,621	5,8 %	2,4 %
1500	1,60	1,654	1,692	1,698	6,0 %	2,5 %
2000	1,66	1,711	1,751	1,757	5,7 %	2,5 %
Критерий Прандтля Pr						
100	0,70	0,728	0,711	0,708	1,4 %	-2,5 %
500	0,62	0,707	0,688	0,685	10,7 %	-3,0 %
1000	0,58	0,656	0,638	0,636	9,8%	-2,9%
1500	0,53	0,586	0,568	0,567	7,0%	-3,2%
2000	0,49	0,453	0,428	0,426	-12,9%	-5,7%

Отклонения свойств продуктов горения биогаза

от свойств усредненного состава продуктов горения, используемых в нормативном методе [10], при высоких температурах составляет до 6 %, достигая для теплопроводности 27 % при температуре 2000°C.

Свойства продуктов горения биогаза отличаются от свойств продуктов горения природного газа на 3...4 % для вязкости, до 3 % для теплопроводности и теплоемкости и до 6 % для критерия Прандтля. Так как данные свойства используются для расчета коэффициента конвективного теплообмена в котле, его значения так же могут отличаться на эти величины.

3.2. Сравнение результатов теплового расчета котлов.

Режим работы котла определяется системой

$$V_{\text{т}} Q_{\text{н}}^{\text{р}} - V_{\text{о.г}} c_{\text{о.г}} t_{\text{о.г}}'' - Q_{\text{пот}} = F k \varepsilon \frac{(t_{\text{гор}} - t_{\text{в}}'') - (t_{\text{о.г}}'' - t_{\text{в}}')}{\ln \frac{(t_{\text{гор}} - t_{\text{в}}'')}{(t_{\text{о.г}}'' - t_{\text{в}}')}}, \quad (7)$$

где $G_{\text{в}}$ – расход нагреваемой воды; $V_{\text{т}}$ – расход топлива; $V_{\text{о.г}}$ – выход отходящих газов (продуктов горения); $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – теплота сгорания газа; $c_{\text{в}}$, $c_{\text{о.г}}$ – теплоемкость воды и отходящих газов (соответственно массовая и объёмная); $t_{\text{в}}'$, $t_{\text{в}}''$ – температура воды на входе и выходе котла; $t_{\text{о.г}}''$ – температура отходящих газов после котла; $t_{\text{гор}}$ – температура горения, может быть определена по уравнению $t_{\text{гор}} = V_{\text{с.л}} Q_{\text{н}}^{\text{р}} / (c_{\text{о.г}} V_{\text{о.г}})$; ε – поправочный коэффициент для температурного напора при смешанном теплообмене.

Из уравнения (7) может быть определена одна неизвестная – температура газа на выходе или расход топлива (тепловая мощность котла).

Для исследования влияния свойств продуктов горения различных топлив на результаты теплового расчета был произведен расчет двух водогрейных котлов теплопроизводительностью 1 МВт: жаротрубного котла КСВ-1,0 и водотрубного котла КВГМ-1,0.

Поверочный тепловой расчет котельного агрегата был автоматизирован (выполнен в виде расчетной программы) и выполнялся по нормативному методу [10] и работам [18, 19] и включал расчет следующих зон: для жаротрубного котла – топки, поворотной камеры, дымогарных труб второго и третьего хода; для водотрубного котла – топки и конвективной поверхности. Для каждой зоны температуру газов на выходе определяли из условия равенства количества теплоты, передаваемой от газов к воде, рассчитанной по тепловому балансу и по уравнению теплообмена. Для обеспечения сходимости теплового баланса котельного агрегата использовались два варианта:

а) задавалось значение теплоты, выделяемой при сжигании топлива, температура газов после

из двух уравнений – теплового баланса и теплопередачи, которые определяют, какое количество теплоты, выделившиеся в котле от сгорания топлива может быть передано теплоносителю:

$$\begin{cases} Q = Q_{\text{г}} - Q_{\text{о.г}} - Q_{\text{пот}}; \\ Q = F k \Delta t, \end{cases}$$

где Q – количество передаваемой теплоты в котле от газов к воде (тепловая мощность котла); $Q_{\text{г}}$ – теплота, выделившаяся при сгорании газа; $Q_{\text{о.г}}$ – величина потерь теплоты с отходящими газами; $Q_{\text{пот}}$ – величина потерь теплоты через стенки котла; F – поверхность теплообмена; k – коэффициент теплопередачи; Δt – температурный напор.

Таким образом уравнение, описывающее тепловую работу котла, имеет вид.

котла определялась расчетом ($Q = \text{const}$);

б) задавалось значение температуры отходящих газов, подбирался расход топлива, обеспечивающий эту заданную температуру ($t_{\text{о.г}} = \text{const}$).

Первоначально был произведен расчет базового варианта с топливом – природным газом (ПГ). Затем котлы с топливом – биогазом рассчитывались двумя способами:

«Н» – коэффициенты конвективной теплоотдачи определялись с использованием данных, приведенных в нормативном методе теплового расчета [10], где они приведены для продуктов горения природного газа среднего состава;

«Р» – расчет коэффициентов конвективной теплоотдачи с использованием свойств продуктов сгорания, определяемых по их составу с использованием предложенных в разделе 2 уравнений.

Результаты расчета приведены в табл. 7. Отличие работы котлов на природном газе и биогазе определяется более низкой температурой горения биогаза и уменьшением температурного напора, что требует увеличения расхода топлива.

Если использовать при расчете котлов нормативный метод, то замена природного газа на биогаз приводит к повышению температуры отходящих газов после котлов на величину от 2 до 5°C для жаротрубного котла и на величину от 5 до 9°C для водотрубного котла. Если же свойства продуктов сгорания рассчитывать по их составу, то увеличения температуры газов для жаротрубного котла практически нет, для водотрубного она увеличивается на величину от 1 до 5°C. Различие в необходимом расходе топлива и КПД котла составляет около 0,5 %. Это объясняется разными значениями коэффициента теплопере-

дачи, который зависит от значений коэффициентов теплоотдачи конвекцией, то есть от свойств

продуктов сгорания, и излучением, который зависит от доли трехатомных газов (CO_2 и H_2O) в продуктах сгорания.

Таблица 7

Результаты поверочного теплового расчета котлов (для тепловой мощности 1 МВт)

Топливо	ПГ	Б57		Б35	
Метод расчета	Н	Н	Р	Н	Р
Котел КСВ-1,0					
Часовой расход топлива B , $\text{м}^3/\text{ч}$:	114,8	203,9	202,6	334,5	332,4
Температуры газа t , $^{\circ}\text{C}$:					
на выходе из топки $t_{\text{т}}$	1005	1012	1036	1016	1040
после поворотной камеры $t_{\text{п.к}}$	899	905	917	913	926
после первой конвективной поверхности t_2	364	368	362	374	369
Температура отходящих газов $t_{0,\text{г}}$	185	187	182	190	185
КПД котла η , %	87,4	86,8	87,3	86,2	86,7
Котел КВГМ-1,0					
Расход топлива B , $\text{м}^3/\text{ч}$:	150,0	264,6	263,2	434,4	432,1
Температуры газов на выходе из топки $t_{\text{т}}$, $^{\circ}\text{C}$:	831	855	865	865	874
Температура отходящих газов $t_{0,\text{г}}$	185	190	186	194	190
КПД котла η , %	87,5	86,8	87,2	86,1	86,5

4. Выводы. Полученные результаты показывают, что калориметрические и теплофизические свойства продуктов сгорания биогаза отличаются от свойств продуктов сгорания природного газа на величину до 4%:

- удельная объемная теплоемкость на величину 1,3...2,5 %;
- кинематическая вязкость на величину 3,2...3,8 %;
- коэффициент теплопроводности и критерий Прандтля на величину до 3 %.

Отличия от справочных свойств продуктов сгорания, приведенных в нормативном методе расчета котельных агрегатов, составляет в среднем 6 %.

Это приводит к изменению значений тепло-содержание газового потока коэффициента теплопередачи в котле, то есть влияет на теплообмен в котлах и приведет к изменению режима работы котла.

Значение отклонений показывают, что природный газ в котлах может заменяться биогазом без необходимости реконструкции котла, но для тепловых расчетов необходимо учитывать изменение состава и свойств продуктов сгорания топлива.

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. Sica D., Esposito B., Supino S., Malandrino O., Sessa M.R. Biogas-based systems: An opportunity towards a post-fossil and circular economy perspective in Italy // *Energy Policy*. 2023. Vol. 182. 113719. DOI: 10.1016/j.enpol.2023.113719.
2. Scarlat N., Dallemand J.F., Fahl F. Biogas: Developments and perspectives in Europe // *Renewable Energy*. 2018. Vol. 129. Pp. 457–472. DOI: 10.1016/j.renene.2018.03.006.
3. Abusoglu A., Tozlu A., Anvari-Moghaddam A. District heating and electricity production based on biogas produced from municipal WWTPs in Turkey: A comprehensive case study // *Energy*. 2021. Vol. 223. 119904. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119904.
4. Jabbary A., Noroozian R., Gharehpetian G.B. Optimum utilization of hub energy micro-grids with micro-networking strategy of local biogas productions // *Heliyon*. 2023. Vol. 9(11). e20995. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20995.
5. Chen Y., Guo M., Liu Y., Wang D., Zhuang Z., Quan M. Energy, exergy, and economic analysis of a centralized solar and biogas hybrid heating system for rural areas // *Energy Conversion and Management*. 2023. Vol. 276. 116591. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.116591.
6. Sivri I., Yilmaz H., Cam O., Yilmaz I. Combustion and emission characteristics of premixed biogas mixtures: An experimental study // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47, Iss. 24. Pp. 12377–12392. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.119.

7. Abdulnaim A., Elkholy A., Elmously M., Moneib H., Roberts W.L., Elbaz A.M. On the Stability and Characteristics of Biogas/Methane/Air Flames Fired by a Double Swirl Burner // Flow, Turbulence and Combustion. 2023. Vol. 112. Iss. 3. Pp. 751–767. DOI: 10.1007/s10494-023-00427-0.

8. Kabeyi M.J.B., Olanrewaju O.A. Technologies for biogas to electricity conversion // Energy Reports. 2022. Vol. 8. Pp. 774–786. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.11.007.

9. Jaffrin A., Bentounes N., Joan A.M., Makhlouf S. Landfill Biogas for heating Greenhouses and providing Carbon Dioxide Supplement for Plant Growth // Biosystems Engineering. 2003. Vol. 86, Iss. 1. Pp. 113–123. DOI: 10.1016/S1537-5110(03)00110-7.

10. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / 3-е изд., перераб. и дополн. СПб.: Изд-во НПО КЦТИ, 1998. 256 с.

11. Трубаев П.А., Веревкин О.В. Исследование состава биогаза на полигоне ТКО «Стрелецкое» // Энергетические системы. 2024. № 3. С. 122–145. DOI: 10.34031/es.2023.4.009.

12. Казанцев Е.И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчётов и проектирования. М.: Металлургия, 1964. 452 с.

13. Флореа О., Смигельский О. Расчеты по процессам и аппаратам химической технологии. М.: Химия, 1971. 450 с.

14. Цедерберг Н.В. Теплопроводность газов и жидкостей. М. Л.: Госэнергоиздат, 1963. 408 с.

15. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.

16. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М.: Изд-во МЭИ, 2020. 168 с.

17. Варгафтик Н.Б., Филлипов Л.П., Тарзианов А.А., Тоцкий Е.Е. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.

18. Лумми А.П., Мунц В.А. Расчет жаротрубно-дымогарного котла. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. 31 с.

19. Лумми А.П., Мунц В.А. Расчет водогрейного котла. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. 41 с.

Информация об авторах

Леонов Евгений Сергеевич, аспирант кафедры Энергетики теплотехнологии. E-mail: wunnerr@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Трубаев Павел Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры Энергетики теплотехнологии. E-mail: trubaev@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 26.04.2024 г.

© Леонов Е.С., Трубаев П.А., 2024

***Leonov E.S., Trubaev P.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

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

INFLUENCE OF THERMAL PHYSICAL PROPERTIES OF BIOGAS COMBUSTION PRODUCTS ON THE THERMAL PARAMETERS OF WATER HEATING BOILERS

Abstract. The combustion products of biogas and natural gas differ in the content of components, which affects their heat content and heat exchange in boilers. To determine the possibility of using biogas in boilers designed for burning natural gas, the work compares the thermophysical properties of the combustion products of natural gas and biogas and their influence on the results of boiler calculations. Methods were obtained for calculating the thermal conductivity and viscosity of a mixture of gases depending on their composition and temperature. The comparison showed that the calorimetric and thermophysical properties of biogas combustion products differ from the properties of natural gas combustion products by up to 4 %, and the difference from the reference properties of combustion products given in the standard method for calculating boiler units is on average 6 %. A comparison has been made of the results of verification thermal calculations of low-power hot water boilers KVMG-1.0 and KSV-1.0 using the properties of combustion products given in the standard method for calculating boiler units, and when calculating them using the proposed equations. Calculations have shown that the results of calculations based on reference data of the standard method lead to higher values of exhaust gas temperatures and fuel consumption. It can be concluded that natural gas in boilers

can be replaced by biogas without the need to reconstruct the boiler, but for thermal calculations it is necessary to take into account changes in the composition and properties of fuel combustion products.

Keywords: biogas, alternative fuel, local gases, natural gas, properties of combustion products, thermal conductivity, viscosity.

REFERENCES

1. Sica D., Esposito B., Supino S., Malandrino O., Sessa M.R. Biogas-based systems: An opportunity towards a post-fossil and circular economy perspective in Italy. *Energy Policy*. 2023. Vol. 182. Pp. 113719. DOI: 10.1016/j.enpol.2023.113719.
2. Scarlat N., Dallemand J.F., Fahl F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*. 2018. Vol. 129. Pp. 457–472. DOI: 10.1016/j.renene.2018.03.006.
3. Abusoglu A., Tozlu A., Anvari-Moghadam A. District heating and electricity production based on biogas produced from municipal WWTPs in Turkey: A comprehensive case study. *Energy*. 2021. Vol. 223. 119904. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119904.
4. Jabbary A., Noroozian R., Gharehpetian G.B. Optimum utilization of hub energy micro-grids with micro-networking strategy of local biogas productions. *Heliyon*. 2023. Vol. 9 (11). e20995. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20995.
5. Chen Y., Guo M., Liu Y., Wang D., Zhuang Z., Quan M. Energy, exergy, and economic analysis of a centralized solar and biogas hybrid heating system for rural areas. *Energy Conversion and Management*. 2023. Vol. 276. Pp. 116591. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.116591.
6. Sivri I., Yilmaz H., Cam O., Yilmaz I. Combustion and emission characteristics of premixed biogas mixtures: An experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47 (24). Pp. 12377–12392. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.119.
7. Abdulnaim A., Elkholy A., Elmously M., Moneib H., Roberts W.L., Elbaz A.M. On the Stability and Characteristics of Biogas/Methane/Air Flames Fired by a Double Swirl Burner. *Flow, Turbulence and Combustion*. 2023. Vol. 112 (3). Pp. 751–767. DOI: 10.1007/s10494-023-00427-0.
8. Kabeyi M.J.B., Olanrewaju O.A. Technologies for biogas to electricity conversion. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. Pp. 774–786. DOI: 10.1016/j.egy.2022.11.007.
9. Jaffrin A., Bentounes N., Joan A.M., Makhlouf S. Landfill Biogas for heating Greenhouses and providing Carbon Dioxide Supplement for Plant Growth. *Biosystems Engineering*. 2003. Vol. 86(1). Pp. 113–123. DOI: 10.1016/S1537-5110(03)00110-7.
10. Thermal calculation of boiler units. Normative method 3rd ed., revised. and additional [Teplovoj raschet kotel'nyh agregatov. Normativnyj metod 3-e izd., pererab. i dopoln]. SPb.: NPO KCTI, 1998. 256 p. (rus)
11. Trubaev P.A., Verevkin O.V. Study of the composition of biogas at the Streletskoye MSW landfill [Issledovanie sostava biogaza na poligone TKO «Strelecckoe» / E'nergetiche-skie sistemy']. 2024. No 3. 122–145. DOI: 10.34031/es.2023.4.009. (rus)
12. Kazancev E.I. Industrial furnaces: A reference guide for calculations and design [Promyshlennye pechi: Spravochnoe rukovodstvo dlya raschyotov i proektirovaniya]. M.: Metallurgiya, 1964. 452 p. (rus)
13. Florea O., Smigel'skij O. Calculations for processes and apparatus of chemical technology [Raschety po processam i apparatam himicheskoj tekhnologii]. M.: Himiya, 1971. 450 p. (rus)
14. Cederberg N.V. Thermal conductivity of gases and liquids [Teploprovodnost' gazov i zhidkostej]. M. L.: Gosenergoizdat, 1963. 408 p. (rus)
15. Vargaftik N.B. Handbook on the thermophysical properties of gases and liquids [Spravochnik po teplofizicheskim svojstvam gazov i zhidkostej]. M.: Nauka, 1972. 720 p. (rus)
16. Aleksandrov A.A., Grigor'ev B.A. Tables of thermophysical properties of water and water vapor [Tablicy teplofizicheskikh svojstv vody i vodyanogo para]. M.: MEI, 1999. 168 p. (rus)
17. Vargaftik N.B., Fillipov L.P., Tarzimanov A.A., Tockij E.E. Handbook of thermal conductivity of liquids and gases [Spravochnik po teploprovodnosti zhidkostej i gazov]. M.: Energoatomizdat, 1990. 352 p. (rus)
18. Lummi A.P., Munc V.A. Calculation of a fire-tube-smoke boiler [Raschet zharotrubno-dymogarnogo kotla]. Ekaterinburg: GOU VPO UGTU–UPI, 2009. 31 p. (rus)
19. Lummi A.P., Munc V.A. Calculation of a hot water boiler [Raschet vodogrejnogo kotla]. Ekaterinburg: GOU VPO UGTU–UPI, 2009. 41p. (rus)

Information about the authors

Leonov, Evgeny S. Post graduate student of Department of Energy Engineering of Heat Technologie. E-mail: wunnerr@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Trubaev, Pavel A. Dr. of Tech. Sciences, Professor of Department of Energy Engineering of Heat Technologie. E-mail: trubaev@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 26.04.2024

Для цитирования:

Леонов Е.С., Трубаев П.А. Влияние теплофизических свойств продуктов сгорания биогаза на тепловые параметры водогрейных котлов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 10. С. 63–71. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-63-71

For citation:

Leonov E.S., Trubaev P.A. Influence of thermal physical properties of biogas combustion products on the thermal parameters of water heating boilers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 10. Pp. 63–71. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-63-71

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-72-78

^{1,*}Опарина Л.А., ²Власова Е.А.¹Ивановский государственный политехнический университет²ООО «А-Симетри»

*E-mail: L.A.Oparina@gmail.com

МЕТОДИКА ВЫБОРА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ НА ЭТАПЕ ЗАВЕРШЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЗДАНИЙ

Аннотация. В статье рассмотрены основные аспекты ресурсо- и энергосбережения на этапе завершения жизненного цикла зданий. Показано, что этап завершения жизненного цикла является крайне важным для зданий и других объектов капитального строительства и требующей системного подхода к выбору организационно-технологических решений по ликвидации или строительному переустройству здания. Уточнено понятие завершающего этапа жизненного цикла зданий. Показана важность принятия ресурсосберегающих организационно-технических решений, принимаемых на этапе завершения жизненного цикла зданий. Разработаны показатели для принятия соответствующих организационно-технических решений. Представлена методика выбора организационно-технологических решений на этапе завершения жизненного цикла зданий с учётом ресурсосбережения. Методика включает несколько этапов, итогом прохождения которых является звёздчатая инфографическая модель значений организационно-технологических решений, которая создаётся на этапе завершения жизненного цикла зданий. Методика учитывает показатели ресурсо- и энергозатрат на реализацию различных вариантов организационно-технологических решений. Предложены расчётные формулы для использования в инфографической модели: материалоемкость, затраты труда рабочих, затраты финансов, затраты труда строительных машин и механизмов, энергоёмкость строительного переустройства. Предложенная модель служит для оценки и выбора вариантов целесообразности реорганизации зданий на этапе завершения их жизненного цикла с учётом ресурсо- и энергосбережения.

Ключевые слова: ресурсосбережение, энергосбережение, жизненный цикл здания, строительство, демонтаж, звёздчатая инфографическая модель.

Введение. Строительство – материалоемкая отрасль народного хозяйства. На обеспечение жизненного цикла строительных объектов расходуется колоссальное количество ресурсов (более 30 % всей продукции сферы материального производства): от добычи полезных ископаемых на производство строительных материалов, изделий и конструкций на строительство и эксплуатацию зданий (производство ремонтно-строительных работ), затрат энергетических ресурсов на обеспечение процессов эксплуатации зданий до затрат ресурсов на ликвидацию зданий и утилизацию и рециклинг строительных материалов [1, 2]. Вопросы ресурсо- и энергосбережения на всех стадиях жизненного цикла зданий и сооружений являются предметом исследований многих как отечественных, так и зарубежных учёных. Анализ работ в этой области показал, что ресурсо- и энергосбережение в строительстве осуществляется по следующим направлениям: выбор объёмно-планировочных решений с учётом коэффициента компактности, инсоляции, формы, ориентации по сторонам света; выбор энергосберегающих и экологических материалов, конструкций и изделий с учётом количества будущих замен во время эксплуатации; использование промышлен-

ных отходов и рециклинг материалов после демонтажа зданий; применение местных строительных материалов; планирование всех видов строительных ресурсов с учётом ресурсосбережения (материальных, информационных, энергетических, трудовых и финансовых) и другие [3–5]. Самым длительным и энергозатратным этапом жизненного цикла зданий является этап эксплуатации, особенно его завершающая стадия, когда накоплен и физический, и моральный износ и стоит вопрос о дальнейшем эффективном использовании здания – проведения капитального ремонта, реконструкции, восстановления или демонтажа. Управление жизненным циклом на данном этапе особенно актуально, так как значительная часть ресурсов уже потрачена, необходимо делать разумный выбор между продлением жизни существующего здания или строительством нового. В связи с этим предлагается определять завершающий этап жизненного цикла зданий как временной интервал, на котором интеграция физического износа, функционального устаревания, снижающейся эффективности эксплуатации обуславливает необходимость принятия организационно-технологических решений по целесообразности сноса или строительного

переустройства зданий с учётом показателей ресурсо- и энергоэффективности.

С точки зрения системного подхода, управление ресурсосбережением является частью системы управления всем жизненным циклом объектов капитального строительства. На основе анализа ряда исследований можно утверждать, что управление жизненным циклом объектов капитального строительства (и зданий в том числе) как сложной системой представляет собой целенаправленное упорядоченное взаимодействие элементов, которые взаимосвязаны между собой (подсистем объектов капитального строительства) и внешней среды для достижения цели [6–8]. Целей может быть несколько в зависимости от субъекта управления и функционального назначения объектов капитального строительства, однако в целом можно утверждать, что современный подход к управлению жизненными циклами объектов капитального строительства отвечает целям устойчивого развития – когда при осуществлении градостроительной деятельности обеспечиваются безопасность и благоприятные условия жизнедеятельности человека, ограничивается негативное антропогенное воздействие на окружающую среду и обеспечиваются охрана и рациональное использование природных ресурсов в интересах настоящего и будущего поколений [9].

Материалы и методы. Основными методами, используемыми при управлении жизненным циклом объектов капитального строительства (и зданий в том числе) с позиций ресурсо- и энергосбережения, являются системный подход, методы моделирования (имитационного, экономико-математического, IDEF0), методы построения инфографических моделей, методы анализа стоимости жизненного цикла, динамические методы и другие [10–14]. Большинство исследователей подходят к зданиям как строительным системам. Проходя как система траекторию движения в течение жизненного цикла, на неё воздействуют факторы внешней среды и внутренне (физико-механические процессы), при этом постоянно изменяются параметры объекта, эксплуатационные характеристики, а также экономическая эффективность от его использования. Чем дольше длится этап эксплуатации здания, тем выше его физический износ, и в определённый момент времени (50–60 % износа) наступает завершающий этап – когда затраты на ликвидацию могут превысить стоимость самого здания. На рисунке 1 схематично представлен жизненный цикл объектов капитального строительства с перечнем организационно-технических решений (ОТР) по его дальнейшему функционированию, принимаемые на его завершающем этапе.

Предварительный этап	Предстроительный этап	Этап строительства	Этап эксплуатации		Этап демонтажа и утилизации
– инженерные изыскания; – выбор земельного участка; – общественные слушания; – экологическая экспертиза	– архитектурно – строительное проектирование; – организационно-технологическое проектирование	– проведение строительно-монтажных работ; – проведение пуско-наладочных работ; – ввод объекта в эксплуатацию	– техническое обслуживание; – текущие ремонты; – капитальные ремонты	Завершающий этап жизненного цикла	
				– реставрация; – реконструкция; – реверсация; – реновация; – санация; – рекомпозиция	– демонтаж; – ликвидация; – утилизация или рециклинг строительных материалов, изделий и конструкций

Рис. 1. Этапы жизненного цикла объектов капитального строительства

Таким образом, принятие ОТР с учётом ресурсосбережения становится непростой задачей. Одним из эффективных методов выбора разноаспектных решений является построение инфографических моделей в виде звезды, оси которой представляют собой количественные характеристики параметров моделируемого объекта (в данном случае, это показатели ресурсо- и энергосбережения). При этом оцениваемые разноплановые показатели принимают категории, стремящиеся к нулю или к максимуму. Таким образом возможно построить некоторую область значений, представляющую собой многоугольник. Так как значений параметров множество, то построение

многоугольника позволит их объединить в один интегральный показатель и оценить таким образом, многопараметрическую систему. Построенный по рассчитанным параметрам многоугольник представляет собой интегральную оценку фактических значений (заштрихованный многоугольник Sf). Таких многоугольников может быть неограниченное количество, по набору рассматриваемых вариантов. Построенные таким образом многоугольники сравниваются с некоторым эталонным многоугольником, который является теоретическим и содержит «идеальные» или эталонные значения параметров. Окончательный

выбор осуществляется на основе многоугольника, максимально приближенного к эталонному ($S_э$).

Общий вид звёздчатой инфографической модели представлен на рис. 2.

Исходными допущениями построения звёздчатой инфографической модели выбора ОТР по параметрам ресурс- и энергосбережения на этапе завершения жизненного цикла зданий является

то, что рассматриваются несколько его вариантов: реставрация, строительное переустройство (реконструкция; реверсация; реновация; санация; рекомпозиция), демонтаж. Выбор осуществляется в пользу варианта, при котором достигается экономия материальных, технических, трудовых, финансовых и энергетических ресурсов, определяемых по формулам, представленным на рис. 3.

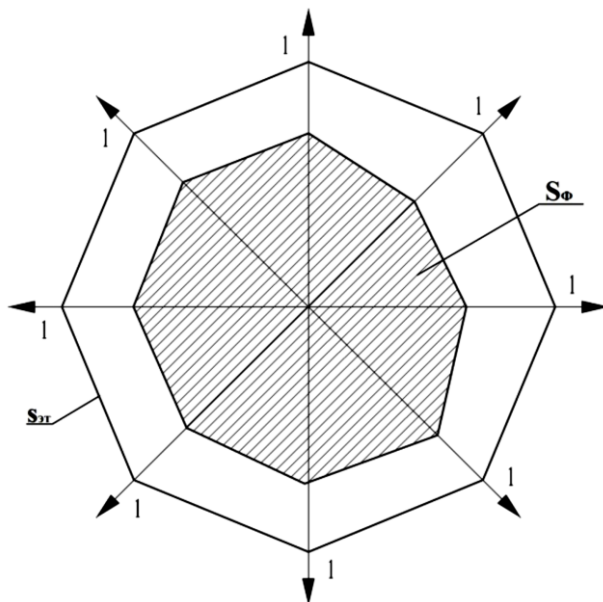


Рис. 2. Инфографическая модель оценки многопараметрической системы [15]

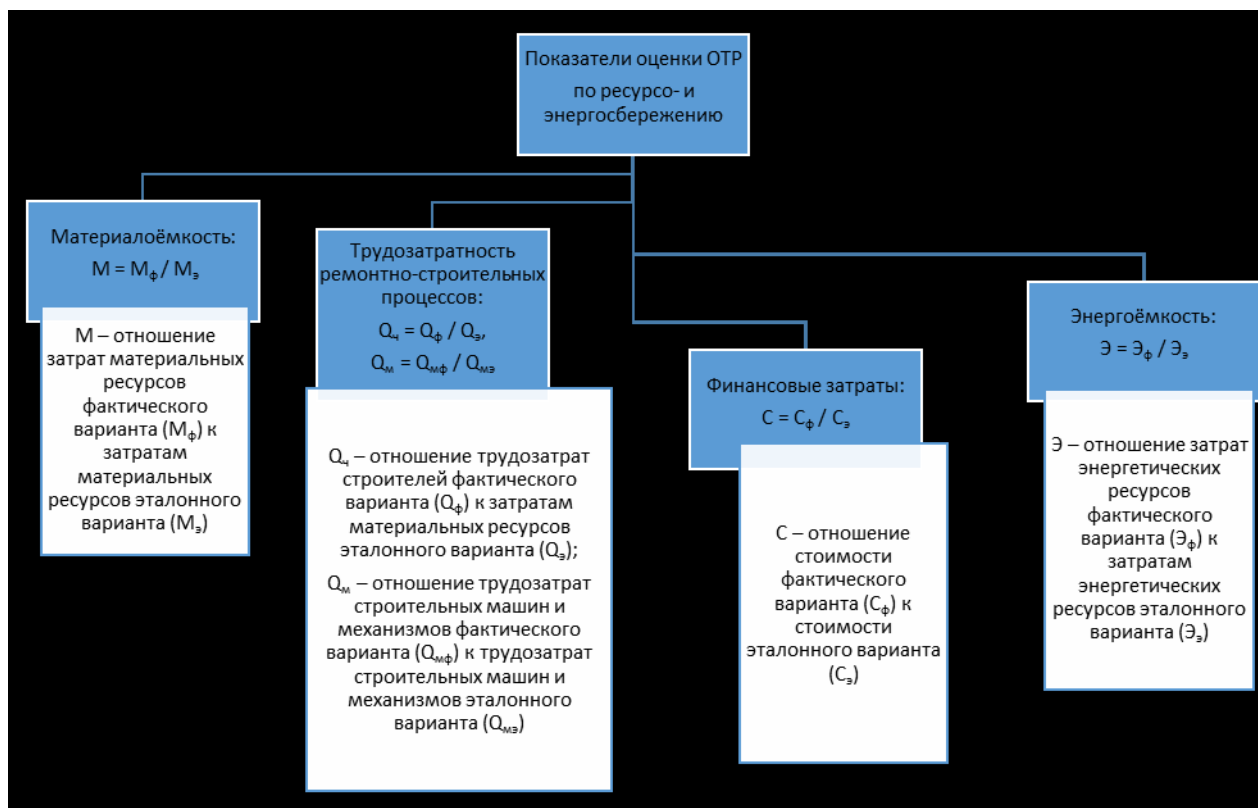


Рис. 3. Параметры и формулы звёздчатой инфографической модели

Основная часть. Для корректной работы модели вначале нужно определить параметры

оценки затрат каждого вида ресурсов, затем определить, какие из них имеют центробежную

тенденцию (стремятся к нулю), а какие центростремительную тенденцию (стремятся к своим максимальным значениям). При этом у параметров, имеющих центростремительную тенденцию, показатели ОТР будут больше единицы. Для того, чтобы определить значения эталонных показателей, необходимо накопить банк данных о затратах ресурсов при различных видах строительного переустройства, реконструкции, демонтажа с последующей утилизацией. При этом могут быть использованы технологии «Big Data».

После оценки затрат ресурсов и расчёта показателей значений ресурсо- и энергоёмкости, по описанной выше методике, строится звёздчатая инфографическая модель (или набор моделей) путём соотношения затрат ресурсов по одному из вариантов (S_{ϕ}) с теоретическими (эталонными) значениями ($S_{\text{эт}}$). Пример модели, построенной по одному из вариантов, представлен на рис. 4.

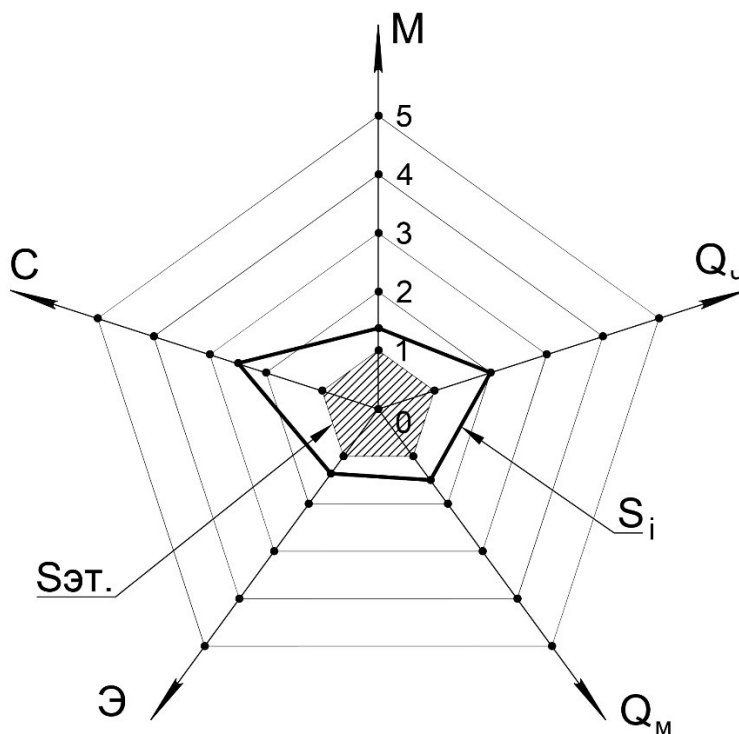


Рис. 4. Звёздчатая инфографическая модель для выбора варианта ОТР с учётом ресурсо- и энергосбережения (пример)

Таким образом, в общем виде предлагаемая методика выбора ОТР с учётом ресурсо- и энергосбережения на этапе завершения жизненного цикла объектов капитального строительства (в том числе зданий) состоит из следующей последовательности действий:

1. Заказчик (собственник здания, девелопер) определяет уровень физического, экономического и морального износа здания, находящегося на завершающем этапе своего жизненного цикла путём инструментального и визуального обследования, оценки стоимости затрат и экономической прибыли от дальнейшего использования в существующем виде, изучает функциональные характеристики здания и необходимость их восстановления и улучшения.

2. Заказчик составляет план производства работ по каждому из возможных вариантов: капитальный ремонт, реконструкцию, реставрацию, демонтаж.

3. В случае принятия решения по демонтажу здания разрабатывается Проект организации работ по сносу или демонтажу с программой по утилизации и рециклингу строительных материалов. При этом применяется дополненная модель взаимодействия базового цикла реорганизации, жизненного цикла здания и цикла его строительного переустройства.

4. В случае принятия решения по строительному переустройству и определения его вида по заданию заказчика архитектором разрабатываются несколько вариантов объёмно-планировочных решений по строительному переустройству здания. При этом используется методика расчёта коэффициента компактности и индекса комплексной технологичности.

5. По каждому из вариантов оцениваются затраты ресурсов (материальных, трудовых, энергетических) и составляются сметные расчеты. По

предложенным формулам (рис. 4) производится расчёт показателей.

6. По каждому из оцениваемых вариантов строятся звёздчатые инфографические модели и выбирается один из вариантов, по которому значения ресурсо- и энергосбережения попадают в рациональный коридор значений.

Выводы. На основе вышеизложенного можно сделать вывод о том, что этап завершения жизненного цикла зданий и других объектов капитального строительства является крайне важным и требующим системного подхода к выбору ОТР по ликвидации или строительному переустройству здания. В настоящее время существует много инновационных видов строительного переустройства зданий, связанных не только с физическим износом, но и с потерей функциональных характеристик и снижением экономической эффективности использования здания. На основе описанной методики возможно построение звёздчатых инфографических моделей по различным вариантам изменения объектов с учётом показателей ресурсосбережения. Авторами предложена усовершенствованная звёздчатая инфографическая модель, содержащая показатели экономии ресурсов по различным вариантам ОТР (строительных материалов, трудовых ресурсов, энергетических ресурсов, стоимостных ресурсов). Для повышения скорости, достоверности и эффективности предлагаемой методики целесообразно использовать технологии «Big Data». Методика может применяться в деятельности различных организаций строительного профиля, служб заказчика, государственных структур, собственников зданий при определении целесообразности принятия ОТР по продлению или завершению жизненного цикла находящихся в собственности зданий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опарина Л.А., Власова Е.А. Аннотация к магистерской работе «Совершенствование методики выбора ресурсосберегающих организационно-технологических решений на стадии завершения жизненного цикла зданий». <http://www.scienceforum.ru/2015/1208/13171> (Дата обращения 03.07.2024).
2. Опарина Л.А., Власова Е.А. Энерго- и ресурсосбережение в строительной науке – анализ понятийного аппарата // Информационная среда вуза (XXI Международная научно-практическая конференция): Сборник статей. Иваново: ИВГПУ, 2014. С. 147–150.
3. Суворова М.О., Наумов А.Е., Строкова В.В. Совершенствование системы управления жизненным циклом комплексной застройки территорий с позиции низкоуглеродного развития //

Строительство и архитектура. 2023. Т. 11. №2. С. 3.

4. Сулейманова Л.А., Обайди А.А.Х. Прогнозирование энергопотребления здания на основе нейронных сетей // Университетская наука. 2023. №2(16). С. 65–67.
5. Голубцов Н.В., Ефремов Л.Г., Исмятуллин Р.Г. Энергетическая эффективность зданий и сооружений в аспекте управления их жизненным циклом // Вестник Чувашского университета. 2013. № 11. С. 247–255.
6. Горбанева Е.П., Косовцева И.А., Кстенин Т.В. Оптимизация экономических результатов внедрения энергосберегающих мероприятий в течение полного жизненного цикла объекта капитального строительства // Real Estate: Economics, Management. 2023. № 4. С. 45–49.
7. Сулейманова Л.А., Обайди А.А. Управление жизненным циклом здания на этапе эксплуатации с использованием моделей искусственных нейронных сетей и машинного обучения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 3. С. 38–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-38-46
8. Сулейманова Л.А., Рябчевский И.С. Системы облачного хранения данных для управления жизненным циклом объектов строительства // Наука и инновации в строительстве. Сборник докладов VII Международной научно-практической конференции, посвященной 170-летию В.Г. Шухова. Белгород, 2023. С. 240–245.
9. Табунщиков Ю.А. Основы формирования экологически устойчивой среды обитания человека // Энергосбережение. 2023. № 3. С. 1–13.
10. Marszal A.J., Heiselberg P., Bourrelle J.S., Musall E., Voss K., Sartori I., Napolitano A. Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. Pp. 971–979.
11. Eleftheriadis S., Mumovic D., Greening P. Life cycle energy efficiency in building structures: A review of current developments and future outlooks based on BIM capabilities // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 67. Pp. 811–825. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.028.
12. Yükses I., Tikansak T. Energy-Efficient Building Design in the Context of Building Life Cycle // Energy Efficient Buildings. 2017. Vol. 1. Pp. 93–123. DOI: 10.5772/66670.
13. Firdaus M., Zublie M., Hasanuzzaman Md., Rahim N. Energy-Saving and Sustainable Building Systems // Sustainability. 2022. 14(3). 1316. DOI: 10.3390/su14031316.
14. Jun H., Chen Y. Energy Saving Research in Building Life Cycle // Applied Mechanics and Materials. 2011. Vol. 71–78. Pp. 3297–3302. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.71-78.3297.

15. Газарян Р.К. Организационное моделирование строительного переустройства предприятий строительной индустрии: автореф. ...канд.

техн. наук: 05.02.22 / Газарян Роберт Камоевич. М.: 2013. 23 с.

Информация об авторах

Опарина Людмила Анатольевна, доктор технических наук, заведующий кафедрой организации производства и городского хозяйства. E-mail: l.a.oparina@gmail.com. Ивановский государственный политехнический университет. Россия, 153000, Иваново, Шереметевский пр-кт, д. 21.

Власова Екатерина Анатольевна, главный инженер проектов. E-mail: vkatru@mail.ru. ООО «А-Симетри». Россия, 153000, Иваново, улица Ташкентская, д. 10.

Поступила 03.07.2024 г.

© Опарина Л.А., Власова Е.А., 2024

¹*Oparina L.A., ²Vlasova E.A.

¹Ivanovo State Polytechnic University

²LLC «A-Simetri»

*E-mail: L.A.Oparina@gmail.com

THE METHODOLOGY OF CHOOSING RESOURCE-SAVING ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS AT THE STAGE OF COMPLETION OF THE LIFE CYCLE OF BUILDINGS

Abstract. The article discusses the main aspects of resource and energy conservation at the stage of completion of the life cycle of buildings. It is shown that the stage of completion of the life cycle is extremely important for buildings and other capital construction projects and requires a systematic approach to the choice of organizational and technological solutions for the liquidation or reconstruction of the building. The concept of the final stage of the life cycle of buildings has been clarified. The importance of making resource-saving organizational and technical decisions taken at the stage of completion of the life cycle of buildings is shown. Indicators have been developed for making appropriate organizational and technical decisions. The methodology of choosing organizational and technological solutions at the stage of completion of the life cycle of buildings, taking into account resource conservation, is presented. The methodology includes several stages, the results of which are a star-shaped infographic model of the values of organizational and technological solutions, which is created at the stage of completion of the life cycle of buildings. The methodology takes into account the indicators of resource and energy consumption for the implementation of various organizational and technological solutions. Calculation formulas for use in the infographic model are proposed: material consumption, labor costs of workers, financial costs labor costs of construction machines and mechanisms energy intensity of construction reconstruction. The proposed model is used to evaluate and select options for the feasibility of reorganizing buildings at the end of their life cycle, taking into account resource and energy conservation.

Keywords: resource conservation, energy conservation, building life cycle, construction, dismantling, star infographic model.

REFERENCES

1. Oparina L.A., Vlasova E.A. Abstract to the master's thesis «Improving the methodology for selecting resource-saving organizational and technological solutions at the stage of completing the life cycle of buildings» [Sovershenstvovaniye metodiki vybora resursosberegayushchikh organizatsionno-tekhnologicheskikh resheniy na stadii zaversheniya zhiznennogo tsikla zdaniy]. <http://www.scienceforum.ru/2015/1208/13171> (Date of access 07/03/2024). (rus)

2. Oparina L.A., Vlasova E.A. Energy and resource saving in construction science - analysis of the conceptual apparatus [Energо- i resursosberezheniye

v stroitel'noy nauke – analiz ponyatiynogo apparata]. Information environment of the university (XXI International Scientific and Practical Conference): Collection of articles. Ivanovo: IVGPU, 2014. Pp. 147–150. (rus)

3. Suvorova M.O., Naumov A.E., Strokova V.V. Improving the life cycle management system for integrated development of territories from the perspective of low-carbon development [Sovershenstvovaniye sistemy upravleniya zhiznennym tsiklom kompleksnoy zastroyki territoriy s pozitsii nizkouglerodnogo razvitiya]. Construction and architecture. 2023. T. 11. No. 2. P. 3. (rus)

4. Suleymanova L.A., Obaidi A.A.Kh. Forecasting the energy consumption of a building based

on neural networks [Prognozirovaniye energopotrebleniya zdaniya na osnove neyronnykh setey]. University Science. 2023. No. 2 (16). Pp. 65–67. (rus)

5. Golubtsov N.V., Efremov L.G., Ismyatullin R.G. Energy efficiency of buildings and structures in the aspect of managing their life cycle [Energeticheskaya effektivnost' zdaniy i sooruzheniy v aspekte upravleniya ikh zhiznennym tsiklom]. Bulletin of the Chuvash University. 2013. No. 11. Pp. 247–255. (rus)

6. Gorbaneva E.P., Kosovtseva I.A., Kstenin T.V. Optimization of economic results of implementing energy-saving measures during the full life cycle of a capital construction project [Optimizatsiya ekonomicheskikh rezul'tatov vnedreniya energosberegayushchikh meropriyatiy v techeniye polnogo zhiznennogo tsikla ob'yekta kapital'nogo stroitel'stva]. Real Estate: Economics, Management. 2023. No. 4. Pp. 45–49. (rus)

7. Suleymanova L.A., Obaidi A.A. Managing the life cycle of a building during the operational phase using artificial neural network models and machine learning [Upravleniye zhiznennym tsiklom zdaniya na etape ekspluatatsii s ispol'zovaniyem modeley iskusstvennykh neyronnykh setey i mashinnogo obucheniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 3. Pp. 38–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-38-46 (rus)

8. Suleymanova L.A., Ryabchevsky I.S. Cloud data storage systems for life cycle management of construction objects [Sistemy oblachnogo khraneniya dannykh dlya upravleniya zhiznennym tsiklom ob'yektov stroitel'stva]. In the collection: Science and innovation in construction. Collection of reports of the VII International Scientific and Practical Conference dedicated to the 170th anniversary of V.G. Shukhova. Belgorod, 2023. Pp. 240–245. (rus)

Information about the authors

Oparina, Lyudmila A. PhD. Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Production Organization and Urban Economy. E-mail: l.a.oparina@gmail.com. Ivanovo State Polytechnic University. Russia, 153000, Ivanovo, Sheremetevsky Prospekt, 21.

Vlasova, Ekaterina A. Chief project engineer. E-mail: vkatru@mail.ru. LLC «A-Simetri». Russia, 153000, Ivanovo, Tashkentskaya street, 10.

Received 03.07.2024

Для цитирования:

Опарина Л.А., Власова Е.А. Методика выбора ресурсосберегающих организационно-технологических решений на этапе завершения жизненного цикла зданий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 10. С. 72–78. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-72-78

For citation:

Oparina L.A., Vlasova E.A. The methodology of choosing resource-saving organizational and technological solutions at the stage of completion of the life cycle of buildings. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No.10. Pp. 78–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-72-78

9. Tabunshchikov Yu.A. Fundamentals of the formation of an environmentally sustainable human environment [Osnovy formirovaniya ekologicheskoy ustoychivoy sredy obitaniya cheloveka]. Energy saving. 2023. No. 3. Pp. 1–13. (rus)

10. Marszal A.J., Heiselberg P., Bourrelle J.S., Musall E., Voss K., Sartori I., Napolitano A. Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. Pp. 971–979.

11. Eleftheriadis S., Mumovic D., Greening P. Life cycle energy efficiency in building structures: A review of current developments and future outlooks based on BIM capabilities. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 67. Pp. 811–825. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.028.

12. Yükses I., Tikansak T. Energy-Efficient Building Design in the Context of Building Life Cycle. Energy Efficient Buildings. 2017. Vol. 1. Pp. 93–123. DOI: 10.5772/66670.

13. Firdaus M., Zublie M., Hasanuzzaman Md., Rahim N. Energy-Saving and Sustainable Building Systems. Sustainability. 2022. Vol. 14(3). 1316. DOI: 10.3390/su14031316.

14. Jun H., Chen Y. Energy Saving Research in Building Life Cycle. Applied Mechanics and Materials. 2011. Vol. 71–78. Pp. 3297–3302. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.71-78.3297.

15. Ghazaryan R.K. Organizational modeling of construction reorganization of enterprises in the construction industry: abstract [Organizacionnoye modelirovaniye stroitel'nogo pereustrojstva predpriyatij stroitel'noj industrii]. ...cand. tech. Sciences: 05.02.22. Ghazaryan Robert Kamoevich. M.: 2013. 23 p.

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-79-89

Петрусенко Ю.В.

Южный Федеральным Университет

E-mail: miss.smiyukha21@yandex.ru

РЕКОНСТРУКЦИЯ «ЗЕЛЕННОГО ТЕАТРА» В Г. РОСТОВЕ-НА-ДОНУ

Аннотация. В данной работе рассматривается история возникновения, сохранившаяся архитектура и реконструкция «Зеленого театра» в городе Ростове-на-Дону. Исследуемый объект является достопримечательностью города и частью объекта культурного наследия федерального значения – Ростовского государственного драматического театра имени М. Горького в Ростове-на-Дону на площади Театральной, находится в структуре парка Октябрьской революции. «Зеленый театр» представляет собой открытую эстраду, площадку театра драмы с лавочками, обращенными в сторону сцены. Свое название театр получил благодаря близкому расположению «зеленых» кронов деревьев парка, создающих словно амфитеатр вокруг зрительских кресел. Площадка театра принимала первые концерты с 1960 г., изначально театр был рассчитан на три тысячи зрителей. Объект построен по проекту архитектора В.Н. Разумовского. Целью исследования является детальное рассмотрение архитектурно-художественных особенностей «Зеленого театра», его «нового» облика, полученного в результате реконструкции и выявление реализованных или нереализованных проектных решений, соответствующих подлинному историческому виду. В ходе исследования были рассмотрены архитектурно-художественные и конструктивные особенности «Зеленого театра». Изучена архитектура первоначального облика рассматриваемого объекта, архитектура, сохранившаяся до реконструкции и полученный результат в наши дни. Рассмотрены проектные решения, в разработке которых автор данного исследования принимал непосредственное участие совместно с проектной организацией «WOWHAUS». Проведен сравнительный анализ исторического облика театра, проектных решений, предусмотренных изначальной концепцией реконструкции «Зеленого театра» в Ростове-на-Дону с полученным результатом. Выявлены реализованные и нереализованные проектные решения. Создано новое прочтение исторического образа во взаимодействии с архитектурным наследием.

Ключевые слова: «зеленый театр», реконструкция, драматический театр, исторический образ, архитектурное наследие

Введение. Данное исследование проведено с целью изучения «Зеленого театра» в городе Ростове-на-Дону. Рассмотрение истории возникновения театра, его сохранившегося архитектурного облика и новое прочтение исторического образа во взаимодействии с архитектурным наследием, выраженное в ходе реализованной реконструкции «Зеленого театра» в 2020 году [1].

Актуальность данной темы обусловлена проблемой сохранения аутентичной исторической архитектуры города Ростова-на-Дону, представляющей особый интерес со стороны историков, ученых и архитекторов, формирующей его неповторимый архитектурный облик. В условиях современной городской среды постоянно происходят изменения, и особенно важным становится изучение и сохранение подлинной информации об исторических обликах зданий. Целью исследования является детальное рассмотрение архитектурно-художественных особенностей «Зеленого театра», его «нового» облика, полученного в результате реконструкции и выявление реализованных или нереализованных проектных решений, соответствующих подлинному историческому виду. В исследовании были сформулированы следующие задачи: собрать и изучить исто-

рические и архитектурные материалы, результаты натурных исследований объекта «Зеленого театра» до реконструкции; рассмотреть проектные решения, в разработке которых автор данного исследования принимал непосредственное участие совместно с проектной организацией «WOWHAUS»; провести сравнительный анализ исторического облика театра, проектных решений, предусмотренных изначальной концепцией реконструкции «Зеленого театра» в Ростове-на-Дону с полученным результатом; выявить реализованные и нереализованные проектные решения. Объектом данного исследования является «Зеленый театр». В ходе проведенного исследования, для более детального изучения темы в контексте существующей архитектурной среды, были рассмотрены работы, раскрывающие исторические события, городскую среду, архитектуру Ростова-на-Дону, таких авторов: Захарьянц Г.Н. [2], Лобжанидзе В.Н., Лаптев Г.Ф. [3], Волошинова Л.Ф. [4], Есаулов Г.В. [6], Черницына В.А. [5], Зимин А.П., Иванова-Ильичева А.М. [7]. В трудах данных исследователей встречаются частичные упоминания о «Зеленом театре», но детального комплексного изучения данного объекта до настоящего исследования проведено не было. Автором выстроена четкая линия изучения

от истории возникновения театра до его реконструкции через призму «нового» прочтения исторического образа «Зеленого театра» во взаимодействии с архитектурным наследием.

«Зеленый театр» – это театр под открытым небом. Такого рода театры были популярны еще в XVIII–XIX века, их тогда называли «воздушные театры» [8]. Театры под открытым небом



Рис. 1. Усадьба Кусково. Воздушный театр (фрагмент) 1989. Открытка из набора «История русского театра» Владимир Семенов. Москва [10]

Парковые театры в то время набирали популярность. В 1830 году по указу императора Николая I в Москве в Нескучном саду открыли «воздушный театр». В репертуар театра специально подбирались постановки, не требующие искусственных дополнительных декораций, и могли быть представлены на природе. Театр просуществовал пять лет, затем его снесли и уже в советские годы построили новый открытый театр и назвали его «зеленым». Позднее в Москве появился второй «Зеленый театр» (рис. 2) – на границе с Останкинским парком одновременно со Всесоюзной сельскохозяйственной выставкой (ВДНХ) [8], данная площадка и в наши дни очень востребована и популярна. Рассмотренные театры являются аналогами «Зеленого театра» в Ростове-на-Дону, построенного позднее в 1960 году.

Методология. При проведении исследования использовался метод натурных исследований объекта, его фотофиксация, изучение исторических и проектных документов. Исследование истории открытых театров, поиск и подбор аналогов, исследование специальной литературы по данной теме, работа с проектом реконструкции театра в архитектурной организации, рассмотрение и анализ проектных решений. Объект изучен методом анализа конструктивных и архитектурно-художественных особенностей. Разработана проектная модель на основе сбора данных проведенного исследования, легшая в основу реализации проекта реконструкции объекта. Проведен сравнительный анализ исторического облика театра, проектных решений, предусмотренных изначальной концепцией реконструкции

были особенно востребованы в годы правления Екатерины II [9], императрица сама увлекалась театральным искусством и в парках своих резиденций, ее примеру следовали многие аристократические семьи. В 1760-х годах в Кускове в подмосковной усадьбе графов Шереметьевых появился один из самых известных театров под открытым небом (рис. 1).



Рис. 2. Зеленый театр. Выставка достижений народного хозяйства (ВДНХ), Москва 2022. Фото Петрусенко Ю.В.

«Зеленого театра» в Ростове-на-Дону с полученным результатом.

Основная часть. Зеленые театры представляют собой сооружение, предназначенное для представлений под открытым небом, «на воздухе». Такого рода театры устраиваются в парках и садах с использованием естественного рельефа местности, а в качестве декораций и стен выступают ограждения из живой изгороди или вьющихся растений на специальных опорах или каркасах. Открытый театр дает возможность многим желающим увидеть представление. Подобные театры распространились в России в богатых русских усадьбах XVIII века, наряду с террасами, гротами, каскадами были характерными мотивами итальянских парков эпохи Высокого Возрождения – «воздушные театры». Они представляли синтез архитектурно-паркового и сценического искусства.

В данной работе проводится исследование «Зелёного театра» в Ростове-на-Дону. Рассматриваемый объект является достопримечательностью города и частью объекта культурного наследия федерального значения. Располагается с тыльной стороны здания Ростовского государственного драматического театра имени М. Горького в Ростове-на-Дону на площади Театральной, 1 (рис. 3). Театр драмы является уникальным памятником архитектуры, мировой шедевр конструктивизма, творение столичных архитекторов Владимира Щуко и Владимира Гельфрейха [11]. Образ театра был представлен своеобразным памятником первой индустриальной пятилетке и уподоблен гигантскому трактору. В 1942 году,

здание было частично разрушено взрывом. К двадцатилетию освобождения Ростова от фашизма, в 1963 году, здание было восстановлено. Решение о создании летней театральной площадки было принято еще в 1957 году, в ходе реконструкции ростовского драматического театра. В процессе реконструкции зрительные залы были



Рис. 3. Ростовский государственный драматический театра М. Горького в Ростове-на-Дону (192–1933), арх. Щуко В., Гельфрейх В. Фото Петрусенко Ю.В. 2021 г.

Газета «Молот» пишет о театре: «Над остроконечными шапками пирамидальных тополей поднимается белоснежный фасад нового здания. Это – новый Зеленый театр. Зрительный зал его рассчитан на 3 тысячи мест. Площадь сцены достигает 300 квадратных метров. Здесь зрители также смогут смотреть широкоэкранные кинофильмы. Установка нескольких десятков динамиков позволит добиться отличного звучания как при эстрадных представлениях, так и при демонстрации кинокартин» [12]. Театр построен по проекту архитектора В.Н. Разумовского, ряд художественных работ выполнен скульпторами Москвы, Ленинграда (ныне Санкт-Петербург) и Ростова [13].

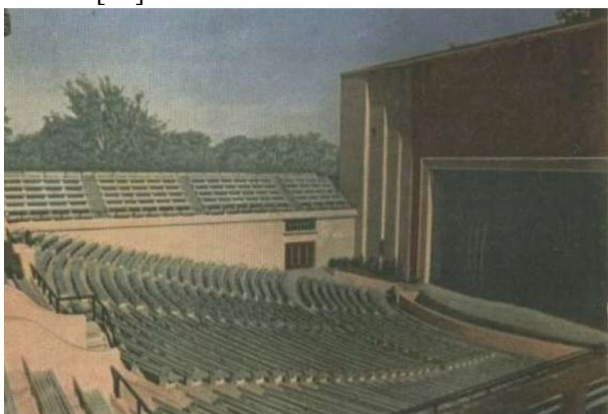


Рис. 5. Зеленый театр. Первоначальный вид, 1961–1963 [14], арх. В.Н. Разумовский

На сцене «Зеленого театра» Ростова-на-Дону в советский период показывали отечественные и зарубежные фильмы, выступали артисты Ростовской филармонии и гастролирующие кон-

уменьшены, поэтому архитектор В.Н. Разумовский предложил проект строительства дополнительной сцены. Так в 1960 году было завершено строительство летнего «Зеленого театра», об этом сообщала газета «Молот» (рис. 4). Свое название концертная площадка получила благодаря большому количеству зеленых насаждений вокруг.



Рис. 4. Газета «Молот». Открытие Зеленого театра

Зелёный театр расположен в структуре парка Октябрьской революции, который является одним из оживленных общественных пространств. Здание зелёного театра не является памятником архитектуры, но имеет блокировку с зданием объекта культурного наследия театром им. Горького. С восточной, северной и западной стороны зелёный театр окружен парковой территорией. Ростовский «Зеленый театр» представляет собой открытую эстраду, площадку театра драмы, с лавочками, которые обращены в сторону сцены. Основной вход и парадный фасад были обращены на север – на центральную аллею парка (рис. 5, рис. 6).

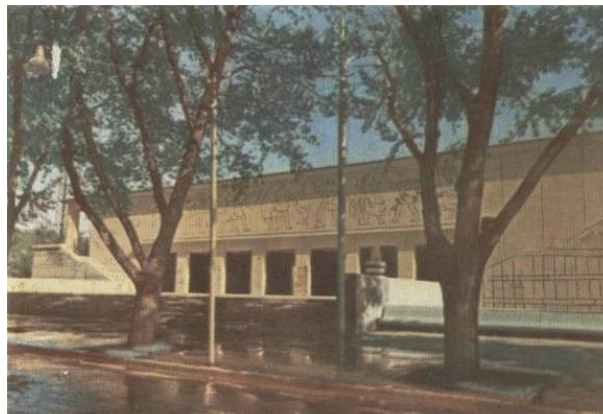


Рис. 6. Вид на главный вход в Зеленый театр, 1965–1967, арх. В.Н. Разумовский [13]

цертно-театральные труппы. В 1990-е годы «Зеленый театр» прекратил свою работу, и как следствие без эксплуатации, начал разрушаться, покрывшись зеленью (рис. 7, рис. 8, рис. 9). Более двадцати лет не находилось возможности для его

восстановления из-за несоответствия государственным документам по охране культурного наследия [15].

На сегодняшний день «Зеленый театр», как и весь парк имени Октябрьской Революции явля-

ются муниципальной собственностью, находящейся в аренде компании «Донской табак» по договору с условием вкладывать средства в ее реконструкцию.



Рис. 7. Зеленый театр, общий вид до реконструкции. Фото Петрусенко Ю.В., 2017 г.



Рис. 8. Зеленый театр, вид на сцену до реконструкции. Фото Петрусенко Ю.В., 2017 г.



Рис. 9. Зеленый театр, вид на сцену с трибунами до реконструкции. Фото Петрусенко Ю.В., 2017 г.

В 2017 году ростовской проектной организацией совместно с московской «WOWHAUS» была разработана проектная документация на реконструкцию «Зеленого театра» в Ростове-на-Дону. Проектом предполагалось восстановление утраченной композиционной целостности в соответствии с параметрами проекта реконструкции 1963 г., преемственность архитектурного образа (рис. 10). Согласно функциональной модели «Зеленый театр» должен стать активной общественной медиа площадкой. В рамках капитального ремонта проектом

предусматривается перепланировка и приспособление здания театра под новые общественные функции, входящие в состав общей сервисной модели парка имени Октябрьской революции. Целевая вместимость зрительного пространства театра составляет более 1000 персон, что дает возможность проведения крупных кино-концертных событий. Концепция приспособления обеспечивает возможность пользования зрительским пространством театра всех групп пользователей независимо от их мобильности.

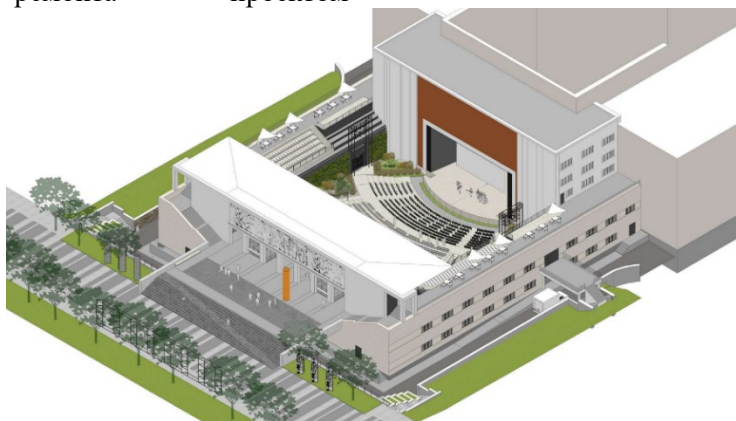


Рис. 10. Проектные решения. Общий вид аксонометрия [1]

Основные решения, разработанные проектом. Первым шагом на пути к решению поставленных задач было восстановление и укрепление сохранившихся элементов здания. Было проведено обследование сохранившихся элементов здания, затем произведен демонтаж недееспособных и аварийных элементов. Определены меры по укреплению существующих конструкций. Произведен капитальный ремонт основных инженерных коммуникаций, вводов и подключений; расчищен и восстановлен уровень двора; возобновлена возможность кругового проезда по периметру здания; укреплены подпорные стены по периметру.

Вторым шагом было восстановление композиционной целостности. Восстановление утраченных элементов здания в соответствии с параметрами исторического образа, а именно: фасад со стороны главной аллеи парка; переход от главной аллеи парка к входной группе Зеленого театра; портал сцены.

Третий шаг – приспособление и перепланировка. Проектом предусмотрена перепланировка флигелей под общественную функцию; устрой-

ство инженерных коммуникаций и оборудования; обеспечение технологии сцены для проведения мероприятий; монтаж новых элементов здания; осуществление условий доступа маломобильных групп населения; обеспечение пожарного проезда и подъездов для обслуживания (рис.11, рис. 12, рис. 13).

Четвертый шаг – монтаж новых элементов. В проекте были разработаны: многоуровневый амфитеатр; терраса и навес VIP балкона с баром. Данный элемент балкона с баром был запроектирован в первоначальной концепции, но позже от него отказались, и он не был реализован. Создана новая конструкция сцены; капитальный ремонт боковых балконов акустическая облицовка внутренних фасадов амфитеатра.

Пятым шагом проектных решений является благоустройство и приспособление прилегающей территории, которыми предусмотрено: озеленение территории; устройство покрытий, освещения; создание благоприятной среды и доступа маломобильных групп населения, а также связка с контекстом архитектурного наследия (рис. 14, рис. 15).

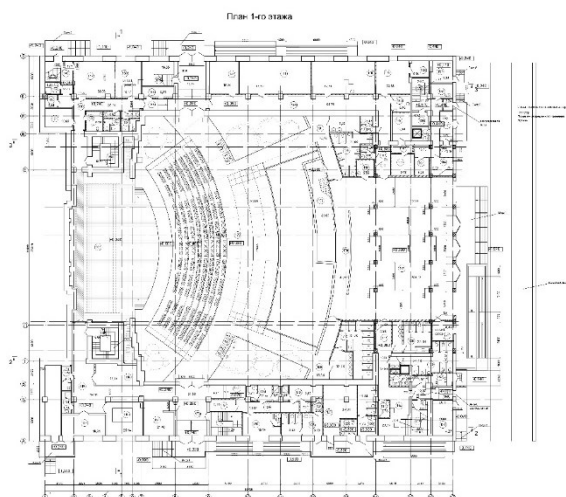


Рис. 11. Зеленый театр, план 1-го этажа.
Чертеж Петрусенко Ю.В., 2018 г.

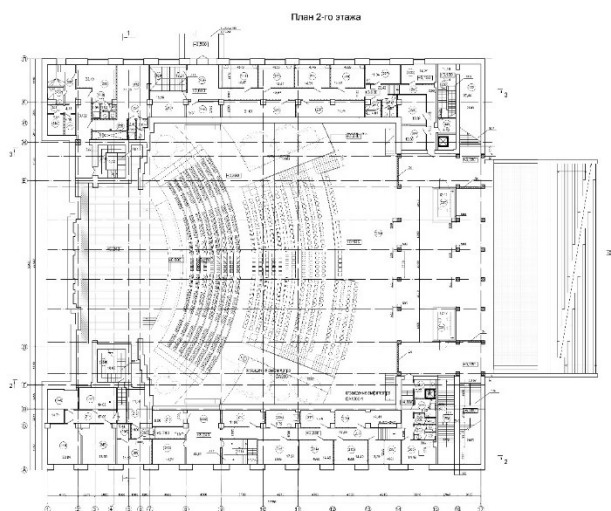


Рис. 12. Зеленый театр, план 2-го этажа.
Чертеж Петрусенко Ю.В., 2018 г.

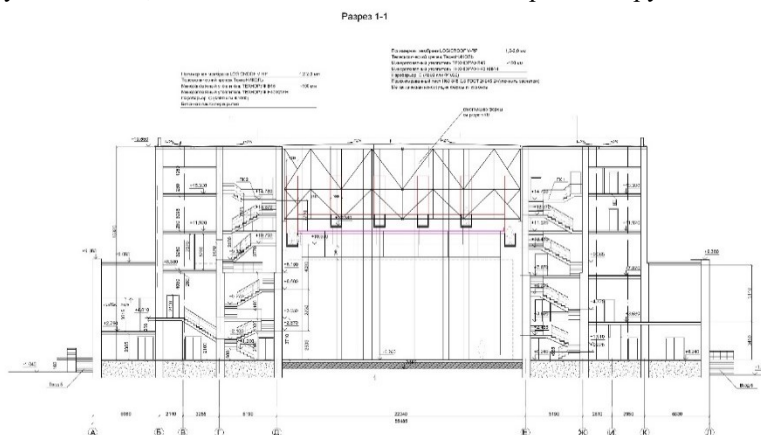


Рис. 13. Зеленый театр, разрез. Чертеж Петрусенко Ю.В., 2018 г.



Рис. 14. Контекст архитектурного наследия. Развертка западного фасада с пр.Театральный [1]

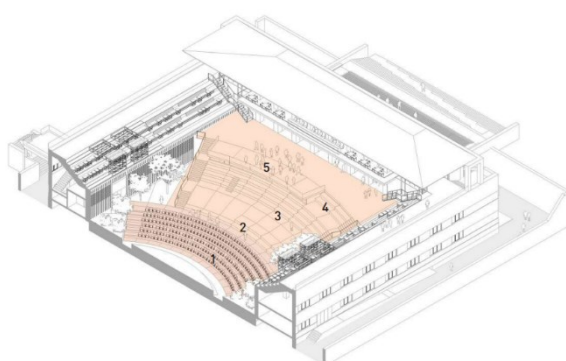
Рис. 15. Контекст архитектурного наследия.
Развертка восточного фасада, обращенного в парк им. М. Горького [1]

Рис. 16. Амфитеатр. Схема расположения [1]

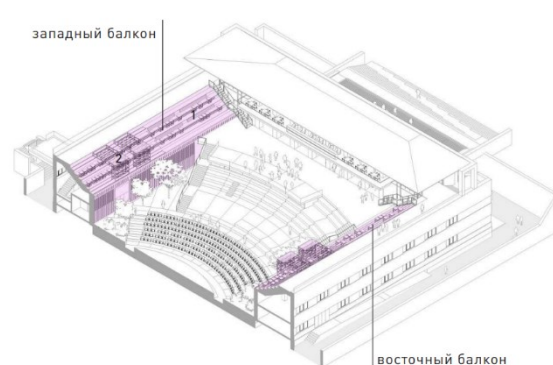


Рис. 17. Зона балконов. Схема расположения [1]

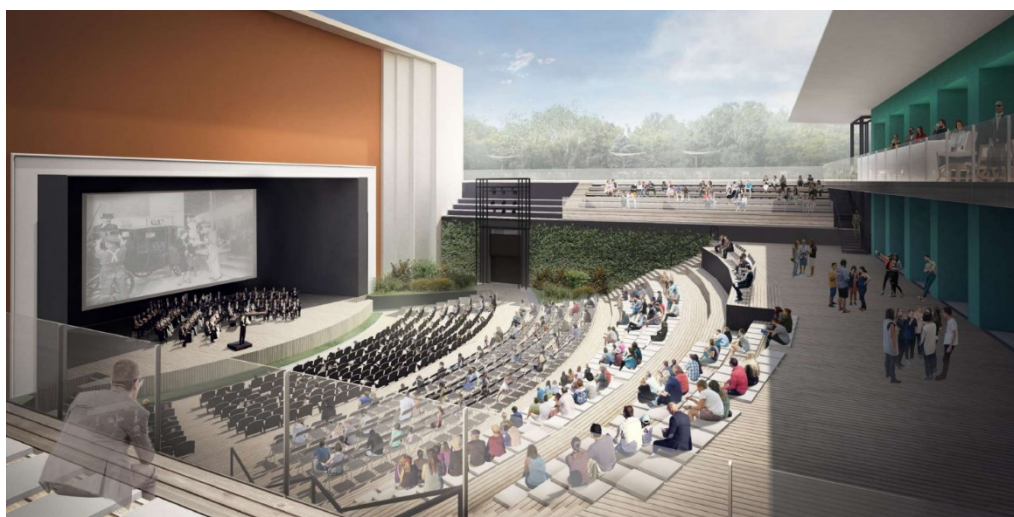


Рис. 18. Вид с восточного балкона на амфитеатр. Проект. 2017 г. [1]

Амфитеатр (рис. 16) построен по принципу ниспадающей плоскости и состоит из четырех функциональных зон: 1. Партер; 2. Трансформируемая часть амфитеатра (столы и складные стулья); ступени ярус 1; ступени ярус 2; балкон – в одном уровне с входной группой. Конфигурация зрительного пространства строится с соблюдением общего восходящего рельефа амфитеатра для обеспечения хорошего обзора для всех зрителей (рис. 18).

Зона балконов разделена на две основные части (рис. 17): первая часть – это зрительские места, специальные места со спинками, а также возможностью установки мобильных столов,

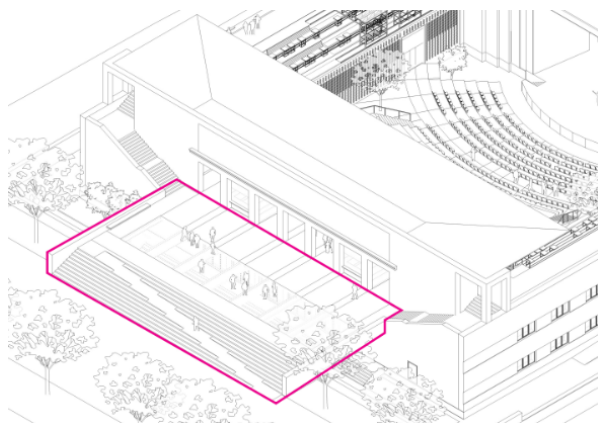


Рис. 19. Схема расположения перехода-моста [1]

Первоначальная концепция проекта предусматривала восстановить переход-мост, связывающий парк и театр. Использование данного пространства (рис. 19) предполагалось не просто как транзитно-накопительной зоны, а как самостоятельного общественного пространства, функционирующего независимо от театра. Проектом были запланированы: входная лестница с интегрируемым пандусом – она была реализована; светопрозрачный фрагмент покрытия моста – не был реализован; места отдыха и ожидания при входной группе.

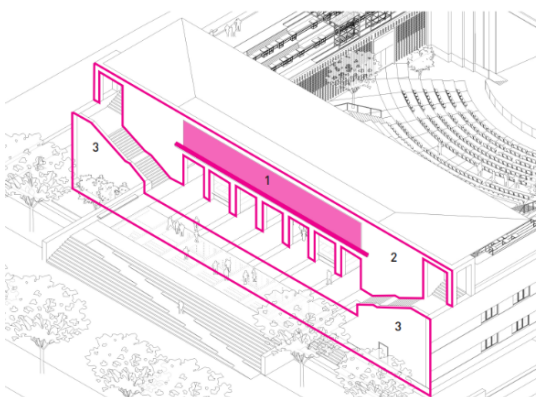


Рис. 21. Схема входной группы [1]

будет зависеть от формата мероприятия; вторая часть – техническая зона, в которой будут размещаться осветительные приборы. Освещение крепится на специальные металлические конструкции, по две на каждом балконе, расположенные на ступенях.

На вертикальных стенах по обоим сторонам зала проектом предполагается применение вертикального озеленения на подсистеме. В данном случае озеленение будет выполнять две задачи – это декорация глухих поверхностей стен и акустическая стена – озеленение выполняет функцию рассеивающей поверхности для звуковых волн.

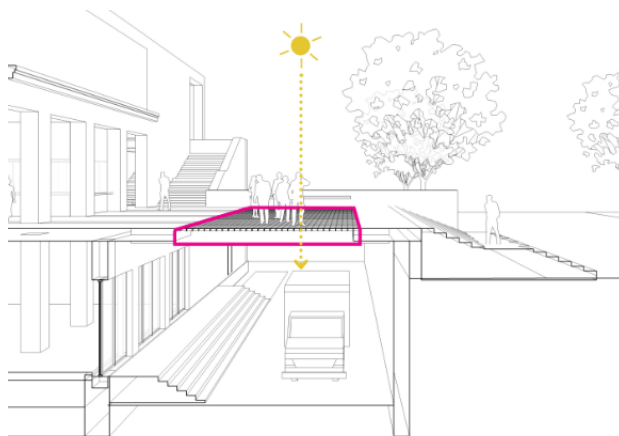


Рис. 20. Схема расположения светопрозрачного фрагмента перекрытия [1]

Светопрозрачный фрагмент перекрытия моста-площади (рис. 20) позволил бы осветить естественным рассеянным светом пространство под мостом, что в целом повышает качество пространства. Функционально освещение пространства под мостом одновременно выполняло бы декоративную функцию для входной площадки. Данное решение не было реализовано, также, как и главный фасад театра в первоначальных параметрах, но в новом прочтении, разработанный в данном проекте (рис. 21, рис. 22, рис. 23).



Рис. 22. Входная группа со стороны Парка Революции

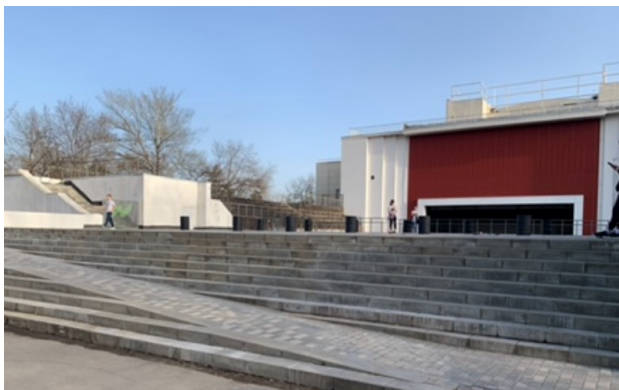


Рис. 23. Зеленый театр. Входная группа со стороны Парка Революции. Фото Петрусенко Ю.В. 2024 г.



Рис. 24. Зеленый театр. Вид с амфитеатра на сцену, 2023 г. Фото Петрусенко Ю.В.

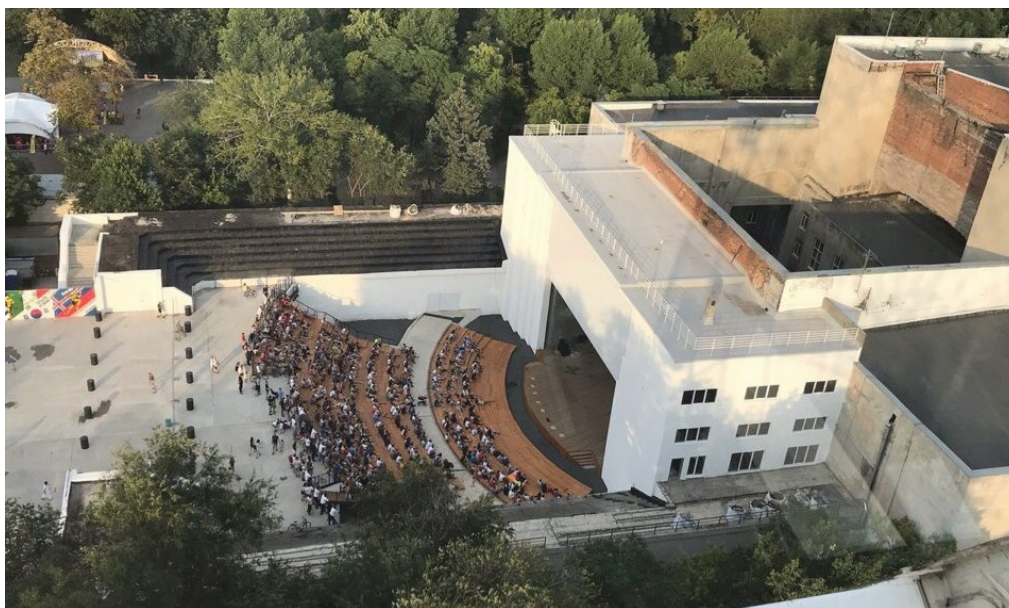


Рис. 25. Вид на Зеленый театр с колеса обозрения. Фото Петрусенко Ю.В., 2024 г.

Анализ после реконструкции. Официально полная реконструкция «Зеленого театра» завершилась в 2018 году (рис. 25). В ходе реконструкции, согласно проекту, было реализовано устройство многоуровневого амфитеатра; новая конструкция сцены; капитальный ремонт боковых балконов; акустическая облицовка внутренних фасадов амфитеатра; устройство инженерных коммуникаций и оборудования; обеспечение технологии сцены для проведения мероприятий; монтаж новых элементов здания; обеспечение доступа МГН; обеспечение грузового пожарного проезда; обеспечение подъездов для обслуживания. Восстановление утраченных элементов здания в соответствии с параметрами исторического образа портала сцены. Сцена приспособлена не только для спектаклей и концертов, но также было смонтировано оборудование для демонстрации фильмов, матчей – над сценой установлен светодиодный экран размером 100 квадратных метров. При устройстве новой сцены и зрительного зала были использованы натуральные

материалы. Деревянные уровни амфитеатра гармонируют с окружающей средой. В дополнение к уже растущим деревьям были высажены кусты вишни и черемухи; живая изгородь из кустов самшита и кизильника вдоль сцены; дикий виноград на боковые бетонные стены. Не реализованным остался утраченный элемент исторического фасада со стороны главной аллеи парка, переход (мост) от главной аллеи парка к входной группе «Зелёного театра», уровни амфитеатра реализованы без возможности трансформации под столы и стулья.

Выводы. В результате исследования объекта «Зеленого театра» в г.Ростове-на-Дону были выявлены следующие результаты:

1. Собраны и изучены исторические и архивные материалы, результаты натурных исследований объекта «Зеленого театра» до реконструкции.

2. Рассмотрены проектные решения, в разработке которых, автор данного исследования принимал непосредственное участие совместно с проектной организацией «WOWHAUS»:

а) Восстановление утраченных элементов здания в соответствии с параметрами исторического образа. Предполагалось восстановить исторический фасад со стороны главной аллеи парка, но в «новом» прочтении; а также переход от главной аллеи парка к входной группе зелёного театра; портал сцены.

б) Перепланировка флигелей под общественную функцию, устройство инженерных коммуникаций и оборудования; обеспечение технологии сцены для проведения мероприятий; монтаж новых элементов здания; обеспечение доступа МГН; обеспечение грузового пожарного проезда; обеспечение подъездов для обслуживания.

в) Устройство многоуровневого амфитеатра; новая конструкция сцены; капитальный ремонт боковых балконов; акустическая облицовка внутренних фасадов амфитеатра.

г) Озеленение территории; устройство покрытий; освещение; обеспечение доступа МГН.

3. Проведен сравнительный анализ исторического облика театра, проектных решений, предусмотренных изначальной концепцией реконструкции «Зеленого театра» в Ростове-на-Дону с полученным результатом; выявлены реализованные и нереализованные проектные решения.

На сегодняшний день «Зеленый театр» является популярной городской площадкой для проведения культурно-развлекательных мероприятий и часть памятника культуры федерального значения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Архитектурное бюро WOWHAUS. Концепция капитального ремонта Зеленого театра г. Ростов-на-Дону. Москва, Ростов-на-Дону, 2017. 60 с.

2. Захарьянц Г.Н. Ростов-на-Дону: к 200-летию со дня основания, 1749-1949. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 1949. 380 с.

3. Лобжанидзе В.Н., Лаптев Г.Ф. Путешествие по старому Ростову. Ростов-на-Дону: Донагрейн, 1997. 186 с.

4. Волошинова Л.Ф. Перекресток столетий. Судьбы улиц, площадей, зодчих. Ростов-на-Дону: Донской издательский дом, 2004. 223 с.

5. Есаулов Г.В., Черницына В.А. Архитектурная летопись Ростова на Дону. Ростов на Дону, 1999 г. 288 с.

6. Есаулов Г.В. Архитектура Юга России: от истории к современности. Очерк. Монография. Москва.: «Архитектура-С», 2016. 568 с., ил.

7. Иванова-Ильичева А.М. Рационалистические тенденции в архитектуре городов Нижнего Дона и Приазовья второй половины XIX - начала XX вв.: на примере Таганрога, Ростова-на-Дону и Нахичевани-на-Дону, Новочеркасска: диссертация кандидата архитектуры: 18.00.01. Москва, 2000. 232 с.

8. Кирилина И. Культура РФ. Театр под открытым небом: Зеленый театр ВДНХ. Режим доступа: URL: <https://www.culture.ru/materials/258196/pod-otkrytym-nebom-zelenyi-teatr-vdnkh?ysclid=lymxvyz4bx194329586> (дата обращения 20.04.2024).

9. Указ Екатерины II о создании театрального комитета, 1783г. Режим доступа: URL: <https://dzen.ru/a/ZKvIJmuR2WXP9JPi?ysclid=lym yklz7n6952811572> (дата обращения 27.01.2024).

10. Усадьба Кусково. Воздушный театр (фрагмент) 1989. Открытка из набора «История русского театра». Владимир Семенов. Москва. Режим доступа: URL: <https://www.culture.ru/materials/258196/pod-otkrytym-nebom-zelenyi-teatr-vdnkh?ysclid=lyfgkikaxf407516047>. (дата обращения 20.04.2024).

11. Охранное обязательство собственника или законного владельца объекта культурного наследия, включенного в единый государственный реестр объектов культурного наследия народов Российской Федерации «Здание Ростовского Государственного драматического театра им. М. Горького» от 16.11.2018 г. № 20/01-02/147. 36 с.

12. Местная хроника // Газета «Молот» 13.08.1960 г.

13. Мордовина О. «О зеленом театре замолвите слово» // Ростовский берег [Электронный ресурс] -Режим доступа: URL: http://www.rostovbereg.ru/publ/rostov_so_vsekh_storon/o_zelenom_teatre_zamolvite_slovo/1-1-0-449 (дата обращения 10.03.2024).

14. Зеленый театр 1961–1963. Фото. Режим доступа: URL: <https://pastvu.com/p/172959> (дата обращения 15.05.2024).

15. Игнатова Е. Ростовский драматический театр им. М. Горького. Часть четвертая. Возрождение // Ростовский берег. Режим доступа: URL: http://www.rostovbereg.ru/publ/rostov_so_vsekh_storon/rostovskij_dramaticheskij_teatr_im_m_gorko_go_chast_chetvertaja_vozrozhdenie/1-1-0-731?ysclid=lygsl6idlc342840580 (дата обращения 05.02.2024).

Информация об авторах

Петрусенко Юлия Викторовна, кандидат архитектуры, доцент кафедры Основ Архитектурно-Художественного Проектирования. E-mail: miss.smiyukha21@yandex.ru. Южный Федеральный Университет. Академия архитектуры и искусств. Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42.

Поступила 16.07.2024 г.

© Петрусенко Ю.В., 2024

Petrusenko Y.V.

Southern Federal University

E-mail: miss.smiyukha21@yandex.ru

RECONSTRUCTION OF THE «GREEN THEATER» IN ROSTOV-ON-DON

Abstract. *This paper examines the history of the origin, preserved architecture and reconstruction of the «Green Theater» in the city of Rostov-on-Don. The object under study is a landmark of the city and part of the cultural heritage site of federal significance – the Rostov State Drama Theater named after M. Gorky in Rostov-on-Don on Teatralnaya Square, located in the structure of the park of the October Revolution. The Green Theater is an open stage, a drama theater site with benches facing the stage. The theater got its name due to the proximity of the «green» crowns of the park's trees, which create an amphitheater around the audience seats. The theater site hosted the first concerts since 1960, initially the theater was designed for three thousand spectators. The facility was built according to the project of architect V.N. Razumovsky. The purpose of the study is a detailed examination of the architectural and artistic features of the «Green Theater», its «new» appearance obtained as a result of reconstruction and identification of realized or unrealized design solutions corresponding to the authentic historical appearance. In the course of the study, the architectural, artistic and design features of the «Green Theater» were considered. The architecture of the original appearance of the object under consideration, the architecture preserved before the reconstruction and the result obtained today are studied. The design solutions are considered, in the development of which the author of this study was directly involved together with the design organization «WOWHAUS». A comparative analysis of the historical appearance of the theater, design solutions provided for by the initial concept of reconstruction of the «Green Theater» in Rostov-on-Don with the result obtained is carried out. Implemented and unrealized design solutions have been identified. A new interpretation of the historical image has been created in interaction with the architectural heritage.*

Keywords: *green theater, reconstruction, drama theater, historical image, architectural heritage.*

REFERENCES

1. WOWHAUS Architectural Bureau. The concept of the overhaul of the Green Theater in the city of Rostov-on-Don. [Konceptiya kapital'nogo remonta Zelenogo teatra g. Rostov-na-Donu. Proektnaya organizaciya] Moscow, Rostov-on-Don, 2017. 60 p. (rus)
2. Zakharyants G.A. Rostov-on-Don Rostov-on-Don: to the 200th anniversary of its foundation, 1749–1949 [Rostov-na-Donu: k 200-letiyu so dnya osnovaniya, 1749-1949] Rostov-on-Don: Rostizdat, 1949. 380 p. (rus)
3. Lobzhanidze V.N., Laptev G.F. Journey through old Rostov [Puteshestvie po staromu]. Rostov-on-Don: Donagrain, 1997. 186 p. (rus)
4. Voloshinova L.F. The Crossroads of Centuries. The fate of streets, squares, architects. [Perekrestok stoletij. Sud'by ulic, ploshchadej, zodchih.] Rostov-on-Don: Don Publishing House, 2004. 223 p. (rus)
5. Yesaulov G.V., Chernitsyna V.A. Architectural Chronicle of Rostov on Don [Arhitekturnaya letopis' Rostova na Donu]. Rostov on Don, 1999. 288 p. (rus)
6. Yesaulov G.V. Architecture of the South of Russia: from history to the present. An essay. [Arhitektura Yuga Rossii: ot istorii k sovremennosti. Ocherk] Monograph. Moscow.: «Architecture-C», 2016. 568 p. (rus)
7. Ivanova-Ilyicheva A.M. Rationalistic trends in the architecture of the cities of the Lower Don and Azov region of the second half of the XIX - early XX centuries: On the example of Taganrog, Rostov-on-Don and Nakhichevan-on-Don, Novocherkassk: dissertation of the Candidate of Architecture: 18.00.01. [Racionalisticheskie tendencii v arhitekture gorodov Nizhnego Dona i Priazov'ya vtoroj poloviny XIX - nachala XX vv.: Na primere Taganroga, Rostova-na-Donu i Nahichevani-na-Donu, Novocherkasska] Moscow, 2000. 232 p. (rus)
8. Kirilina I. Culture of the Russian Federation. Open-air theater: The Green Theater of the VDNH [Kul'tura RF. Teatr pod otkrytym nebom: Zelenyj

teatr VDNH]. URL: <https://www.culture.ru/materials/258196/pod-otkrytym-nebom-zelenyi-teatr-vdnkh?ysclid=lymxvyz4bx194329586> (accessed 04.20.2024) (rus)

9. Decree of Catherine II on the creation of the theater committee. 1783 [Ukaz Ekateriny II o sozdanii teatral'nogo komiteta. 1783g.] URL: <https://dzen.ru/a/ZKvIJmuR2WXP9JPi?ysclid=lymyklz7n6952811572> (accessed 01.27.2024)

10. Kuskovo Manor. Air Theater (fragment) 1989. A postcard from the set «The History of the Russian theater». Vladimir Semenov. Moscow. [Usad'ba Kuskovo. Vozdushnyj teatr (fragment) 1989. Otkrytka iz nabora «Istoriya russkogo teatra». Vladimir Semenov. Moskva]. URL: <https://www.culture.ru/materials/258196/pod-otkrytym-nebom-zelenyi-teatr-vdnkh?ysclid=lyfgkikaxf407516047>. (accessed 04.20.2024) (rus)

11. Security obligation of the owner or legal owner of the cultural heritage object included in the unified State Register of cultural heritage objects of the peoples of the Russian Federation "Building of the Rostov State Drama Theater named after M. Gorky» [Ohrannoe obyazatel'stvo sobstvennika ili zakonnoho vladel'ca ob"ekta kul'turnogo naslediya,

vklyuchennogo v edinyj gosudarstvennyj reestr ob"ektov kul'turnogo naslediya narodov Rossijskoj federacii «Zdanie Rostovskogo Gosudarstvennogo dramaticheskogo teatra im. M. Gor'kogo»] dated 11.16.2018 № 20/01-02/147. 36 p. (rus)

12. Local chronicle [Mestnaya hronika]. Gazeta «Molot». 08.13.1960.

13. Mordovina O. «Put in a word about the green theater» [«O zelenom teatre zamolvite slovo»]. Rostov. URL: http://www.rostovbereg.ru/publ/rostov_so_vsekh_storon/o_zelenom_teatre_zamolvite_slovo/1-1-0-449 (accessed 03.10.2024) (rus)

14. Green Theater. The original view 1961-1963. Photo. [Zelenyj teatr. Pervonachal'nyj vid 1961-1963. Foto]. URL: <https://pastvu.com/p/172959> (accessed 05.15.2024)

15. Ignatova E. Rostov Drama Theater named after M. Gorky. Part four. Vozrozhdenie [Rostovskij dramaticheskij teatr im. M. Gor'kogo. CHast' chetvertaya. Vozrozhdenie]. Rostov coast. URL: http://www.rostovbereg.ru/publ/rostov_so_vsekh_storon/rostovskij_dramaticheskij_teatr_im_m_gorkogo_chast_chetvertaja_vozrozhdenie/1-1-0-731?ysclid=lygsl6idlc342840580 (accessed 02.05.2024) (rus)

Information about the authors

Petrusenko, Yulia V. PhD, Associate Professor of the Department of Fundamentals of Architectural and Artistic Design. E-mail: miss.smiyukha21@yandex.ru. Federal state Autonomous educational institution of higher education «Southern Federal University». Academy of architecture and arts. Russia, 344006, Rostov-on-don, Bolshaya Sadovaya street, 105/42.

Received 16.07.2024

Для цитирования:

Петрусенко Ю.В. Реконструкция «Зеленого театра» в г. Ростове-на-Дону // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 10. С. 79–89. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-79-89

For citation:

Petrusenko Y.V. Reconstruction of the «Green theater» in Rostov-on-Don. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 10. Pp. 79–89. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-79-89

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-90-99

Шульга А.В., *Золотарева М.В.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

*E-mail: goldmile@yandex.ru

ОБЩЕСТВЕННЫЕ ПРОСТРАНСТВА В КОНТЕКСТЕ СОВРЕМЕННЫХ СОЦИАЛЬНО-КУЛЬТУРНЫХ ТЕНДЕНЦИЙ

Аннотация. Исследование направлено на выявление связи между современными социально-культурными тенденциями и формированием общественных пространств. В процессе исследования решаются задачи: рассмотрение вопроса развития общественных пространств в историческом контексте; проведение анализа формирования требований к его организации с течением времени; оценка современных подходов и решений формирования общественных пространств и выявление перспективных тенденций на рубеже XX–XXI веков. Если первые общественные пространства формировались спонтанно в пределах сетки улиц, проложенных в городе, то с течением времени в урбанизированном пространстве были выделены специальные территории – игровые зоны для детей, места общения жителей и т.п. Исследуется влияние современных социально-культурных тенденций на формирование общественных пространств, связь между городским развитием и социокультурным каркасом. В настоящее время в современный социально-культурный каркас входят участки и элементы среды, относящиеся к открытым городским пространствам. К ним относятся территории площадей, свободных от автомобилей; линейные, уличные структуры; ландшафтные составляющие рукотворного или природного свойства; участки придомовых территорий и т.п. Одним из перспективных направлений создания пространств, востребованных социально-культурным контентом, является ревитализация заброшенных территорий и зданий, выключенных из функционально-предметной жизни города – бывших заводских и складских зон. Приводятся удачные решения включения в социокультурный каркас этих территорий. Эти примеры позволяют сделать вывод о необходимости формирования жилой среды, развития и последующего поддержания городских общественных пространств для повышения качества жизни.

Ключевые слова: общественное пространство, социально-культурные тенденции, городская среда, общество, городские пространства, общественная жизнь, публичные территории, социально-культурный каркас.

Введение. Общественные пространства – это территории общего пользования, свободные от транспорта и предназначенные для использования неограниченным кругом лиц в целях досуга и свободного доступа к объектам общественного назначения. Нельзя не согласиться, ведь «общество» является однокоренным слову «общий», что значит общепринятый, доступный для любого человека, простой и понятный в эксплуатации и нуждающийся в постоянном содержании [1]. Такое место межличностного взаимодействия необходимо жителям для отдыха и общения, особенно в период активной социальной деятельности молодёжи и летнего времяпрепровождения.

В своей книге Пабло Сендра и Ричард Сеннет «Проектировать беспорядок» дают такое определение города, в котором необходимы перемены: «Город – физическая сущность, содержащая в себе множество самых разных образов жизни. Жизненный поток течёт через город. Живой и открытый город не возникает сам по себе» [2]. Есть места, в которых импровизированная деятельность и социальное взаимодействие не образуются, потому что слишком ригидная городская среда не допускает импровизации, и в

этих местах необходимо планировать беспорядок [3]. Не имея сформированного ядра социального взаимодействия, не следуя новым трендам, у города нет шансов построить устойчивый культурный каркас и сохранить свою жизнеспособность. Там, где кипит жизнь, всегда будет место динамичному устойчивому развитию и социальной импровизации [4].

Принимая во внимание, приведенное выше определения городской среды, как живого и открытого «организма», в качестве объекта исследования были определены факторы, способствующие формированию устойчивого социально-культурного каркаса городских общественных пространств. Целью исследования данной статьи является выявление связи между современными социально-культурными тенденциями и общественными пространствами города. Цель достигается посредством решения следующих задач: изучение исторического опыта развития общественных пространств; выявление современных тенденций формирования социально-культурного каркаса и определение его влияния на vitalность городской среды; оценка современных

подходов и решений формирования общественных пространств и выявление перспективных тенденций развития.

В качестве методов исследования применялись: изучение библиографических и иконографических источников; историко-средовой анализ существующих общественных пространств; выявление наиболее популярных социально-культурных тенденций, применяемых в настоящее время.

Основная часть. В своей книге «Город в истории» Льюис Мамфорд пишет: «Прежде города была деревушка, и в ней – святилище, прежде деревушки – стоянка, пещера, укрытие, курган, а до

них всех было предрасположение к общественной жизни, которое человек разделяет с множеством других видов» [5].

Каким было первое общественное пространство? Не сложно догадаться, что именно улица стала первым местом для сбора и общения жителей. Первая «городская» улица была построена на острове Кипр в неолитическом поселении Хирокития, существовавшем примерно с 7000 до 3000 гг. до н.э. (рис. 1). Длина улицы составляла 185 метров и в совокупности со строениями создавала единую структуру на вершине горы, что делало этот маленький город целостным организмом. Здесь можно было торговать, гулять, играть и развлекаться, и при этом чувствовать себя комфортно [6].

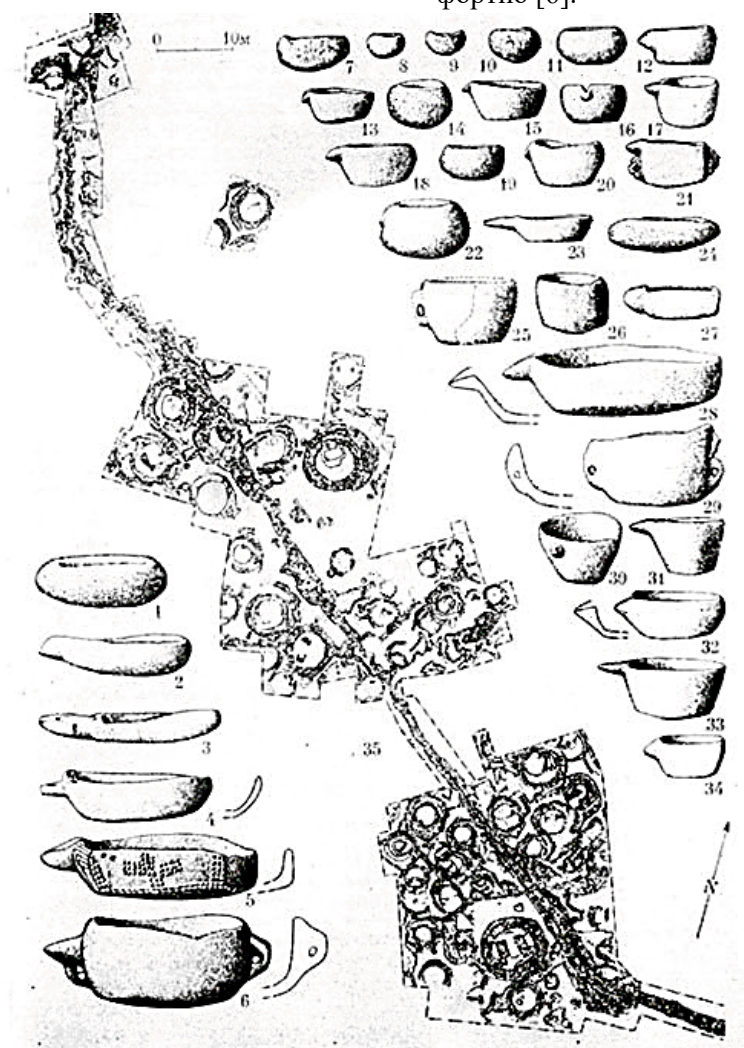


Рис. 1. План деревни Хирокития, Кипр. Источник: [https://prokipr.ru/larnaca_choirokoitia.html]

Улицы – главные артерии города, его позвоночник и главный резерв общественного пространства. Именно поэтому необходимо делать качественные тротуары, с газонами, хорошим покрытием и зонированием [7]. Не имея никаких формальных, иерархичных структур, жители Хирокитии сами и только сами отвечали за строительство и содержание улицы. Они понимали, как она важна для сохранения всего поселения.

Улица Хирокитии свидетельствует об истинном стремлении человека поддерживать и улучшать пространство, в котором обитает. Продуманные организации строительства и сценарии пользования обеспечивают максимально устойчивую среду жизнедеятельности горожан. В создании социально-культурного каркаса города одинаково важную роль играют формальные и неформальные процессы, а для комфортного их

протекания и выполнения заложенных функций необходимо формировать практические общественные пространства.

Самая известная и очень успешная попытка структуризации улиц – «решётка» римских военных лагерей (castra). Кардо и декуманус являются наиболее простой и удобной формой системы, благодаря которой легко и быстро можно отстроить целое поселение и снабдить его необходимыми площадями для учений, сборов и прочих проявлений общественной жизни (рис. 2). Между сражениями лагеря становились центрами притяжения торговли и привлекали местных жителей,

и постепенно из временных структур вырастали постоянные. Со временем, заданная лагерем типология привлекала новых поселенцев и города начинали расти.

Современное градостроительство часто учитывает принципы римской решётки улиц при планировке новых районов или при реконструкции старых. И хотя сейчас проектировщики учитывают множество других факторов при проектировании городов, сеть перпендикулярно-параллельных улиц до сих пор остаётся актуальной для создания функциональных и удобных для жизни городских пространств [8].

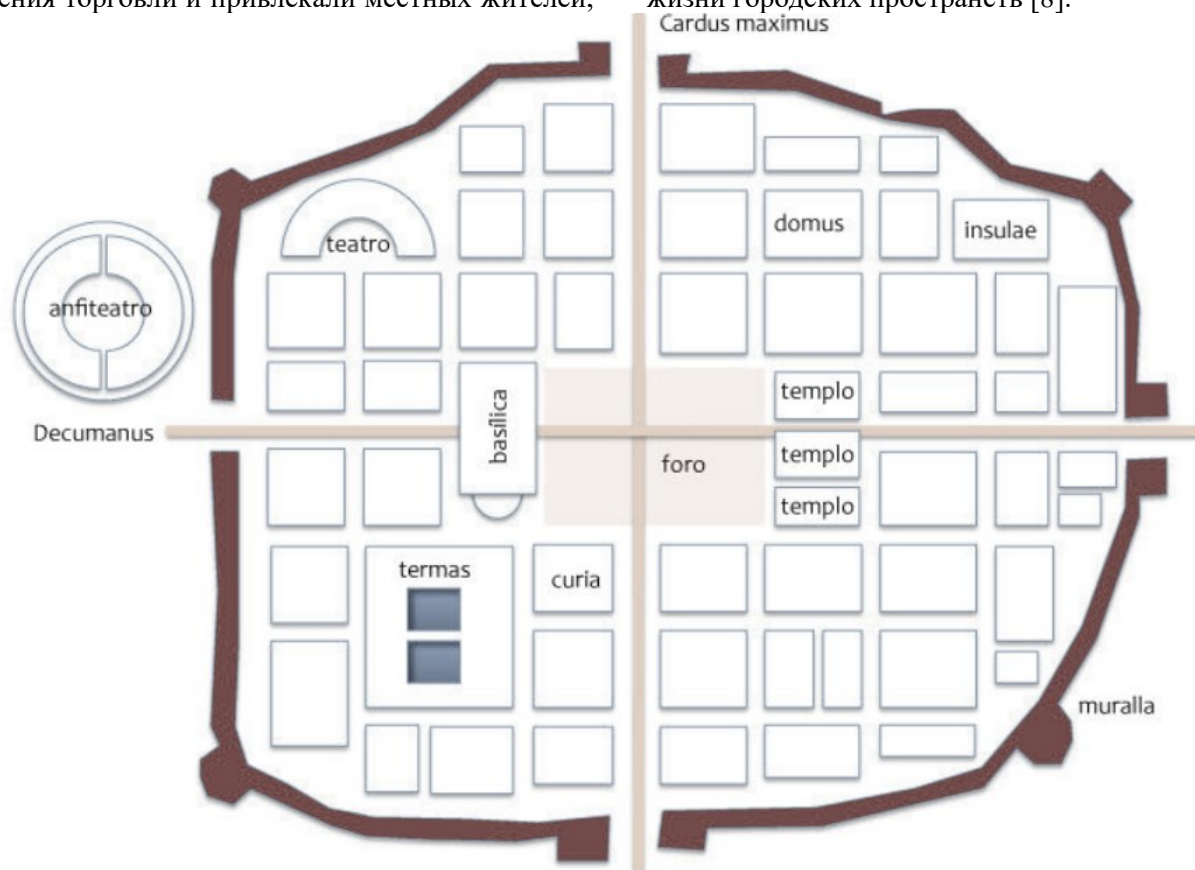


Рис. 2. Типичная планировка древнеримского военного лагеря
Источник: [https://romalesocss.blogspot.com/2016/05/cardus-y-decumanus.html]

Одним из известных направлений в создании общественных зон является создание улиц свободных от машин. Впервые подобный проект адаптации открытых городских пространств был осуществлён в Нью-Йорке и Лондоне. В начале XX века улицы, некогда являющиеся главным местом для времяпрепровождения населения, заполнили автомобили. Из-за недостатка городских парков и стеснённых условий жизни дети стали чаще играть на улицах, что привело к резкому росту детской смертности. Идея игровых улиц – попытка закрыть несколько кварталов для проезда, чтобы дети могли безопасно играть – исходила от полиции [9]. В пилотном проекте

предусматривался запрет на движение автотранспорта в некоторых кварталах в часы после школьных занятий. Дети получали безопасную территорию для игр, а другие кварталы в то же время оставались свободными для проезда (рис. 3).

Временное изменение функций улиц и кварталов оказалось чрезвычайно быстрым и дешёвым способом организовать места для отдыха и детских игр, заодно и восстанавливало общественную жизнь района. Но, несмотря на очевидный успех, к этой идеи создания улиц свободных от автомобилей вернулись только спустя несколько десятилетий.



Рис. 3. Дети играют на улице, Нью-Йорк, 1909 год
[Майк Л., Энтони Г. «Тактический урбанизм», 2019. Издательство «STRELKA PRESS»]

Еще одним направлением, которое стало компромиссом между городской автомобилизацией и созданием комфортной среды для пешеходов стал голландский опыт (рис. 4). Здесь впервые в мире появился термин «*woonerf*», означающий «жилой двор». Реализацией этого направления стало создание улицы, где помимо автомобилей есть место для велосипедистов, пешеходов и

отдыхающих. В данном случае с целью замедления скорости потока автомобилей применяется специальный дизайн, в котором точно размещают столбики, тумбы, деревья и другие малые архитектурные формы. Выполняются участки с изменением покрытия или участки сужения дороги [10].



Рис. 4. Современная реализация «*woonerf*», Нидерланды
[<https://placesjournal.org/article/reconsidering-housing-theorist-john-habraken/?cn-reloaded=1>]

Основополагающие функции для стимуляции общественной жизни – торговля, быстрое питание, безопасность территории, наличие зелени, мест для отдыха и т.п. Хорошее решение для создания временного общественного пространства – создание парклетов (рис. 5). По определению, это компактная благоустроенная территория, являющаяся продолжением тротуара [11]. Это могут быть участки с мобильной зеленой зоной, с размещением кафе-веранды, зонами отдыха, лавочками и т.п. Их характерная особенность – мобильность и приспособляемость к небольшим участкам улицы, а основная функция – превращение тротуара в часть публичной территории, расширить общественную зону улицы.

Места для досуга жителей могут быть разного размера, формы и функциональной направленности:

- автобусная остановка;
- сквер или парк;
- оформление фрагмента улицы;
- офейни и пабы;
- коворкинг;
- шкаф бук-кроссинга;
- клубы по интересам и т.д.

В современный социально-культурный каркас входит целый спектр открытых городских пространств: как площадные, так и точечные;

имеющие выраженную линейную структуру или естественно созданные природные ландшафты, территории перед жилыми комплексами и т.п. К площадным элементам относятся парки, лесопарки и скверы; точечными элементами являются остановки общественного транспорта, кофейня или клуб по интересам. Линейно выраженные элементы – это набережные, улицы. Все эти элементы среды, соединяясь вместе, формируют публично-положительную городскую среду, локальную идентичность места, образуют единый социально-культурный каркас и тем самым развивают связь между городом и его жителями [11].

Форма и размер зачастую являются вторичным фактором, нежели чем функциональная наполненность пространства. Намного важнее контролировать процессы взаимодействия горожан между собой и тканью города. Благоустроенные городские территории способствуют формированию и укреплению сообщества, позволяя жителям города встречаться, общаться, делиться идеями и интересами. Публичные пространства могут стать площадками для выражения разнообразия культур, традиций и идентичностей жителей города [12]. Это помогает укреплять социальные связи и создавать чувство принадлежности к определенному месту.



Рис. 5. Первый парклет. Park(ing) Day, Сан-Франциско, 2005 год.
[Майк Л., Энтони Г. «Тактический урбанизм», 2019. Издательство «STRELKA PRESS»]

Развитие общественных пространств – это *многосторонний подход* к их концептуальному планированию, рабочему проектированию (дизайну) и эксплуатации. Онтогенез городской среды начинается с принципов тактического урбанизма – внедрения небольших мероприятий, реализуемых в короткие сроки и способных дать незамедлительную отдачу. Подобный концептуальный план при положительном отклике людей может быстро преобразоваться в стратегию по внедрению и стать неотъемлемой традицией.

Главная задача общественного пространства в том, чтобы обеспечить непринужденное общение индивидов и групп горожан, выступать в качестве ключевой точки неформальной публичной жизни, а также сделать возможной коммуникацию между администрацией и населением. Коллективные территории должны отвечать социальным потребностям в безопасном общении и использовании места, быть удобным в эксплуатации и доступным, сочетать в себе множество функций для формирования качественной городской среды.

К архитектурным особенностям такого пространства, полностью отвечающего современным тенденциям, можно отнести следующие характеристики:

- приоритет функциональности;
- способность к трансформации;
- отсутствие ограничений и дискриминаций;
- фокус на создании центра притяжения;
- возможность самопрезентации;
- динамичное развитие;
- доступность.

Например, центральные площади советских городов описываются как «хорошо подходящие для военных парадов и различных демонстраций, однако отчуждённые и безжизненные с точки зрения межличностного взаимодействия. Неконтролируемые собрания людей в центральных открытых пространствах были нежелательны, и повседневные взаимодействия городских жителей были загнаны в приватную сферу или в пустые, ничейные места: кухни, гаражи, задние дворы и пустыри, формируя именно в этих зонах жизнь, альтернативную той, что была навязана государством». Публичное пространство должно отвечать потребностям жителей, быть как бы «нейтральной территорией» или «организационным пунктом» [13], служить местом для досуга и коммуникации, а не множить криминальных личностей и вселять страх.

Современные города больше сконцентрированы на создании собственного бренда, уникального социокультурного ядра, основанного на взаимодействии исторической архитектурной среды

и разнородных групп и индивидов общества. Городское пространство конструируется человеком и представляет собой своего рода его физическое и ментальное выражение. Современное общественное пространство должно отражать специфику и самобытность образа жизни местного населения, отвечать стремительно изменяющимся трендам.

Развитие технологий оказывает значительное влияние на восприятие и использование публичных мест. Люди всё больше времени проводят в виртуальном мире. Становится сложнее внедрять концепции, которые бы отвечала запросам подрастающего поколения, тем самым социокультурные тенденции формируют потребности в разнообразных общественных мероприятиях и культурных инициативах. Например, возрастающий интерес к разнообразным культурам и искусству может способствовать культивированию мероприятий, таких как фестивали, выставки и концерты. Сейчас, стремление к устойчивому развитию и экологической осознанности стимулирует создание экологически чистых и зеленых общественных пространств [14].

Современные социально-культурные тенденции направлены на создание устойчивого культурного каркаса на уже сформированной территории. На окраинах города всё чаще делают большие парки для отдыха и индивидуального досуга, в то время как главной точкой притяжения и центром городской жизни становится более компактное пространство. Это обусловлено тем, что большинство городов не имело в своей первоначальной структуре заложенного вектора развития и последующего поддержания социокультурного каркаса, поэтому сейчас власти стремятся компенсировать этот недостаток прошлого внедрением новых проектов.

В современном мире мы можем найти отличные примеры преобразования различных городских территорий в самостоятельную, жизнеспособную среду. К ним относятся результаты процессов ревитализации среды. Зброшенны заводы, в своё время прекратившие деятельность, представляют собой огромное пустующее индустриальное пространство, напоминая об ушедшей эпохе. На протяжении сотни лет набережная Чикаго была ригидной средой, не предназначенной для коллективного времяпрепровождения.

На сегодняшний день Chicago Riverwalk представляет собой оживлённую многокилометровую набережную, поделённую на 6 концептуальных зон. Благодаря новым связям, которые обогатят и разнообразят жизнь вдоль реки, каждый квартал приобретает форму и программу, соответствующую той или иной речной типологии (рис. 6). Различные программы и формы каждого

типологического пространства позволяют разнообразить впечатления от пребывания на реке - от

ресторанов до обширных программ общественных мероприятий и новых удобств для судов, управляемых человеком.

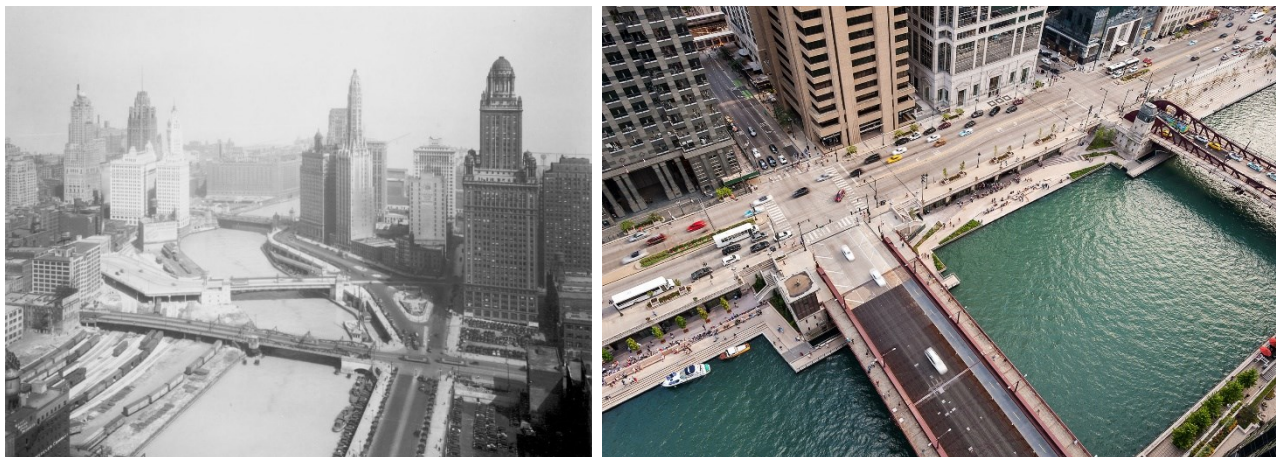


Рис. 6. Набережная Чикаго до и после реконструкции.
Источник: [<https://www.sasaki.com/projects/chicago-riverwalk/>]

Создание городских пространств через процесс ревитализации является важным аспектом развития современных городов. Освоение открытых, свободных пространств позволяет развернуть целое поле экспериментов и распланировать максимально функциональную и актуальную современную среду, учитывающую потребности и предпочтения населения [15]. Модернизация, перепрофилирование и переоборудование старых промышленных территорий может поспособствовать развитию культурной жизни, стимулировать экономическое развитие города, привлекая новые инвестиции и рабочие места, привести к повышению уровня жизни. Устойчивые социально-культурные связи и обеспеченность населения объектами социальной инфраструктуры – показатель качества жизни.

Фудтраки, кроме обслуживания базовых потребностей, выполняют ещё одну не менее важную функцию – они пробуждают социальную активность и собирают людей вместе, таким образом вдыхая жизнь в опустевшие городские пространства. Мороженое, ход-доги, фастфуд, кофе, закусочная – повозки с едой скорее выступают в качестве двигателя экономического развития, нежели модели городского планирования. В общественном пространстве, где не хватает инфраструктуры, торговля может внести ту самую искру, объединяющую пользователей городской среды. Так неиспользуемый пустырь у Манхэттенского моста в Бруклине с 2013 года с привлечением сюда фудтраков стал оживленным местом. Об этом написали Майк Л., Энтони Г в своей книге «Тактический урбаниззм».

Нью-Йорк до сих пор следует традиции игровых улиц. Уже на протяжении 10 лет администрация перекрывает улицы и кварталы ради пешеходов и велосипедистов.

Ещё одним современным трендом образования социокультурных структур является сохранение архитектурного наследия. Например, в Италии власти реализуют программу, призванную сохранить старинные здания. Проект предполагает продать старинное здание за один евро, после чего купивший его на свои деньги реставрирует любым способом в течение трёх лет. Цель такой акции – остановить отток населения, способствовать экономическому развитию населённых пунктов и восстановить эстетичный облик исторических поселений.

Заключение. Приведенные выше результаты исследования показали, что на протяжении всего времени своего существования человечество стремилось к улучшению пространства вокруг себя, к созданию прочных социальных связей и культурному досугу. Цель создать устойчивый и удобный каркас общественных пространств красной нитью проходит через все эпохи и находит наибольший толчок к развитию в современности.

В настоящем времени вышеописанные в статье принципы помогают создавать городские пространства, которые являются не только функциональными и удобными, но и способствуют социокультурному разнообразию, экологической устойчивости и качеству жизни жителей города. Городские пространства должны способствовать социальному взаимодействию между жителями и поощрять формирование сообщества. Нельзя забывать, что безопасность также является важным аспектом при проектировании среды. Современные общественные пространства все чаще проектируются с учетом гибкости и возможности быстрой адаптации под различные потребности и события.

В будущем многие из них могут легко изменять свое функциональное назначение в зависимости от ситуации. В планировочную структуру городов, как новых, так и старых будут вводить новые проекты по освоению и развития территорий, думая о будущем социокультурной среды для новых поколений. Направленность общественных пространств будет определяться не только законодательными требованиями, но и социально-экономическими и социокультурными условиями, потому что, в первую очередь, необходимо учитывать интересы людей, как главных пользователей городских пространств. Всё это несёт определённую смысловую ценность, позволяющую с точностью выявить набирающие популярность тенденции и новые потребности населения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зозуля В.С. Проблематика и тенденции развития общественных пространств: отечественный и зарубежный опыт // Урбанистика. 2021. № 1. С. 56–72. DOI: 10.7256/2310-8673.2021.1.34516
2. Mumford L. The City in History: Its Origins, Its Transformations, and Its Prospects». Publishing Harcourt, Brace & World. 1961. 198 p.
3. Pablo S., Richard S. Designing disorder. Experiments and transgressions in the city. Publishing House of the Gaidar Institute. 2022. 280 p.
4. Акимов Ю.А. Общественные пространства как территории развития // Контентус. 2022. №1. С. 34–41.
5. Майк Л., Энтони Г. Тактический урбанизм. Strelka press, 2019. 304 с.
6. Баталина Т.С. Анализ особенностей формирования общественного пространства // Бизнес и дизайн ревю. 2017. Т. 1. № 1(5). С. 11–15.
7. Захарова Е.Е. Общественные пространства – новый вектор социокультурного развития территории // Урбанистика. 2018. № 1. С. 59–65. DOI: 10.7256/2310-8673.2018.1.25727
8. Ненько А.Е. Социологические методы изучения общественных пространств: Университет ИТМО, 2020. 55 с.
9. Общественное пространство в современном понимании. Архсовет Москвы. URL: <https://archsovet.msk.ru/opinions/obshhestvennoe-prostranstvo-v-sovremennom-ponimanii> (дата обращения 25.04.2024)
10. Типы общественных пространств. Понятия и примеры. ЭКОМСК Ассоциация. URL: https://ecomsk.ru/wp-content/uploads/2019/05/2019-05-08-Tipy-obshhestvennyh-prostranstv_compressed.pdf (дата обращения 20.04.2024)
11. Казанов А.В., Гандельсман Б.В. Соотношение частных и публичных пространств в современной многоэтажной жилой застройке на примере Юго-восточного округа г. Москвы // Architecture and Modern Information Technologies. 2023. №2 (63). С. 247–269.
12. Малая Е.В., Вавулин К.Е. Принципы формирования общественных пространств малых городов. Сборник научных трудов X Юбилейной международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 2022. С. 112–117. DOI: 10.23947
13. Птичникова Г.А. Общественное пространство современного города как арт-объект // Актуальные проблемы теории и истории искусства. 2018. С. 592–599
14. Хохлова А.М. Городские публичные места как площадки культурного производства и потребления. // Журнал социологии и социальной антропологии. 2011. Т. 14. № 5. С. 182–191.
15. Цуркунов Д.А. Тенденции и особенности развития общественных пространств в структуре города // Материалы X Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум», 2018. С. 48–55.

Информация об авторах

Шульга Ангелина Вадимовна, студент. E-mail: shulgaangelina26@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Золотарева Милена Владимировна, кандидат архитектуры, доцент, доцент кафедры истории и теории архитектуры. E-mail: goldmile@yandex.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Поступила 18.06.2024 г.

© Шульга А.В., Золотарева М.В., 2024

Shulga A.V., *Zolotareva M.V.

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

*E-mail: goldmile@yandex.ru

PUBLIC SPACES IN THE CONTEXT OF MODERN SOCIO-CULTURAL TRENDS

Abstract. The article discusses the concept of public space. The research is aimed at identifying the connection between modern socio-cultural trends and the formation of public spaces. In the course of the research, the following tasks are solved: consideration of the issue of the development of public spaces in a historical context; analysis of the formation of requirements for its organization over time; assessment of modern approaches and solutions to the formation of public spaces and identification of promising trends at the turn of the XX-XXI centuries. If the first public spaces were formed spontaneously within the grid of streets laid out in the city, then over time special territories were allocated in the urbanized space – play areas for children, places of communication for residents, etc. The author examines the influence of modern socio-cultural trends on the formation of public spaces, the relationship between urban development and the socio-cultural framework. Currently, the modern socio-cultural framework includes sites and environmental elements related to open urban spaces. These include territories of spare, free cars; linear, street structures; landscape components of man-made or natural properties; sections of house territories by complexes, etc. One of the promising areas for creating spaces in demand by socio-cultural content is the revitalization of abandoned territories and buildings that are excluded from the functional and objective life of the city – former factory and warehouse zones. The author considers successful solutions for inclusion in the socio-cultural framework of these territories. The author concludes that it is necessary to form, develop and subsequently maintain urban public spaces in order to improve the quality of life.

Keywords: public space, socio-cultural trends, urban environment, society, urban spaces, public life, public territories, socio-cultural framework.

REFERENCES

1. Zazulya V.S. Problematics and trends in the development of public spaces: domestic and foreign experience [Problematika i tendentsii razvitiya obschestvennykh prostranstv: otechestvennyi i zarubezhnyi]. Urbanistics. 2021. No. 1. Pp. 56–72. DOI: 10.7256/2310-8673.2021.1.34516 (rus)
2. Mumford L. «The City in History: Its Origins, Its Transformations, and Its Prospects». Publishing Harcourt, Brace & World. 1961. 657 p.
3. Pablo S., Richard S. Designing disorder. Experiments and transgressions in the city. Publishing House of the Gaidar Institute. 2022. 280 p.
4. Akimova Yu.A. Public spaces as development territories [Obschestvennye prostranstva kak territorii razvitiya]. 2022. No. 1. Pp. 34–41. (rus)
5. Mike L., Anthony G. (2019) Tactical Urbanism [Takticheskiy urbanism]. Publishing Strelka press. 304 p. (rus)
6. Batalina T.S. Analysis of the peculiarities of the formation of public space [Analiz osobennostei formirovaniya obschestvennogo prostranstva]. Biznes I design revu [Business and design review]. 2017. Vol. 1. No. 1(5). P. 11. (rus)
7. Zakharova E.E. Public spaces – a new vector of socio-cultural development of the territory [Obschestvennye prostranstva – novyi vector sociokulturnogo razvitiya territorii]. Urbanistics. 2018. No. 1. Pp. 59–65. DOI: 10.7256/2310-8673.2018.1.25727 (rus)
8. Nenko A.E. Sociological methods of studying public spaces [Sociologicheskie metody izucheniya obschestvennykh prostranstv]. ITMO University, 2020. 55 p. (rus)
9. Public space in the modern sense [Obschestvennoe prostranstvo v sovremennom ponimani]. Arch Council of Moscow. URL: <https://archsovet.msk.ru/opinions/obshchestvennoe-prostranstvo-v-sovremennom-ponimani> (date of treatment: 05/3/2024). (rus)
10. Types of public spaces [Tipy obschestvennykh prostranstv]. Concepts and examples [Ponyatiya i primery]. ECOMSK Association. URL: https://ecomsk.ru/wp-content/uploads/2019/05/2019-05-08-Tipy-obshchestvennykh-prostranstv_compressed.pdf (date of treatment: 04/20/2024). (rus)
11. Kazanov A.V. The ratio of private and public spaces in modern multi-storey residential buildings on the example of the South-Eastern district Moscow [Sootnoshenie privatnykh i publichnykh prostranstv v sovremennoy mnogoetazhnoy zastroike ugo-vostochnogo okruga Moskvy]. Architecture and Modern Information Technologies. 2023. No. 2(63). Pp. 247–269. (rus)
12. Malaya E.V., Vavulin K.E. Principles of formation of public spaces of small towns [Principi formirovaniya obschestvennykh prostranstv malyykh gorodov]. Collection of scientific papers of the X anniversary international scientific and practical conference. Rostov-on-Don. 2022. Pp. 112–117. DOI: 10.23947 (rus)

13. Ptichnikova G.A. The public space of a modern city as an art object [obschestvennoe prostranstvo sovremennogo goroda kak art-ob'ekt]. Actual problems of the theory and history of art. 2018. Pp. 592–59. (rus)

14. Khohlova A.M. Urban Public Space as a Site of Cultural Production and Consumption [Gorodskie publichnye mesta kak ploshchadki kul'turnogo proizvodstva i potrebleniya]. 2011. Vol. 14. No. 5. Pp. 182–191. (rus).

15. Tsurkunov D.A. Trends and features of the development of public spaces in the structure of the city [Tendencii i Osobennosti razvitiya obschestvennyh prostranstv v cstrukture goroda]. Materialy X Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchnoi konferencii «Studencheskii nauchnyi forum». 2018. Pp. 48–55. (rus)

Information about the authors

Shulga, Angelina V. Student. E-mail: shulgaangelina26@gmail.com. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russian Federation, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya str., 4.

Zolotareva, Milena V. PhD of Architecture, Associate Professor, Associate Professor of the Department of History and Theory of Architecture. E-mail goldmile@yandex.ru. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russian Federation, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya str., 4.

Received 18.06.2024

Для цитирования:

Шульга А.В., Золотарева М.В. Общественные пространства в контексте современных социально-культурных тенденций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 8. С. 90–99. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-90-99

For citation:

Shulga A.V., Zolotareva M.V. Public spaces in the context of modern socio-cultural trends. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 10. Pp. 90–99. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-90-99

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-100-109

Михайличенко С.А., Шаталов А.В., Михайличенко И.К., *Шаталов В.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: vladislav-shatalov@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ СРЕДНЕЙ И МАЛОЙ ПРОЧНОСТИ В РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОМ ДИСПЕРГАТОРЕ

Аннотация. Роторно-центробежные измельчители (диспергаторы) широко применяются в различных областях производства, а многообразие конструкций рабочего органа и измельчающих насадок позволяет справляться с задачами по измельчению таких материалов, как известняк, мел, мергель, глина, древесина, полимеры, бумага и т.д. При работе данного типа машин прослеживается незначительный процент недомола материала. Существует несколько решений данной проблемы: дополнительный цикл измельчения или добавление насадок различных конструкций на вал агрегата. Дополнительный цикл измельчения отрицательно сказывается на производительности и совокупных энергозатратах агрегата. Для увеличения степени измельчения и повышения качества получаемой измельчаемой гомогенизированной смеси коллективом авторов было принято решение о модернизации рабочего органа диспергатора. Модернизация агрегата заключается в добавлении насадки на рабочий вал ротора с иглофрезерным воздействием на измельчаемый материал. В данной статье рассмотрена методика экспериментальных исследований для установления закономерностей процесса измельчения материалов в роторно-центробежном диспергаторе, с иглофрезерным воздействием на измельчаемый материал. Проведен расчет производительности роторного агрегата и установлено соответствие зависимости между реальной производительностью и расчетной. Было подобрано различное анизотропное сырье для измельчения в роторно-центробежном диспергаторе. Установлены зависимости выходных параметров установки, таких как производительность, потребляемая мощность и удельные энергозатраты, от входных регулируемых параметров, таких как частота вращения ротора, средний размер исходного материала и степени влажности исходного материала.

Ключевые слова: анизотропные материалы, измельчение, комплексное динамическое воздействие на материал

Введение. Измельчение различных материалов давно известный технологический процесс. Данный процесс разделяется на два основных вида: дробление и помол. В свою очередь помол бывает грубый, тонкий, сверхтонкий и коллоидный. Каждый вид помола достигается определенной конструкцией измельчителя. К примеру, тонкое измельчение, возможно, получить при истирающем воздействии на сырье, а более грубый помол получается при раздавливающем, разрезающем и ударном воздействии на материал. Для получения более качественного сырья существуют такие агрегаты, в принципе работы которых лежит комплексное физико-механическое воздействие на измельчаемый материал. Щековые дробилки комбинируют раздавливающее и сдвиговое воздействие, благодаря сложному движению шатунного механизма щеки, различные роторные диспергаторы имеют несколько видов насадок на едином валу, которые обеспечивают разнообразные комбинации механического воздействия на сырье.

Следует отметить, что процессы помола анизотропных материалов являются чрезвычайно

энергоемкими; в этой связи, вопросом принципиальной важности, является снижение энергопотребления, создание помольных машин и определение оптимальных режимов их работы, которые обеспечивали бы необходимое качество помола при минимальных энергозатратах. Это требует научного, теоретического и лабораторного обеспечения на базе углубленного изучения процессов и специфики помола в существующих измельчающих машинах (мельницах, диспергаторах, дезинтеграторах и др.).

Проследивая путь развития помольного оборудования, можно отметить, что, несмотря на радикальное изменение конструкций, основным их принципом остается воздействие на волокна в зазоре между перекрещивающимися ножевыми элементами. Ножевые размалывающие машины являются наиболее универсальным оборудованием, применяющимся практически на всех стадиях, где требуется измельчение и помол анизотропных материалов. Перспективным направлением развития помольного оборудования для измельчения анизотропных материалов, является

внедрение насадок с иглофрезерным воздействием на измельчаемый материал.

На сегодняшний день известно несколько конструкций роторных помольных агрегатов. С несколькими камерами (рис. 1) и однокамерные агрегаты комплексного динамического воздействия на материал.

Многокамерные диспергаторы работают следующим образом. В первой камере происходит грубый помол с ударным воздействием. Во

второй камере следует разрезающее воздействие и истирание материала. Безусловно, у такой установки есть ряд явных преимуществ, но и также есть недостатки, наличие нескольких камер увеличивает металлоемкость конструкции, требует динамической балансировки, увеличения числа приводов, обеспечение продольного движения сырья между камерами.

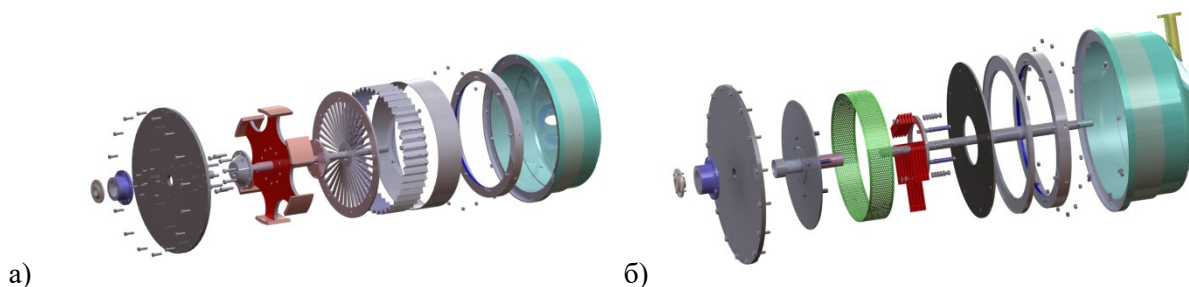


Рис. 1. Роторный агрегат с двумя камерами.
а – первая камера грубого помола; б – вторая камера тонкого помола

Коллектив авторов совместно с лабораторией «Инженер Будущего» на базе кафедры Технологических комплексов, машин и механизмов БГТУ им. В.Г. Шухова провел исследование диспергаторов с однокамерным и многокамерным устройством и установил, что агрегаты с однокамерной конструкцией способны обеспечить комплексное динамическое воздействие на сырье благодаря сложному строению рабочего органа. У исследуемого агрегата рабочим органом является ротор с различными насадками, обеспечивающими режущее и истирающее воздействие на сырье. Для повышения дисперсности измельченного продукта нами была проведена модернизация агрегата и установлена насадка с иглофрезерным воздействием.

Материалы и методы. В ходе проведенных исследований работы роторно-центробежного агрегата (РЦА), выяснилось, что на производительность машины основное влияние оказывает интенсивность разрушения материала в зоне зубчатой оболочки ротора. Предварительные и последующие стадии разрушения частиц материала являются вспомогательными и не оказывают характерного влияния на величину производительности.

Представим зависимость в общем виде [1]:

$$Q_{изм} = V_{мат} \cdot \rho \cdot n \quad (1)$$

где $V_{мат}$ – объем перерабатываемого материала, заключенный в режущих канавках съемного рабочего элемента, ($м^3$); ρ – насыпная плотность измельчаемого материала, ($кг/м^3$); n – частота вращения ротора, ($мин^{-1}$)

$$Q_{изм} = 0,9 \cdot 0,12 \cdot 0,9 \cdot 13 \cdot 170 \cdot 2000 \cdot 0,75 \cdot 0,03 \cdot 0,996 = 32 \text{ кг/ч.}$$

Выражение (1) является общим и не учитывает ряд конструктивно – технологических параметров. Введем следующие величины: α – угол наклона режущих канавок к оси ротора; k_ϕ – коэффициент заполнения материалом; k_λ – коэффициент, учитывающий выходной зазор агрегата.

Получим:

$$Q_{изм} = V_{мат} \cdot \rho \cdot n \cdot k_\phi \cdot k_\lambda \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

Объем перерабатываемого материала рассчитываем, как:

$$V_{мат} = l \cdot b \cdot h \cdot z \quad (3)$$

где l – длина канавки ротора, м; b – ширина канавки, м; h – высота канавки, м; z – количество канавок, шт;

Подставив формулу 3 в выражение 2, получим окончательную формулу производительности РЦА:

$$Q_{изм} = l \cdot b \cdot h \cdot z \cdot \rho \cdot n \cdot k_\phi \cdot k_\lambda \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

Следует учесть, что величина $k_\phi = 0,65–0,75$. При отсутствии конической насадки, ограничивающей площадь выходного сечения агрегата и являющейся основным сдерживающим фактором, эффективность работы РЦА существенно снизится. Поэтому величина коэффициента, учитывающего выходной зазор помольной части агрегата составляет $k_\lambda = 0,01–0,03$ [2].

В соответствии с полученной методикой рассчитаем производительность созданной опытно – экспериментальной установки [2, 3]:

Из полученных результатов следует, что разница $Q_{изм}$ и $Q_{опыт}$ составляет ~8 %. Данное значение приемлемо и лежит в диапазоне допустимых погрешностей. Реальная производительность агрегата зависит от выбранного сырья и его физико-механических свойств.

Далее следует рассчитать потребляемую мощность роторно-центробежным агрегатом. При работе РЦА мощность затрачивается на:

1. разрезание материала в каждой из ячеек зубчатого ротора – $N_{рез.з}$;

2. разрезание слоя материала в зазоре между иглофрезерной насадкой и зубчатым статором – $N_{рез.и}$;

3. перемещение материала выгрузочной крыльчаткой – $N_{вент}$.

Отсюда получаем общую формулу потребляемой мощности [2, 3]:

$$N_{общ} = \frac{N_{рез.з} + N_{рез.и} + N_{вент}}{\eta}; \text{ Вт}, \quad (5)$$

где η – КПД привода РЦА.

Мощность, затрачиваемая на разрезание материала находим по формуле:

$$N_{рез.з} = (P_{\Sigma \text{сопр}} \cdot r_p) \omega, \quad (6)$$

где $P_{\Sigma \text{сопр}}$ – суммарное сопротивление, возникающее при срезе слоя материала в ячейках, Н; r_p – радиус ротора, $r_p = 0,09$ м.

Суммарное сопротивление находим по формуле:

$$P_{\Sigma \text{сопр}} = P_{\Sigma \text{сопр.яч}} \cdot z, \quad (7)$$

где $P_{\Sigma \text{сопр.яч}}$ – сопротивление, возникающее при срезе слоя материала в одной ячейке, Н.

Сопротивление в одной ячейке находим:

$$P_{\Sigma \text{сопр.яч}} = P_{\sigma} n_s, \quad (8)$$

где P_{σ} – сила сопротивления разрезанию частицы материала, Н; $P_{\sigma} = 3,9$ Н; n_s – среднестатистическое количество опилок в ячейке.

Мощность, затрачиваемая на разрезание слоя материала в зазоре между иглофрезерной насадкой и зубчатым статором:

$$N_{рез.и} = N_{рез} \mu, \quad (9)$$

где μ – коэффициент разрезания иглофрезами, $\mu = 0,6$.

Мощность, затрачиваемая на вентилятор, находим по формуле:

$$N_{вент} = N_a + N_6, \quad (10)$$

$$N_a = Q_m \cdot L \cdot k_c, \quad (11)$$

$$N_6 = b \cdot k_c \cdot i \cdot \pi \cdot n \cdot \sin \alpha \cdot \frac{R-r}{2}, \quad (12)$$

где Q_m – производительность РЦА, кг/с; L – длина крыльчатки, м; k_c – общий коэффициент аэродинамического сопротивления; $k_c = 1,8$; b – ширина лопастей, м; k – удельное сопротивление массы резанию, Н/м²; i – количество лопастей; n – частота вращения ротора, с⁻¹; α – угол поворота лопастей; $\alpha = 30^\circ$; R – радиус окружности

описываемой лопастью, м; $R = 0,130$ м; r – расстояние от центра вращения до начала лопасти, $r = 0,0155$ м.

По приведенным формулам производим расчет мощности привода РЦА, принимаем размер средневзвешенной частицы материала равной $a_{ср} = 0,005$ м, в данном случае рассматриваем древесные частицы.

Находим объем средневзвешенных частиц сырья:

$$V_{ср.ч} = 4/3 \cdot \pi (a_{ср}/2)^3, \quad (13)$$

$$V_{ср.ч} = 4/3 \cdot 3,14 \cdot (0,005/2)^3 = 523 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3.$$

Находим среднестатистическое количество частиц сырья в ячейке:

$$n_s = \frac{V_{яч} k_{я}}{V_{ср.ч}}, \quad (14)$$

$$n_s = \frac{9720 \cdot 10^{-9} \cdot 0,65}{523 \cdot 10^{-9}} = 12 \text{ шт.}$$

Мощность, затрачиваемая на разрезание материала:

$$N_{рез} = 468 \cdot 0,093 \cdot 78,5 = 1073 \text{ Вт};$$

$$P_{\Sigma \text{сопр}} = 46,8 \cdot 10 = 468 \text{ Н};$$

$$P_{\Sigma \text{сопр.яч}} = 3,9 \cdot 15 = 46,8 \text{ Н.}$$

Мощность, затрачиваемая на истирание слоя материала:

$$N_{ист} = 1073 \cdot 0,6 = 644 \text{ Вт.}$$

Мощность, затрачиваемая на вентилятор:

$$N_{вент} = 1 + 2,5 = 3,5 \text{ Вт};$$

$$N_a = 1,21 \cdot 0,07 \cdot 1,8 = 1 \text{ Вт};$$

$$N_6 = 0,05 \cdot 1,8 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 25 \cdot \sin 30^\circ \cdot \frac{0,13 \cdot 0,155}{2} = 2,5 \text{ Вт};$$

$$N_{общ} = \frac{1073 + 644 + 4}{0,83} = 1912 \text{ Вт.}$$

Основная часть. Большинство исследований нами проведено для установления с помощью эксперимента функциональных или статистических связей между несколькими величинами, что является основой для будущего многофакторного планирования эксперимента на основе методов математического моделирования. Классический метод постановки эксперимента подразумевает фиксирование на принятых уровнях всех переменных факторов, кроме одного, значения которого определенным образом изменяют в области его существования [4]. Количество изменяемых показателей определяет факторность эксперимента.

Для проведения эксперимента по измельчению волокнистых материалов была использована запатентованная лабораторная установка, размещенная на кафедре «Технологических комплексов машин и механизмов» [5].

При исследовании процессов измельчения в роторно-центробежном агрегате на стадии поисковых экспериментов использовались следующие материалы: бумага, известняк, древесный опил и пластик [6].

При проведении многофакторного планирования эксперимента использовалась бумага, мел, пластик. Древесный опил на стадии предварительного помола, оказался не пригоден к измельчению в роторно-центробежном агрегате (РЦА). Материалы были предварительно отсортированы на фракции 3-х средних размеров (табл. 1).

Показатель сопротивления сырья излому – один из существенных показателей, характеризующих механическую прочность измельчаемого материала. Он зависит от длины волокон, из которых образовано сырье, их прочности, гибкости и сил связи между волокнами.

Таблица 1

Характеристики материалов, используемых в экспериментах

Материал Характеристики	Насыпная плотность, кг/м ³	Средний размер, $A_{ср}, \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$	Влажность материала, W, %
Бумага	50–100	0,1 0,5 0,9	4–6
Мел	100–150	0,1 0,5 0,9	20–35
Пластик	150–200	0,9 1 1,5	10
Кремнезем	200–250	0,9 1 1,5	20–35

При проведении экспериментальных исследований использовались стандартные методики. Испытания проводились на спроектированном роторно-центробежном агрегате с модернизированным ротором. На рабочий орган установки была жестко закреплена иглофрезерная насадка,

для обеспечения вспомогательного разрушающего воздействия на материал (рис. 2). Данное технологическое решение позволило нам интенсифицировать помол и доизмельчать частицы среднего размера.

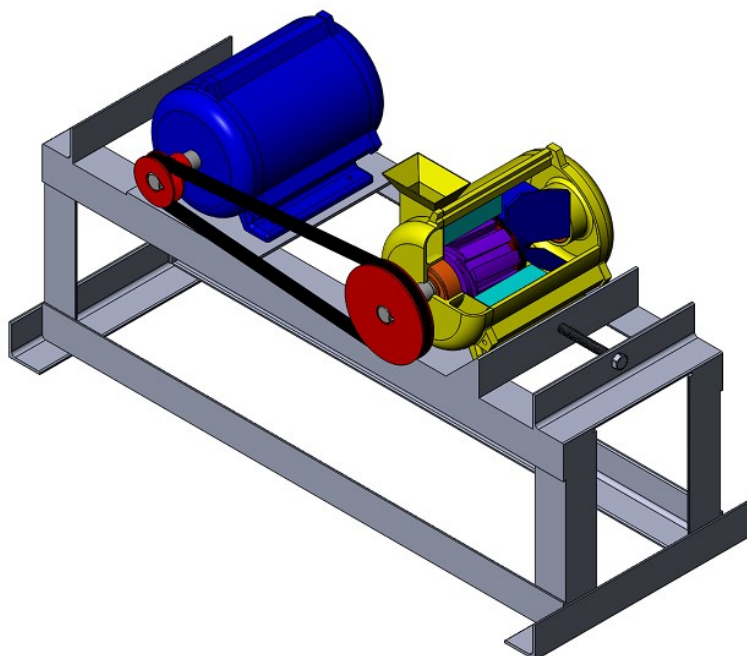


Рис. 2. Лабораторный роторно-центробежный агрегат

Подготовка материала для проведения лабораторных исследований осуществлялась ручным способом в связи с малым объемом, требуемым для проведения экспериментов. Отходы бумаги и

мела были подготовлены в 3-х различных фракциях: 0,1; 0,5; $0,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Пробы измельченного в лабораторной установке материала отбирались из накопительного мешка-уловителя при помощи аспирационной системы, состоящей из циклона,

рукавного фильтра и вентиляторной установки. Отходы полимерной промышленности представлены нашим производственным партнером – транспортной компанией ООО «ТК Экотранс» из цеха по производству пластиковых труб. Вес из-

мельченного материала оценивался на электронных весах с высокой точностью 0,1 г, модель – Diamond-500.

На рисунке 3 представлены результаты помола пластика, бумаги, мела и кремнезема. Все полученные и вводные данные показаны в таблице 2.



Рис. 3. Результаты исходного и измельченного материала:
а) отходы макулатуры; б) отходы пластиковых труб; в) мел; г) кремнезем

Таблица 2

Результаты лабораторного эксперимента

Наименование сырья	Размер частиц исходного материала, Д × Ш, мм	Степень измельчения
Бумага	50×50	40–50
Пластик	10×20	20–25
Мел	5×5	50–70
Кремнезем	1×0,5	70–100

Проведенные испытания по результатам модернизации РЦА обеспечили положительные результаты. Агрегат работал устойчиво, «проскока» недоизмельченного продукта не наблюдалось. Ситовой анализ конечной фракции показал, что максимальный размер частиц материала не превышал размер выходного зазора рабочей зоны РЦА. Данная фракция составляет 90 % от общей массы измельченного материала, остальные 10 % были либо чуть больше, либо в микро дисперсном состоянии. Производительность агрегата составила $Q_{\text{лаб}}=35$ кг/ч.

Экспериментальным путем было доказано, что полученная производительность меняется в зависимости от измельчаемого сырья. Под каждый вид сырья требуется подобрать свои режимы работы агрегата: скорость вращения ротора, мощность привода и т.д. К примеру, для измельчения целлюлозных отходов затрачиваемая мощность привода была низка, что позволило добиться экономии электроэнергии, а для измельчения кремнезема и некоторых видов полимеров приходилось увеличивать мощность привода (при помощи частотного регулятора).

Также, в ходе проведения экспериментов были выявлены зависимости в ошибках измерений, которые были описаны в трудах Л.З. Румшинского «Математическая обработка результатов эксперимента» [7].

В ходе проведения экспериментальных исследований были выявлены пути дальнейшей модернизации исследуемого агрегата. Одним из перспективных направлений совершенствования РЦА является повышение стадийности помола сырья, путем создания дополнительной камеры воздействия на измельчаемый сырь. Данное технологическое решение описывалось в статье Михайличенко С.А. «Роторно-центробежный диспергатор со смежными камерами классификации и гомогенизации». В данном труде описывается влияние добавления камеры гомогенизации на получаемое сырье [8].

Полученные результаты проведенных экспериментов позволяют нам с уверенностью говорить о дальнейшем промышленном применении нашего агрегата. В настоящее время существует высокий спрос на переработку макулатуры, из

нее можно получить утеплители, из измельченного пластика изготавливают водопроводные трубы, пленки, бордюры и технологические люки, решетки, настилы спортивных площадок и др. Мелкодисперсный мел требуется в строительстве для приготовления растворов, штукатурок, лакокрасочном производстве и других отраслях [9].

Для достижения турбулентного эффекта в камере выгрузки РЦА возможно использование крыльчаток с турбовинтовым строением или применения направляющего (разгонного) аппарата по периметру камеры разряжения.

С целью комплексного исследования процесса измельчения доработанной установки мы также использовали в качестве сырья силикатный материал (кремнезем и стеклобой). В результате получили отрицательный эффект при эксплуатации установки РЦА, так как на стадии предварительного измельчения материал оказался достаточно мелкой фракции для данной установки, т.е. переизмельчается в мелкую (сорную) фракцию, что вызывает большие потери производительности за счет образования амортизационной подушки из измельчаемого материала.

Отходы стекольной промышленности мало пригодны для переработки в разработанной нами роторно-центробежной установке, так как стекло является высоко абразивным и достаточно твердым материалом и попросту разрушает режущие кромки зубчатой насадки рабочего ротора. Для измельчения стекольного боя более пригодны молотковые и вальцевые дробилки, где доминирует интенсивное ударное воздействие.

Таким образом, необходимо ограничить спектр перерабатываемых материалов в соответствии с общепринятой шкалой твердости Мооса до 4–5 единиц [10].

Выше 5 единицы шкалы Мооса лежит кварцевый материал. Кварц – уникальный и очень популярный камень. Добраться до него сложно, поэтому зачастую приходится применять быстрый, но, к сожалению, не совсем экологичный способ – взрыв [11].

Разборная роторная конструкция нашего агрегата позволяет добавлять на рабочий вал дополнительные насадки для повышения качества

помола измельчаемого сырья. Правильность хода проведенных исследований подтверждена рядом патентов известных ученых и изобретателей. В патенте профессора Севостьянова В.С. № 2755436 описывается агрегат, имеющий иглофрезерное рабочее колесо. Предлагаемое изобретение направлено на повышение производительности и эффективности агрегата, расширение его технологических возможностей за счёт многостадийного воздействия на материал иглофрезерными рабочими органами [12]. Известно, что иглофрезерные агрегаты хорошо подходят для измельчения полимерного сырья. Данные материалы обладают высокой прочностью, стойкостью к кислотной среде, хорошей свариваемостью слоев, не впитывают влагу [13].

При разработке энергоэффективного оборудования для переработки твердых полимерных материалов особое внимание должно уделяться их физико-механическим характеристикам, таким как упругость, пластичность, температура плавления и др. [14].

Одним из направлений конструктивно-технологического совершенствования измельчительного оборудования, направленных на снижение энергоемкости процесса измельчения, является применение рабочих органов с развитой поверхностью [15].

Выводы.

1. Проведены экспериментальные исследования по измельчению различных видов материалов средней и малой прочности: бумаги, полимеров, известняка, кремнезема на лабораторном образце роторно-центробежного агрегата.

2. Установлена фактическая производительность агрегата на разных режимах работы с различным сырьем.

3. Выполнен расчет производительности, потребляемой мощности агрегата и установлено соответствие фактической и расчетной производительности.

4. Намечены пути дальнейшей модернизации разработанного роторного агрегата

5. По результатам выполненных работ созданы предпосылки для разработки технологического регламента и производственного внедрения агрегата.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках выполняемого проекта по теме: № СП2-4/3-2024 «Разработка инновационных решений по селективной переработке техногенных отходов для создания комфортной среды проживания» в рамках реализации Программы развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2021–2030 гг.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайличенко С.А. Роторно-центробежный диспергатор со смежными камерами классификации и гомогенизации. // Качество, безопасность, энерго- и ресурсосбережение в промышленности строительных материалов и строительстве на пороге XXI века: Сб. докл. Междунар. науч.-практич. конф. Белгород: БелГТАСМ, 2000. Ч. 6. С. 195–198.

2. Михайличенко С.А. Шаталов А.В., Шаталов В.А. Методика определения основных параметров роторно-центробежного агрегата // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: Материалы международной научно-практической конференции, Белгород, 23–25 сентября 2021 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. С. 289–295.

3. Вердиян М.А., Кафаров В.В. Новые принципы анализа и расчета процессов и аппаратов измельчения // Цемент. 1982. № 10. С. 6–9.

4. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов // Машиностроение, 1981. 184 с.

5. Пат. 2786113 С1 Российская Федерация, МПК В02С 18/00. Роторно-центробежный диспергатор / В.А. Шаталов, С.А. Михайличенко, А.В. Шаталов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 2022. Бюл. №35. 4 с.

6. Шаталов А.В., Шаталов В.А., Шавирская Д.С. Роторно-центробежный агрегат для измельчения неперабатываемых отходов // Образование. Наука. Производство : XIII Международный молодежный форум, Белгород, 08–09 октября 2021 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. С. 968–971.

7. Ковалева Т.Е. Шкала Мооса в геотехнологиях и горной добыче // Достижения науки и образования. 2020. № 14(68). С. 20–21.

8. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. Наука, 1971. 192 с.

9. Вердиян М.А., Кафаров В.В. Принципы анализа и расчета процессов измельчения в технологии цемента // Журнал ВХО им. Д.И. Менделеева. 1988. Т. 33. №4. С. 416–422.

10. Михайличенко И.К. Состояние и перспективы развития кварцевой отрасли в России. // XIV Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство» Сборник докладов. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022.

Ч. 20. Фундаментальные и прикладные исследования в области. 2022. С. 107–110.

11. Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Севостьянов В.С., Чемеричко Г.И. Исследования производительности дезинтегратора с внутренним рециклом материалов // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях : Материалы международной научно-практической конференции, Белгород, 23–25 сентября 2021 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. С. 151–159.

12. Пат. № 2755436 С1 Российская Федерация, МПК В02С 18/00. роторно-центробежный агрегат с иглофрезерными рабочими органами : № 2021101630 : заявл. 26.01.2021 : опубл. 16.09.2021 / В.С. Севостьянов, Н.Т. Шеин, М.В. Севостьянов [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Бюл. № 25.

13. Севостьянов В.С., Горягин П.Ю., Севостьянов М.В., Проценко А.М. Технология и технические средства для переработки полимерных

отходов с получением компонентов полимерцементных бетонов // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования : Сборник докладов Всероссийской научной конференции, Белгород, 04–08 октября 2022 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. С. 182–186.

14. Проценко А.М., Нагаев Б.Ю., Бабуков В.А., Горягин П.Ю. Машины и агрегаты для переработки техногенных волокнистых материалов // XII Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство» : Материалы форума, Белгород, 01–20 октября 2020 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2020. С. 1113–1118.

15. Севостьянов В.С., Горягин П.Ю., Бабуков В.А. Исследование процесса измельчения Техногенных полимерных материалов иглофрезерными рабочими органами // Энергетические системы. 2019. № 1. С. 313–318.

Информация об авторах

Михайличенко Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, профессор кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: prorektor@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шаталов Алексей Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: alexscha@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Михайличенко Ирина Константиновна, аспирант кафедры «Технологии стекла и керамики». E-mail: m_irinac@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Шаталов Владислав Алексеевич, аспирант кафедры механического оборудования. E-mail: vladislav-shatalov@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 19.04.2024 г.

© Михайличенко С.А., Шаталов А.В., Михайличенко И.К., Шаталов В.А., 2024

Mikhailichenko S.A., Shatalov A.V., Mikhailichenko I.K., *Shatalov V.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: vladislav-shatalov@mail.ru*

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE GRINDING OF MEDIUM AND LOW STRENGTH MATERIALS IN A ROTARY CENTRIFUGAL DISPERSANT

Abstract. Rotary – centrifugal grinders are widely used in various fields of production, and the diverse structure of the grinding nozzles on the rotor allows them to cope with the tasks of grinding materials such as wood, plastic, rubber, paper, etc. During the operation of grinding rotary machines, a certain percentage of non-crushed material is traced, there are several solutions to this problem: an additional grinding cycle or

the addition of a pre-grinding nozzle to the shaft of the rotary unit. An additional grinding cycle of raw materials adversely affects the performance of the dispersing unit. In order to improve the grinding performance of the unit and improve the quality of the resulting crushed homogenized mixture, our scientific and technical team decided to modernize the working body of the dispersant. Modernization of the unit consists in adding a nozzle to the working shaft of the rotor with a needle milling effect on the crushed material. In this article, the method of experimental research is considered to establish the regularities of the process of grinding materials in a rotary shredder, with needle milling action on the crushed material. The calculation of the performance of the rotary unit was carried out and the relationship between the actual performance and the calculated one was established. Various anisotropic raw materials were selected for grinding in a rotary -centrifugal dispersant. The dependences of the output parameters of the installation, such as productivity, power consumption and specific energy consumption, on the input adjustable parameters, such as the rotor speed, the average size of the source material and the degree of humidity of the source material are established.

Keywords: anisotropic materials, grinding, complex dynamic effect on the material.

REFERENCES

1. Mihajlichenko S.A. Rotary-centrifugal disperser with adjacent classification and homogenization chambers [Rotorno - centrobezhnyj dispergator so smezhnymi kamerami klassifikacii i gomogenizacii]. Kachestvo, bezopasnost', energo- i resursoberezhenie v promyshlennosti stroitel'nyh materialov i stroitel'stve na poroge XXI veka: Sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. Belgorod: BelGTASM, 2000. CH.6. Pp. 195–198. (rus)
2. Mihajlichenko S.A., Shatalov A.V., Shatalov V.A. Methodology for determining the main parameters of a rotary-centrifugal unit [Metodika opredeleniya osnovnyh parametrov rotorno-centrobezhnogo agregata]. Energo-resursoberegayushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoj i stroitel'noj otraslyah : Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Belgorod, 23–25 sentyabrya 2021 goda. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2021. Pp. 289–295. (rus)
3. Verdiyana M.A., Kafarov V.V. New principles of analysis and calculation of grinding processes and apparatus [Novye principy analiza i rascheta processov i apparatov izmel'cheniya]. Zhurnal Cement. 1982. No. 10. Pp. 6–9. (rus)
4. Spiridonov A.A. Planning an experiment when researching technological processes [Planirovaniye eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh processov]. Mashinostroyeniye, 1981. 184 p. (rus)
5. Shatalov V.A., Mihajlichenko S.A., Shatalov A.V. Rotorno-centrobezhnyj dispergator. Patent RF, no. 2786113. 2022. (rus)
6. Shatalov A.V., Shatalov V.A., Shavirskaya D.S. Rotary-centrifugal unit for grinding non-recyclable waste [Rotorno - centrobezhnyj agregat dlya izmel'cheniya nepererabatyvaemyh othodov]. Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo : XIII Mezhdunarodnyy molodezhnyy forum, Belgorod, 08–09 oktyabrya 2021 goda. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2021. Pp. 968–971. (rus)
7. Kovaleva T.E. Mohs scale in geotechnology and mining [Shkala Moosa v geotekhnologiyah i gornoj dobyche]. Dostizheniya nauki i obrazovaniya. 2020. No. 14(68). Pp. 20–21. (rus)
8. Rumshinskij L.Z. Mathematical processing of experimental results [Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta]. Nauka, 1971. 192 p. (rus)
9. Verdiyana M.A., Kafarov V.V. Principles of analysis and calculation of grinding processes in cement technology [Principy analiza i rascheta processov izmel'cheniya v tekhnologii cementa]. Zhurnal VHO im. D.I. Mendeleeva. 1988. Np4. Pp. 416–422. (rus)
10. Mihajlichenko I.K. State and prospects for the development of the quartz industry in Russia [Sostoyaniye i perspektivy razvitiya kvarcevoj otrasli v Rossii]. XIV Mezhdunarodnyy molodyozhnyy forum «Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo» Sbornik dokladov. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2022. CH. 20. Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v oblasti. 2022. Pp. 107–110. (rus)
11. Kachaev A.E., Orekhova T.N., Sevost'yanov V.S., Chemerichko G.I. Performance studies of a disintegrator with internal material recycling [Issledovaniya proizvoditel'nosti dezintegratora s vnutrennim reciklom materialov]. Energo-resursoberegayushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoj i stroitel'noj otraslyah : Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Belgorod, 23–25 sentyabrya 2021 goda. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2021. Pp. 151–159. (rus)
12. Sevost'yanov V.S., Shein N.T., Sevost'yanov M.V. Rotorno-centrobezhnyj agregat s iglofrezernymi rabochimi organami. Patent RF, no 2755436, 2021. Byul. No 25. (rus)
13. Sevost'yanov V.S., Goryagin P.Y., Sevost'yanov M.V., Prochenko A.M. Technology and technical means for processing polymer waste to obtain components of polymer-cement concrete [Tekhnologiya i tekhnicheskie sredstva dlya pere-

rabotki polimernyh othodov s polucheniem komponentov polimercementnyh betonov]. Bezopasnost', zashchita i ohrana okruzhayushchej prirodnoj sredy: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya : Sbornik dokladov Vserossijskoj nauchnoj konferencii. Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova, 2022. Pp. 182–186. (rus)

14. Procenko A.M., Nagaev B.Y., Babukov V.A., Goryagin P.Y. Machines and units for processing technogenic fibrous materials [Mashiny i agregaty dlya pererabotki tekhnogennyh voloknistyh

materialov]. XII Mezhdunarodnyj molodezhnyj forum «Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo» : Materialy foruma, Belgorod, 01–20 oktyabrya 2020 goda. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2020. Pp. 1113–1118.

15. Sevost'yanov V.S., Goryagin P.Y., Babukov V.A. Study of the process of grinding technogenic polymer materials using needle-milling working bodies [Issledovanie processa izmel'cheniya Tekhnogennyh polimernyh materialov iglofrezernymi rabochimi organami]. Energy systems. 2019. No. 1. Pp. 313–318. (rus)

Information about the authors

Mikhailichenko, Sergey A. Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Technological Complexes, Machines and Mechanisms. E-mail: prorector@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Shatalov, Alexey V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technological Complexes, Machines and Mechanisms. E-mail: alexscha@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Mikhailichenko, Irina K. Postgraduate student of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: m_irinac@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Shatalov, Vladislav A. Postgraduate student of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: vladislav-shatalov@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Received 19.04.2024

Для цитирования:

Михайличенко С.А., Шаталов А.В., Михайличенко И.К., Шаталов В.А. Экспериментальные исследования измельчения материалов средней и малой прочности в роторно-центробежном диспергаторе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 10. С. 100–109. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-100-109

For citation:

Mikhailichenko S.A., Shatalov A.V., Mikhailichenko I.K., Shatalov V.A. Experimental studies of the grinding of medium and low strength materials in a rotary centrifugal dispersant. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 10. Pp. 100–109. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-110-109