

Научно-теоретический журнал  
**ВЕСТНИК**

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

9

2025

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

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

**№ 9, 2025 год**

**SCIENTIFIC AND THEORETICAL JOURNAL  
BULLETIN  
of BSTU named after V.G. Shukhov  
Vol. 9. 2025**

# 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).

<b>Наименование органа, зарегистрировавшего издание:</b>	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.
<b>Учредитель/Издатель:</b>	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
<b>Адрес редакции:</b>	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 522 Гк
<b>Адрес типографии:</b>	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
<b>Тел:</b>	+7 (4722) 30-99-77
<b>E-mail:</b>	VESTNIK@intbel.ru
<b>Официальный сайт журнала:</b>	<a href="https://bulletinbstu.editorum.ru">https://bulletinbstu.editorum.ru</a>
<b>Подписка и распространение</b>	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. (+12) Цена свободная.
<b>Подписан в печать</b>	15.09.2025
<b>Выход в свет</b>	30.09.2025

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 14,64. Уч.-изд. л. 15,75. Тираж 35 экз. Заказ № 115

© ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 2025

# 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).

<b>Founder / Publisher:</b>	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
<b>Editorial office address:</b>	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 522
<b>Printing house address:</b>	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
<b>Tel:</b>	+7 (4722) 30-99-77
<b>E-mail:</b>	VESTNIK@intbel.ru
<b>Official website of the journal</b>	<a href="https://bulletinbstu.editorum.ru">https://bulletinbstu.editorum.ru</a>
<b>Distribution</b>	The journal is distributed free of charge in the public domain. Free price
<b>Signed for printing:</b>	15.09.2025



**Главный редактор**

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

**Заместитель главного редактора**

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

**Члены редакционной коллегии**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**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).

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

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

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

**Перькова Маргарита Викторовна**, чл.-корр. РААСН, 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).

**Полужтова 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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## CHIEF EDITOR

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

## DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

## MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Margarita V. Per'kova**, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Architecture, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Russian Federation, Belgorod).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

- Серых И.Р., Чернышева Е.В., Серых В.Д.**  
ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ПОМЕЩЕНИЯ КОТЕЛЬНОЙ 8
- Аль-Сабаеи А.К., Абсиметов В.Э.**  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ОБРАЗЦОВ УЗЛОВ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКИ 16
- Супранович В.М.**  
УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ В АРХИТЕКТУРЕ ОБЪЕКТОВ ОБРАЩЕНИЯ  
С ТВЕРДЫМИ БЫТОВЫМИ ОТХОДАМИ В РОССИИ: ЗНАЧЕНИЕ,  
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ, РЕАЛИЗАЦИЯ 24
- Чечель И.П.**  
ИННОВАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ  
«ШКОЛА ПОЛНОГО ДНЯ», КАК ИНСТРУМЕНТ АРХИТЕКТУРНОЙ  
РЕНОВАЦИИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ШКОЛЬНЫХ ЗДАНИЙ 35
- Спирин П.П.**  
ЭКОЛОГО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ В ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВЕ 47

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

- Трепалин Д.В., Мишин Д.А., Трепалина Ю.Н., Ковалев С.В., Смагина А.Р.**  
ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМОВАНИЯ  
МЕЛКОФРАКЦИОННОГО КЕРАМЗИТА ИЗ МАЛОПЛАСТИЧНОГО СЫРЬЯ 62

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Загородний Н.А., Головкин М.В.**  
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОНУСНОЙ ДРОБИЛКИ  
ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ ЭКСЦЕНТРИКОВОГО УЗЛА 71
- Косогова Ю.П.**  
ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ РЕЗАНИЯ И МАТЕРИАЛА ПОКРЫТИЯ ФРЕЗЫ  
НА ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ВНУТРИКОРПУСНОГО  
УСТРОЙСТВА ВВЭР 81
- Шбани А., Алван Х.М.**  
РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА  
С ШЕСТЬЮ КОЛЕСАМИ ИЛОНА 89
- Колос Э.М., Малышев И.И., Глобенко С.А., Сергеев Э., Ишкуватов Р.Р.,  
Кроткова И.Л.**  
ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ  
СТАНЦИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТУРБОДЕТАНДЕРОВ:  
МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ 104
- Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Уральский А.В.**  
ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ПНЕВМОСМЕСИТЕЛЕ  
НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ 115

## CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<b>Serykh I.R., Chernyshova E.V., Serykh V.D.</b> EASILY REMOVABLE STRUCTURES FOR BOILER ROOM	8
<b>Al-Sabaei A. Q., Absimetov V.E.</b> EXPERIMENTAL STUDY OF MODELS OF BUILDING METAL STRUCTURES UNDER DYNAMIC LOADS	16
<b>Supranovich V.M.</b> SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE ARCHITECTURE OF SOLID WASTE MANAGEMENT FACILITIES IN RUSSIA: MEANING, INTERPRETATION, IMPLEMENTATION	24
<b>Chechel I.P.</b> AN INNOVATIVE MODEL OF AN EDUCATIONAL ORGANIZATION "FULL-TIME SCHOOL" AS A TOOL FOR ARCHITECTURAL RENOVATION OF EXISTING SCHOOL BUILDINGS	35
<b>Spirin P.P.</b> ECO-ORIENTED PLANNING IN URBAN SYSTEM	47

## CHEMICAL TECHNOLOGY

<b>Trepalin D.V., Mishin D.A., Trepalina Yu.N., Kovalev S.V., Smagina A.R.</b> OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF FORMING FINE-FRACTION EXPANDED CLAY FROM LOW-PLASTIC RAW MATERIALS	62
---	----

## MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

<b>Zagorodniy N.A., Golovkin M.V.</b> INCREASING THE EFFICIENCY OF A CONE CRUSHER BY OPTIMIZING THE DESIGN OF THE ECCENTRIC UNIT	71
<b>Kosogova Yu.P.</b> IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF MECHANICAL PROCESSING OF PARTS OF WWER INTERCELL	81
<b>Shbani A., Alwan H.M.</b> DEVELOPMENT OF A DYNAMIC MODEL FOR A MOBILE ROBOT WITH SIX MECANUM WHEELS	89
<b>Kolos E.M., Malyshev I.I., Globenko S.A., Sergeyev E., Ishkuvatov R.R., Krotkova I.L.</b> OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION AT GAS DISTRIBUTION STATIONS USING TURBOEXPANDERS: MODELING AND ANALYSIS	104
<b>Kachaev A.E., Orekhova T.N., Uralsky A.V.</b> VERIFICATION OF THE RESULTS OF NUMERICAL AND MATHEMATICAL MODELING OF TWO-PHASE FLOW IN A CONTINUOUS-ACTION PNEUMATIC MIXER	115

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-8-15

<sup>1,\*</sup>Серых И.Р., <sup>1</sup>Чернышева Е.В., <sup>2</sup>Серых В.Д.<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова<sup>2</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

\*E-mail: inna\_ad@mail.ru

## ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ПОМЕЩЕНИЯ КОТЕЛЬНОЙ

**Аннотация.** В современном мире многократно выросла угроза возникновения аварий и других происшествий, в которых человеческий фактор играет далеко не последнюю роль. Так называемые техногенные катастрофы и бедствия всегда возникали по вине человека, являясь результатом сочетания двух факторов: организационные недостатки и развивающиеся технологии.

Большинство техногенных аварий можно либо предотвратить, либо предусмотреть комплекс мер, который помог бы сократить ущерб, если катастрофа неизбежна. Это особенно актуально для взрывоопасных производств различных промышленных предприятий.

Для обеспечения безопасной жизнедеятельности обслуживающего персонала в зданиях и сооружениях со взрывоопасным производством предполагается применение легкобрасываемых конструкций (ЛСК), которые разрушаются при взрыве.

В статье рассмотрен вариант применения ЛСК в энергетической промышленности, в частности, на примере котельной, где технологический процесс производства тепловой энергии имеет высокую степень пожаро- и взрывоопасности. Вероятность возникновения аварийных техногенных ситуаций на таких объектах сильно возрастает, поэтому необходимо предусмотреть ряд конструктивных мероприятий, необходимых для предотвращения последствий катастрофы и снижения риска разрушения несущих конструкций здания.

В настоящее время в практике строительства проектирование легкобрасываемых наружных ограждающих конструкций является единственным способом защиты сооружений от негативных последствий взрыва внутри помещения.

**Ключевые слова:** легкобрасываемые конструкции, безопасность жизнедеятельности.

**Введение.** В современном мире многократно выросла угроза возникновения аварий и других происшествий, в которых человеческий фактор играет далеко не последнюю роль. Так называемые техногенные катастрофы и бедствия всегда возникали по вине человека, являясь результатом сочетания двух факторов: организационные недостатки и развивающиеся технологии [1–3]. Причин таких катастроф можно выделить множество: качество подготовки кадров; халатность на производстве; использование устаревшего оборудования; нарушение норм при производстве работ; отсутствие прогнозирования внешних обстоятельств, например, урагана, сильного ливня с грозами или других факторов природного характера. Кроме того, нельзя игнорировать и пресловутый человеческий фактор [4–7].

Последствия таких катастроф могут быть чудовищными [8, 9]. В первую очередь, это гибель людей. Например, в конце ноября 2021 года в производственном здании завода по изготовлению взрывчатого вещества октоген в Нижегородской области произошли четыре взрыва, которые привели к пожару и обрушению несущих конструкций здания. Площадь возгорания составила более пятидесяти квадратных метров, пострадали работники завода. В марте 2024 года на ТЭЦ

в Туве произошел техногенный взрыв в здании котельной, пострадали 23 человека. В июне 1974 года на одном из химических предприятий г. Фликсборо, Великобритания произошел взрыв парового облака циклогексана, что в последствии привело к крупному пожару и гибели людей [10].

Нельзя также забывать о том, какие последствия для здоровья человека могут вызывать подобные катастрофы: болезни органов дыхания, онкологические заболевания, ожоги, посттравматический стресс. Например, в декабре 1984 года на территории завода в Индии, который занимался производством инсектицидов, произошел взрыв, в результате которого в воздух было выброшено сорок пять тонн газообразного метилизоцианата [10]. Это привело к гибели более трех тысяч человек только в день аварии, а в последствии погибло еще около двадцати тысяч. Всего от воздействия отравляющего газа пострадало около пятисот тысяч не в чем неповинных граждан. Кроме того, в результате некачественного устранения последствий аварии, химические стоки ушли в водные запасы страны, что привело к росту заболеваемости среди населения онкологическими болезнями.

Любые катастрофы, а тем более техногенные, влекут за собой достаточно серьезные экономические последствия: уменьшение числа основных производственных механизмов в результате их полного или частичного уничтожения; уменьшение использования трудовых ресурсов и численности работающего населения; ухудшение жизненного уровня населения; расходы государства на преодоление чрезвычайных ситуаций; косвенные потери и ущерб от упущенной выгоды в области материального производства и предоставления услуг.

К немаловажным негативным последствиям техногенных катастроф следует относить экологический ущерб. Загрязнение воздуха, водоемов, верхнего плодородного слоя земли. Все это является последствиями разлива или выброса химических веществ во время взрыва, негативный эффект от которых может сохраняться в течение продолжительного периода времени.

Учитывая вышесказанное, следует отметить, что одной из главных задач государства является обеспечение безопасности граждан. Большинство техногенных аварий можно либо предотвратить, либо предусмотреть комплекс мер, который помог бы сократить ущерб, если катастрофа неизбежна. Это особенно актуально для взрывоопасных производств различных промышленных предприятий.

Для обеспечения безопасной жизнедеятельности обслуживающего персонала в зданиях и сооружениях со взрывоопасным производством предполагается применение легкобрасываемых конструкций (ЛСК), которые разрушаются при взрыве [11–13]. В данном случае техническое решение предполагает устройство во внешнем ограждении помещения проемов, заполненных легкоразрушающимися или легкооткрываемыми конструкциями. Это решение защитит помещение во время аварии: в случае возникновения взрыва в помещении образуются открытые проемы, через которые происходит выброс избыточного давления [14–16]. Подобное решение позволит сохранить дорогостоящее оборудование и несущие конструкции всего здания, а следовательно, его целостность.

В противном случае взрывная волна, не найдя выхода, будет направлена на конструктивные элементы здания, что может привести к полному разрушению всего сооружения и гибели людей. По своей сути легкобрасываемые конструкции представляют собой внешние конструкции сооружения, несущие на себе функцию защиты помещения от взрывной волны. Данные конструкции способствуют резкому снижению

атмосферного давления в момент взрыва, которое образуется в процессе высвобождения газов и других горючих смесей в помещении.

Взрывоопасные помещения, не оснащенные специализированными легкобрасываемыми конструкциями, будут лишены возможности защитить свои внутренние и наружные конструкции. При использовании обычных оконных конструкций взрывная волна в большинстве случаев не выбивает стекло и направляет всю свою силу на несущие элементы здания.

Главным образом, легкобрасываемые конструкции получили широкое распространение в зданиях нефтегазовой, химической и энергетической промышленности, а также в торговых центрах в местах скопления большого количества людей. Последнее тесно связано с угрозой безопасности людей во время террористической атаки.

Во время производственного процесса всегда возникает достаточно высокий риск возгорания, а затем взрыва. Именно поэтому следует предусмотреть мгновенное высвобождение избыточного давления и различных непригодных для дыхания человека газов. Возможность предотвратить большие материальные и человеческие потери и дают легкобрасываемые конструкции.

На сегодняшний день различают три варианта применяемых легкобрасываемых конструкций:

1. Разрушающиеся ЛСК. К ним относятся, так называемые, глухие окна. В такой конструкции во время взрыва высокое избыточное давление приводит к выпадению основной части конструкции. Использование глухих окон с разрушаемым заполнением в качестве ЛСК дает возможность получить достаточно простое и наиболее удобное конструктивное решение: оно не только будет отвечать всем требованиям по освещенности и теплоизоляции помещения, но и позволит значительно снизить давление во время внутреннего аварийного взрыва. Чтобы увеличить эффективность глухого остекления при вскрытии, рекомендуется выполнять его одинарным. На размер и толщину остекления влияет ветровая нагрузка. При использовании стекол с разрушаемым заполнением в качестве ЛСК важно помнить об опасности осколков, которые образуются при разрушении стекла. Эти осколки представляют опасность для людей, находящихся возле оконных проемов взрывоопасного помещения.

2. Вращающиеся ЛСК. К ним относятся двери, ворота, окна, открывающиеся наружу. В них при воздействии избыточного давления конструкция начинает вращаться вокруг горизонтальной и вертикальной осей, тем самым давая

выход взрывной волне. При устройстве таких ЛСК следует отдавать предпочтение более удобным в эксплуатации окнам, в механизме створок которых присутствует вертикальный или горизонтальный шарнир. В некоторых исключительных случаях технологическими требованиями может быть предусмотрено использование в качестве ЛСК дверей и ворот. В некоторых случаях в качестве ЛСК можно использовать ограждающие стеновые панели и конструкции покрытия за счет их поворота. Однако, очень важно, чтобы вращающиеся легкобрасываемые конструкции были запроектированы таким образом, чтобы они не вскрывались от действия ветровых нагрузок. В некоторых случаях поворотные ЛСК могут оказаться более предпочтительным вариантом, чем решения, предусматривающие вскрытие сбросного проема за счет смещения ЛСК.

3. Сбрасываемые или смещаемые ЛСК. К ним относятся внешние стеновые панели, облегченные плиты покрытия, оконные блоки. Здесь первостепенное значение будет иметь техническое решение узлов, которые при минимальной взрывной нагрузке обеспечат сбрасываемость панелей. То есть в таких ЛСК при воздействии давления разрушаются элементы конструкции, удерживающие ее в обычном положении.



Рис. 1. Здание котельной

В настоящее время в практике строительства проектирование легкобрасываемых наружных ограждающих конструкций является единственным способом защиты сооружений от негативных последствий взрыва внутри помещения. Следует отметить, что наиболее эффективными конструкциями для этого считаются остекленные участки внешних несущих стен. Эффективность такого остекления в качестве ЛСК во многом будет зависеть от размеров самого стекла и способа крепления.

**Методика расчета.** В методике расчета площади ЛСК, как и в любой другой, приняты некоторые допущения и предпосылки:

Правильная эксплуатация легкобрасываемых конструкций предполагает соблюдение некоторых требований:

1. следует регулярно (раз в полгода) проводить контроль состояния разрушающихся при взрыве элементов узлов крепления;
2. техническое обслуживание узлов крепления должно осуществляться только обученным персоналом;
3. в процессе эксплуатации не следует подвергать рабочие поверхности узлов крепления деталей загрязнению и повреждению;
4. на потенциально опасные участки в зоне эксплуатации конструкций доступ людей должен быть ограничен

В данной статье рассмотрим вариант применения ЛСК в энергетической промышленности, в частности, на примере котельной, расположенной в Воронежской области (рис. 1). Поскольку технологический процесс производства тепловой энергии имеет высокую степень пожаро- и взрывоопасности, вероятность возникновения аварийных техногенных ситуаций сильно возрастает. В этой связи необходимо предусмотреть ряд конструктивных мероприятий, необходимых для предотвращения последствий катастрофы и снижения риска разрушения несущих конструкций здания.



1. газовая смесь равномерно заполняет весь объем помещения с концентрацией близкой к стехиометрической;
2. пламя при горении смеси распространяется по горючей среде;
3. до тех пор, пока не произойдет вскрытие легкобрасываемой конструкции давление в помещении повышается как в замкнутом объеме;
4. предполагается, что при достижении в помещении допустимого избыточного давления  $\Delta P_{\text{доп}}$  легкобрасываемые конструкции разрушаются мгновенно;
5. предполагается, что процесс выхода газов через образовавшиеся при взрыве проемы имеет адиабатический характер.



**Основная часть.** Целью исследования является определение площадей ЛСК в здании котельной для проверки соответствия нормам и требованиям взрывобезопасности.

Объектом, представленного в статье исследования, стало здание котельной размерами в плане  $a_{\text{п}} \times b_{\text{п}} = 19,715 \times 15,100$  м, высотой  $h_{\text{п}} = 10$  м, расположенное в Воронежской области. Геометрический объем объекта обследования составил:  $V_{\text{пом}} = a_{\text{п}} \times b_{\text{п}} \times h_{\text{п}} = 2976,965 \text{ м}^3$ . Технологическое оборудование котельной расположено на уровне пола и работает на природном газе. Освещение в помещении имеет искусственное и естественное происхождение. Здание было введено в эксплуатацию в 1955 году. Стены кирпичные, кровля выполнена из асбестоцементных волнистых листов по верх несущих металлических ферм.

Согласно [17] огнестойкость здания соответствует II степени, предел огнестойкости несущих строительных конструкций составляет R90, наружных несущих стен – E15, покрытия – R15. В соответствии с требованиями [18], помещение котельной по взрывопожарной и пожарной опасности относится к категории А.

Ограждающие конструкции здания (кровля и наружные стены) испытывают значительное циклическое воздействие суточного и сезонного изменения температуры наружного воздуха. Воздействию атмосферных осадков подвергаются наружные поверхности стен и, в большей степени, конструкция кровли. В случае протечек в кровле конструкции здания могут увлажняться, в них возможно развитие коррозионных процессов, а при отрицательных температурах в наружных конструкциях – выветривание с разрушением материалов и ослаблению лакокрасочного покрытия. Строительные конструкции подвергаются воздействию твердой среды в виде пыли, загрязняющей атмосферу (взвешенные вещества), которая осаждается на их наружной поверхности и на покрытиях пола.

В помещениях, где находятся котлы и газоиспользующее оборудование возможно образование взрывоопасной концентрации воздушной среды. В качестве легкосбрасываемых конструкций предполагается использовать оконные проемы, площадь которых должна быть не менее площади ЛСК, которую следует производить согласно рекомендациям [19].

Необходимая площадь открытых проемов в наружном ограждении взрывоопасного помещения определяется по формуле:

$$S_{\text{лск}}^{\text{мин}} = \frac{0,105 U_{\text{н.р}} \alpha (\varepsilon_{\text{с}} - 1) \beta_{\mu} K_{\text{ф}}^3 \sqrt{V_{\text{св}}^2 \rho_0}}{\sqrt{\Delta P_{\text{доп}}}} = \frac{0,105 \cdot 0,154 \cdot 8,83 (7,55 - 1) 1 \cdot 1^3 \sqrt{2381,6^2 \cdot 1,14}}{\sqrt{5}} = 79,64 \text{ м}^2,$$

где  $U_{\text{н.р}} = 0,55 U_{\text{нmax}} = 0,55 \cdot 0,28 = 0,154$  м/с – расчетная нормальная скорость распространения пламени;  $\alpha = 0,6 \cdot 6,88 + 0,4 \cdot 11,76 = 8,83$  – показатель интенсификации взрывного горения;  $\varepsilon_{\text{с}} = 0,5 (\varepsilon_{\text{снкпр}} + \varepsilon_{\text{сmax}}) = 0,5 (6,0 + 9,1) = 7,55$  – расчетная степень сжатия продуктов горения при взрыве в замкнутом объеме;  $\beta_{\mu} = 1$  – коэффициент, учитывающий степень заполнения объема помещения взрывоопасной смесью;  $K_{\text{ф}} = 1,5$  – коэффициент, учитывающий влияние формы помещения и эффект истечения продуктов горения взрывоопасной ГС;  $V_{\text{св}} = V_{\text{пом}} (1 - 0,01 \theta_3) = 2976,965 (1 - 0,01 \cdot 20) = 2381,6 \text{ м}^3$  – свободный объем помещения;  $\rho_0 = 1,14 \text{ кг/м}^3$  – расчетная плотность газа в помещении перед воспламенением смеси;  $\Delta P_{\text{доп}} = 5 \text{ кПа}$  – допустимое избыточное давление в помещении; характеристики горючей смеси принимаются по таблице прил. 2 [19]:  $\rho_{\text{max}} = 1,13 \text{ кг/м}^3$ ;

$\varepsilon_{\text{рmax}} = 7,6$ ;  $\varepsilon_{\text{сmax}} = 9,1$ ;  $U_{\text{нmax}} = 0,28 \text{ м/с}$ ;  $\rho_{\text{нкпр}} = 1,15 \text{ кг/м}^3$ ;  $\varepsilon_{\text{рнкпр}} = 5,0$ ;  $\varepsilon_{\text{снкпр}} = 6,0$ .

Общая площадь существующих оконных проемов на двух фасадах котельной составляет  $72,96 \text{ м}^2$ , что меньше требуемой  $79,64 \text{ м}^2$ . Таким образом, расчеты показали, что обеспечить требуемую площадь остекления в качестве ЛСК не представляется возможным. Согласно [20], при недостаточной площади остекления допускается в качестве ЛСК использовать конструкции покрытий из стальных, алюминиевых и асбестоцементных листов (шифер), поэтому для снижения избыточного давления взрыва было принято решение рассмотреть в качестве ЛСК конструкцию кровли. Материал кровли – асбестоцементные листы, уложенные поверх несущих металлических ферм.

Коэффициент вскрытия определяем по формуле:

$$K_{\text{вскр}}^{\text{лск}} = \frac{S_{\text{откр.тр}} (a_{\text{лск}} + b_{\text{лск}}) \Delta p_{\text{вскр}} K_{\text{с.м}} K_{\text{з.п}}}{K_{\text{н.в}} \alpha^3 U_{\text{н.р}}^3 \sqrt{\rho_0} M_{\text{лск}}} = \frac{79,64 (1,2 + 0,68) 3,15 \cdot 0,333 \cdot 1}{1,598 \cdot 8,83^3 \cdot 0,154^3 \sqrt{1,14} \cdot 174,68} = 0,210,$$

где  $a_{\text{лск}}, b_{\text{лск}}$  – размеры одного элемента ЛСК;  $\Delta p_{\text{вскр}} = 3,15 \text{ кПа}$  – избыточное давление в



помещении, при котором происходит вскрытие ЛСК;  $K_{с.м} = 0,333$  – коэффициент, учитывающий влияние собственной массы ЛСК;  $K_{з.п} = 1$  – коэффициент, учитывающий заужение проема при вскрытии;  $K_{н.в}$  – коэффициент формирования взрывной нагрузки на конструкции, определяется методом линейной интерполяции по табл. 6 [19];  $M_{лск} = 174,68\text{ кг}$  – масса ЛСК с учетом снеговой нагрузки.

Полученные результаты свидетельствуют о недостаточно высокой эффективности вскрытия ЛСК в том случае, если очистка покрытия взрывоопасного помещения от снега не производится. Требуемая площадь ЛСК в соответствии нормам и требованиям взрывобезопасности на обследуемом объекте составляет:

$$S_{лск} \geq \frac{79,64}{0,210} = 379,24 \text{ м}^2.$$

Поскольку площадь всей кровли, рассмотренного взрывоопасного помещения, гораздо меньше требуемой и составляет  $297,7 \text{ м}^2$ , использование ее в качестве легкосбрасываемой конструкции не представляется возможным.

**Выводы.** Расчеты показали, что для эффективной работы легкосбрасываемых конструкций следует использовать оконные проемы и кровлю котельной совместно, поскольку площади тех же оконных проемов или кровли отдельно будет недостаточно для обеспечения пожарной безопасности при взрыве.

При этом использовать существующее кровельное покрытие в качестве ЛСК можно только после создания условий для его своевременного вскрытия при взрыве за счет оснащения специальными устройствами крепежа и запоров. Снаружи оконных проемов для соблюдения техники безопасности необходимо предусмотреть меры, предотвращающие разбрасывание осколков стекол.

**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. Кочергин А.Н. Техносфера и общество: проблем взаимодействия // Научный вестник МГТУ ГА. 2016. № 166. С. 32–39.
2. Шаповалова И.С. Техносфера России: проблемы развития и риски // Вестник института социологии. 2016. № 18. С. 112–137.
3. Якупов А.М. Среда обитания людей и «поля опасностей» в ней // Вестник НЦ БЖД. 2017. № 4 (18). С. 91–100.
4. Серых И.Р., Чернышева Е.В. Промышленная безопасность при техническом перевооружении опасного производственного объекта на примере литейного цеха // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 5. С. 35–41. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-35-41
5. Чернышева Е.В., Серых И.Р., Стаинов В.В., Чернышева А.С. Актуальные проблемы промышленной безопасности / Zbornik radova: visoka tehnička škola strukovnih studija. Niš. Serbia. 2016. December. Pp. 164–165.
6. Дегтярь А.Н., Серых И.Р., Чернышева Е.В., Панченко Л.А. Экспертиза промышленной безопасности здания насосной нефтебазы Белгородской области с целью оценки ее остаточного ресурса // Безопасность в строительстве: матер. III Междунар. науч.-практ. конф., (Санкт-Петербург, 23–24 ноября 2017 г.), СПб.: изд-во СПбГАСУ, 2017. С. 41–45.
7. Серых И.Р., Чернышева Е.В., Дегтярь А.Н., Черноситова Е.С., Чернышева А.С. Экспертиза промышленной безопасности здания цеха ВЖС Шебекинского химического завода с целью оценки технического состояния конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 9. С. 55–61. DOI: 10.12737/article\_5bab4a1cacc902.46271253.
8. Беззубцев-Кондаков А.Е. Почему это случилось? Техногенные катастрофы в России. Изд-во: Питер, 2010. 288 с.
9. Арнольд В.И. Теория катастроф. 5-е изд. М.: Едиториал УССР, 2009. 136 с.
10. Катастрофы конца XX века. Министерство РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Центр стратегических исследований гражданской защиты; под ред. В.А. Владимирова. 2-е изд., перераб. Москва. Изд-во Геополитика., 2001. 423 с.
11. Касперов Г.И., Полевода И.И., Миканович А.С. Расчет площади разрушаемых легкосбрасываемых конструкций // Вестник командно-инженерного институту МЧС Республики Беларусь. 2005. № 2(2). С. 64–69.
12. Попов А.П., Мороз А.Ю., Кувшинов Д.С. Современные проблемы легкосбрасываемых конструкций на взрывоопасных объектах // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 4-1. С. 142–144.
13. Чикин А.Ю., Лавыгина О.Л., Кузнецова О.Н., Степанов И.Г. Разработка предложений по модернизации легкосбрасываемых оконных конструкций при их использовании на взрывоопасных объектах. Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. Т. 10. № 4 (35). С. 610–617.

14. Корольченко О.Н., Корольченко А.Д. Определение давления вскрытия легкобрасываемых конструкций с учетом ветровых нагрузок // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 7. С. 914–921.

15. Горев В.А., Корольченко А.Д. Влияние легкобрасываемых конструкций на избыточное давление при взрыве в помещении // Пожаро-взрывобезопасность 2022. Т. 31. № 3. С. 12–23.

16. Горев В.А., Челекова Е.Ю., Лещёв Н.В. Об эффективности легкобрасываемых конструкций, расположенных в покрытии // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 5. С. 7–14.

17. 123-ФЗ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.

18. СП 2.13130.2012 Обеспечение огнестойкости объектов защиты.

19. Расчет параметров легкобрасываемых конструкций для взрывопожарных помещений промышленных объектов. Рекомендации. М.: ВНИИПО, 2015. 48 с.

20. Федеральный закон от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.

Информация об авторах:

**Серых Инна Робертовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: inna\_ad@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Чернышева Елена Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры стандартизации и управления качеством. E-mail: bellena\_74@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Серых Валерия Дмитриевна**, бакалавр. E-mail: luruler44@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, корп. 1

Поступила 28.09.2024 г.

© Серых И.Р., Чернышева Е.В., Серых В.Д., 2025

<sup>1,\*</sup>Serykh I.R., <sup>1</sup>Chernyshova E.V., <sup>2</sup>Serykh V.D.

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

<sup>2</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering

\*E-mail: inna\_ad@mail.ru

## EASILY REMOVABLE STRUCTURES FOR BOILER ROOM

**Abstract.** In the modern world, the threat of accidents and other incidents has grown many times over, in which the human factor plays an important role. The so-called man-made disasters and disasters have always arisen through human fault, being the result of a combination of two factors: organizational shortcomings and developing technologies.

Most man-made accidents can either be prevented, or a set of measures can be envisaged that would help reduce damage if a disaster is inevitable. This is especially true for explosive industries of various industrial enterprises.

To ensure the safe life of service personnel in buildings and structures with explosive production, it is planned to use easily removable structures (LSC), which are destroyed by an explosion.

The article discusses the option of using LSC in the energy industry, in particular, at the boiler house, where the technological process of thermal energy production has a high degree of fire and explosion hazard. The probability of emergency man-made situations at such facilities greatly increases, therefore, it is necessary to provide for a number of design measures necessary to prevent the consequences of the disaster and reduce the risk of destruction of the supporting structures of the building.

Currently, in construction practice, the design of easily removable external fencing structures is the only way to protect structures from the negative consequences of an explosion indoors.

**Keywords:** easily removable structures, life safety.

## REFERENCES

1. Kochergin A.N. Technosphere and society: interaction problems [Tekhnosfera i obshchestvo:

problem vzaimodejstviya]. Scientific Bulletin of MSTU GA. 2016. No. 166. Pp. 32–39. (rus)

2. Shapovalova I.S. Technosphere of Russia: development problems and risks [Tekhnosfera Rossii: problemy razvitiya i riski]. Bulletin of the Institute of Sociology. 2016. No. 18. Pp. 112–137. (rus)
3. Yakupov A.M. Human habitat and "danger fields" in it [Sreda obitaniya lyudej i «polya opasnostej» v nej]. Bulletin of NC BZD. 2017. No. 4 (18). Pp. 91–100. (rus)
4. Seryh I.R., Chernysheva E.V. Industrial safety during technical re-equipment of a hazardous production facility at the foundry facility [Promyshlennaya bezopasnost' pri tekhnicheskom perevooruzhenii opasnogo proizvodstvennogo ob"ekta na primere litejnogo cekha]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 5. Pp. 35–41. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-35-41. (rus)
5. Chernysheva E.V., Seryh I.R., Statinov V.V., Chernysheva A.S. Current industrial safety issues [Aktual'nye problemy promyshlennoj bezopasnosti]. Zbornik radova: visoka tehnička škola strukovnih studija. Niš. Serbia. 2016. December. Pp. 164–165.
6. Degtyar A.N., Seryh I.R., Chernysheva E.V., Panchenko L.A. Industrial Safety Expert Review of the Belgorod Oblast Pump House Building to Assess its Residual Resources. [Ekspertiza promyshlennoj bezopasnosti zdaniya nasosnoj neftebazy Belgorodskoj oblasti s cel'yu ocenki ee ostatochnogo resursa]. Safety in construction: materials of the III International Scientific and Practical Conference. SPb.: Publishing House SPbGASU. 2017. Pp. 41–45. (rus)
7. Seryh I.R., Chernysheva E.V., Degtyar A.N., Chernositova E.S., Chernysheva A.S. Industrial safety expert review of the building of the WBS shop of the Shebekinsky chemical plant in order to assess the technical condition of the structures [Ekspertiza promyshlennoj bezopasnosti zdaniya cekha VZhS Shebekinskogo himicheskogo zavoda s cel'yu ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya konstrukcij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 9. Pp. 55–61. DOI: 10.12737/article\_5bab4a1cacc902.46271253. (rus)
8. Bezzubcev-Kondakov A.E. Why did this happen? Man-made disasters in Russia [Pochemu eto sluchilos'? Tekhnogennye katastrofy v Rossii.]. Publishing House: Peter. 2010. 288 p. (rus)
9. Arnol'd V.I. Catastrophe theory. [Teoriya katastrof]. 5th ed. M.: Editorial of the Ukrainian SSR. 2009. 136 p. (rus)
10. Vladimirov V.A. Disasters of the late XX century [Katastrofy konca XX veka]. Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Management, Center for Strategic Studies of Civil Protection; ed. V.A. Vladimirova. 2nd ed., Pererab. Moscow. Publishing house Geopolitics. 2001. 423 p. (rus)
11. Kasperov G.I., Polevoda I.I., Mikanovich A.S. Calculation of the area of destructible easily removable structures [Raschet ploshchadi razrushaemyh legkosbrasyvaemyh konstrukcij]. Bulletin of command and engineering institute of the Ministry of Emergency Situations of Republic of Belarus. 2005. No. 2 (2). Pp. 64–69. (rus)
12. Popov A.P., Moroz A.Yu., Kuvshinov D.S. Modern problems of easily removable structures at explosive objects [Sovremennye problemy legkosbrasyvaemyh konstrukcij na vzryvoopasnyh ob"ektah]. Topical problems of the humanities and natural sciences. 2016. No. 4-1. Pp. 142–144.
13. Chikin A.Yu., Lavygina O.L., Kuznecova O.N., Stepanov I.G. Development of proposals for modernization of easily expandable window structures when they are used in explosive facilities [Razrabotka predlozhenij po modernizacii legkosbrasyvaemyh okonnyh konstrukcij pri ih ispol'zovanii na vzryvoopasnyh ob"ektah]. News of universities. Investments. Construction. Real estate. 2020. Vol. 10. No. 4. Pp. 610–617. (rus)
14. Korol'chenko O.N., Korol'chenko A.D. Determination of the opening pressure of easily jettison structures considering wind loads [Opredelenie davleniya vskrytiya legkosbrasyvaemyh konstrukcij s uchetom vetrovyh nagruzok]. Bulletin of MGSU. 2022. Vol. 17. No. 7. Pp. 914–921. (rus)
15. Gorev V.A., Korol'chenko A.D. Impact of easily jettison structures on overpressure in case of explosion in the room [Vliyanie legkosbrasyvaemyh konstrukcij na izbytochnoe davlenie pri vzryve v pomeshchenii]. Fire and explosion safety. 2022. Vol. 31. No. 3. Pp. 12–23. (rus)
16. Gorev V.A., Chelekova E.Yu., Leshchyov N.V. On the efficiency of easily removable structures located in the coating [Ob effektivnosti legkosbrasyvaemyh konstrukcij, raspolozhennyh v pokrytii]. Industrial safety. 2023. No. 5. Pp. 7–14. (rus)
17. 123-FZ Technical regulations on fire safety requirements. (rus)
18. SP 2.13130.2012 Provision of fire resistance of protected facilities. (rus)
19. Calculation of parameters of easily jettison structures for explosion and fire rooms of industrial facilities. Recommendations. M.: VNIPO. 2015. 48 p. (rus)
20. Federal Law of July 22, 2008 N 123-FZ Technical Regulations on Fire Safety Requirements. (rus)

*Information about the authors*

**Serykh, Inna R.** PhD, Assistant professor. E-mail: inna\_ad@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Chernyshova, Elena V.** PhD, Assistant professor. E-mail: bellena\_74@mail.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Serykh, Valeriya D.** Bachelor student. E-mail: luruler44@gmail.com. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26.

---

*Received 28.09.2024*

**Для цитирования:**

Серых И.Р., Чернышева Е.В., Серых В.Д. Легкосбрасываемые конструкции для помещения котельной // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 9. С. 8–15. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-8-15

**For citation:**

Serykh I.R., Chernyshova E.V., Serykh V.D. Easily removable structures for boiler room. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 9. Pp. 8–15. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-8-15

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-16-23

Аль-Сабаеи А.К., Абсиметов В.Э.

Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова

\*E-mail: kacem90@bk.ru

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ОБРАЗЦОВ УЗЛОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

**Аннотация.** В современных строительных конструкциях стальные балки играют ключевую роль, обеспечивая прочность и устойчивость зданий и сооружений. Узлы опирания, соединяющие балки и колонны, представляют собой критически важные элементы, которые должны справляться с различными механическими нагрузками, включая статические и динамические воздействия. При этом усиление таких узлов становится важной задачей для обеспечения долговечности и безопасности конструкций. Динамические нагрузки, возникающие от воздействия сейсмических колебаний, ветровых нагрузок или вибраций, требуют тщательного анализа. Эти нагрузки могут приводить к неожиданным деформациям и разрушениям, особенно если не учитывать остаточные сварочные напряжения, возникающие в процессе соединения элементов конструкции. Остаточные напряжения могут оказывать значительное влияние на прочность узлов, изменяя их реальную несущую способность и устойчивость. Учитывая вышеизложенное, целью данного исследования является экспериментальное моделирование работы узлов опирания стальных балок на колонны после усиления, с акцентом на влияние остаточных сварочных напряжений при воздействии динамически нагрузок. Исследование включает в себя создание различных моделей при усилении узлов, испытания их на прочность и анализ поведения под динамическими воздействиями.

**Ключевые слова:** динамическая нагрузка, усиления, экспериментальное исследование, рамные узлы, металлоконструкции, прочность, испытательная машина.

### Введение

Целью эксперимента было изучение влияние уровня остаточных сварочных напряжений на несущую способность рамных узлов строительных металлоконструкций до усиления и при различных вариантах усиления:

Первый вариант, установка горизонтальных накладок (рис. 1), второй вариант установка горизонтальных накладок, приварке уголка на верхний наладке и установка вертикального ребра на уголке. Предполагаемая нагрузка для всех образцов динамическая.

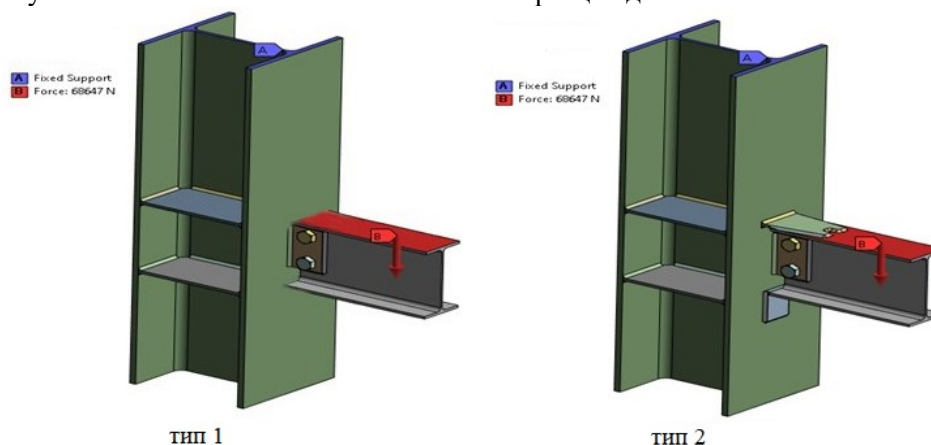


Рис. 1. Расчетная схема образцов и характер нагружения

Для изучения влияния уровня остаточных сварочных напряжений в эксперименте варьировали две высоты катета сварного шва 6 и 8 мм, для рассматриваемых схем образцов (рис.1 тип 1 и тип 2).

Выбор данных размеров сварных швов 6 и 8мм обоснован теоретическим расчетом при моделировании образцов рамных узлов с использованием программного обеспечения Ansys [1]

Для оценки надежности сварных швов малых катетов при их использовании для усиленных рамных узлов строительных металлоконструкций, испытывающих динамические нагрузки целесообразно проведение экспериментальных исследований.

Заслуживают внимания многоцикловые нагрузки, имитирующие динамические нагрузки. Это позволяет выявить, как такие швы обеспечивают себя при многократных приложениях

нагрузок, что особенно важно для конструкций, продолжительности колебаний циклических или циклических изменений нагрузки.

Динамические нагрузки может привести к накоплению усталостных повреждений, даже если на первый взгляд соединение выглядит прочным. Для проверок усталостной прочности сварных швов с малыми катетами следует провести серию усталостных испытаний, чтобы оценить их способность сохранять микротрещины и их удлинение при многократных циклических нагрузках. Также необходимо учитывать, срок их эксплуатационной надежности [2, 3].

Для того чтобы объективно оценить эффективность применения сварных швов с малыми катетами, необходимо провести сравнительные испытания с другими методами усиления рамных узлов. Например, можно сравнить их с использованием накладок, болтовых соединений или других типов сварных швов. Важная оценка того, какой из методов обеспечивает наибольшую устойчивость и длительность эксплуатации после усиления рамных узлов строительных металлоконструкций [4–7].

На основании этих условий можно сделать вывод, что использование сварных швов малых катетов для усиления рамных узлов строитель-

ных металлоконструкций, получаемых в условиях динамические нагрузки, является целесообразным, если такие швы продемонстрировали хорошие результаты по усталостной прочности, и циклической долговечности.

Ожидается, что результаты данного исследования окажут существенное влияние на проектирование и эксплуатацию стальных конструкций, предоставив новые данные о надежности узлов опирания, испытывающих динамические нагрузки, и дадут рекомендации по их усилению; эти данные могут быть использованы как в научной среде, так и в практическом строительстве, что будет способствовать повышению безопасности зданий и сооружений в условиях динамических нагрузок.

**Методы исследования.** Испытательная машина INSTRON 8801 – это высокотехнологичное устройство, предназначенное для проведения механических испытаний различных материалов и конструкций. - Нагрузочная способность: до 100 кН, что делает её подходящей для работы с различными материалами, от полимеров до металлов. Она используется в научных исследованиях, а также в промышленности для оценки прочности, жесткости и других механических характеристик материалов как показано на рис. 2. [8–10].

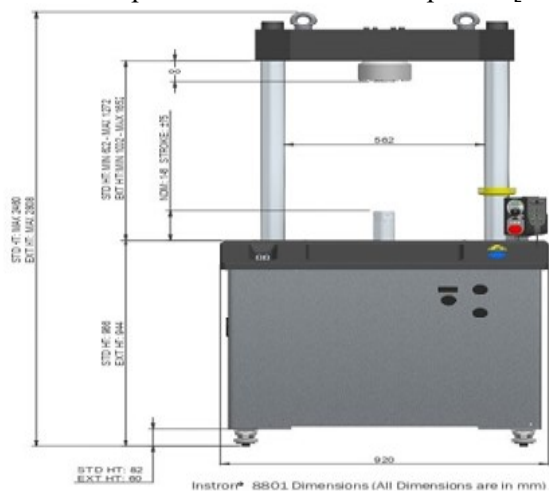


Рис. 2. Испытательная машина INSTRON 8801

### Вид нагрузки

В эксперименте было использовано динамические нагрузки. Динамические нагрузки – это испытание металлоконструкций, при котором конструкция подвергается многократному приложению статической нагрузки, имитируя условия эксплуатации, в течение которых на конструкцию воздействуют повторяющиеся нагрузки, например, от ветра, веса оборудования, температуры или других факторов [11–15].

Прочность образцов при динамические нагрузки зависит от наличия концентраторов в соединениях, свойств материала и качества сварных соединений, Целью таких испытаний явля-

ется проверка прочности и деформативности металлоконструкций, а также выявление возможных повреждений или ухудшения её характеристик после многократного воздействия нагрузки.

Испытания проводились на универсальной испытательной машине INSTRON 8801, оборудованной датчиком усилия, способным измерять нагрузки до 100 кН. Перед началом испытаний датчик был надежно прикреплен к нижней (подвижной) траверсе. Это обеспечивало точность и стабильность измерений. Важным этапом подготовки являлось балансирование нагрузки на машине, а также установка ограничителей как по нагрузке, так и по перемещению траверсы. Эти



меры необходимы для предотвращения случайных перегрузок и обеспечения безопасности во время испытаний. Все образцы подвергались испытаниям при нагружении усилием 68646,55 Н (7 тонна).

Образцы были поделены на две группы по два образца в зависимости от способа усиления:

1) Образцы без усиления с катетом шва 6 мм и 8 мм (2 шт.)

2) Образцы после усиления с помощью накладок с катетом шва 6 мм и 8 мм (2 шт.)



Рис. 3. Образец № 3 с катетом швом 6 мм, образец № 4 с катетом швом 8 мм

После того как были сварены образцы и выбрана методика испытания начали проведение испытания.

#### Результаты исследований и обсуждения.

##### Образцы до усиления с катетом шва 6 мм и 8 мм (2 шт.)

Образец без усиления, с катетом шва 6 мм, был установлен на специальной площадке, которая жестко крепилась к бетонному основанию с помощью траверсы и анкерных балтов. Для повышения стабильности конструкции образец был надежно зафиксирован анкерными балтами, чтобы предотвратить любые нежелательные движения во время испытания. Затем нижняя тра-

верса подводилась к образцу до момента соприкосновения, после чего начинался процесс испытания [16–18].

Исследование продолжалось до тех пор, пока на образце не возникала видимая усталостная трещина, которую можно было наблюдать невооруженным глазом. Это критический момент, который сигнализирует о достижении предела прочности материала. После завершения испытания, фиксировались данные о количестве циклов до разрушения. Эти данные являются важными для анализа долговечности и надежности конструкции. Затем проводилась процедура замены образцов, установка образца с катетом шва 8 мм [19, 20].

#### Характер разрушения

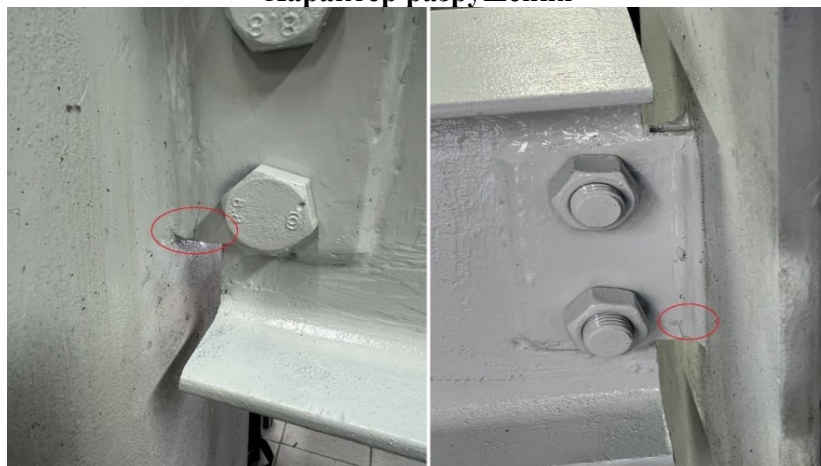


Рис. 4. Разрушения на образце с катетом шва 6 мм

Признаки усталостного разрушения на образце с катетом шва 6 мм наблюдаются на сварных швах, как показано на рисунке 4.

Разрушение первого типа образцов с высотой катета сварного шва 6 мм произошло при 166 циклах нагружения, в форме усталостной трещины сварному шву длиной 15 мм и шириной 0,5 мм.



Рис. 5. Разрушения на образце с катетом швам 8 мм

Признаки усталостного разрушения на образце с катетом швам 8 мм наблюдаются на сварных швах как показано на рисунке 5.

Разрушение первого типа образцов с высотой катета сварного шва 8 мм произошло при 94 циклах нагружения, в форме усталостной трещины сварному шву длиной 13 мм и шириной 0,6 мм.

Полученной результат так же коррелирует с результатами теоретического расчёта аналогичного узла, где количества циклов до разрушения составило 80 и место расположения усталостной трещины находится в зоне максимальных эквивалентных напряжений равных 1689,4 МПа.

Результаты испытания долговечности в деталях усиления показывают большее количество

Полученной результат коррелирует с результатами теоретического расчёта аналогичного узла, где количества циклов до разрушения составило 139 и место расположения усталостной трещины находится в зоне максимальных эквивалентных напряжений равных 1139 МПа.

циклов нагружения до появления признаков усталостного разрушения, на образцах с малыми катетами что подчеркивает важность учета тепловых деформаций материала в расчетах на прочность сварных соединений.

#### **Образцы после усиления с помощью накладок с катетом шва 6 мм и 8 мм (2 шт.)**

Для испытания второй группы образцов, соединение было усилено путем приваривания накладок. Образцы с катетом шва 6 мм и катетом шва 8 мм усиленные с помощью накладок были испытаны по той же схеме, как и образцы без усиления. Испытание так же проходило до момента появления видимой трещины. Далее выгружались данные о количестве циклов до разрушения.

#### **Характер разрушения**

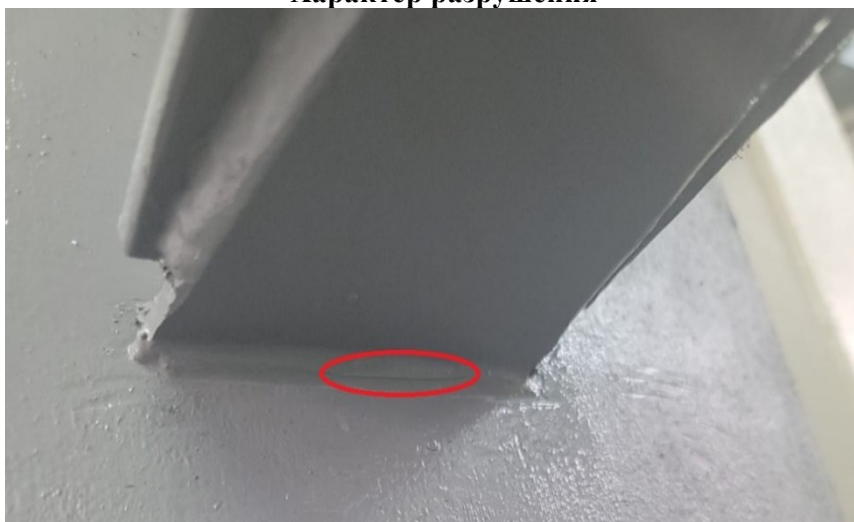


Рис. 6. Разрушения на образце с катетом шва 6 мм



Признаки усталостного разрушения на образце с катетом шва 6мм наблюдаются на сварных швах как показано на рисунке 6.

Разрушение второго типа образцов с высотой катета сварного шва 6мм произошло при 2836 циклах нагружения, в форме усталостной трещины сварному шву длиной 20мм и шириной 0,6мм.

Полученной результат коррелирует с результатами теоретического расчёта аналогичного узла, где количества циклов до разрушения составило 3082 и место расположение усталостной трещины находится в зоне максимальных эквивалентных напряжений равных 335,6 МПа.



Рис. 7. Разрушения на образце с катетом шва 8 мм

Признаки усталостного разрушения на образце с катетом шва 8мм наблюдаются на сварных швах как показано на рисунке 7.

Разрушение второго типа образцов с высотой катета сварного шва 8мм произошло при 1761 циклах нагружения, в форме усталостной трещины сварному шву длиной 16мм и шириной 0,6 мм.

Полученной результат коррелирует с результатами теоретического расчёта аналогичного узла, где количества циклов до разрушения составило 1943 и место расположение усталостной

трещины находится в зоне максимальных эквивалентных напряжений равных 382,4 МПа.

Результаты испытания долговечности в деталях усиления показывают большее количество циклов нагружения до появления признаков усталостного разрушения, на образцах с малыми катетами что также подтверждает вывод о большей несущей способности сварных соединений с малым катетом шва.

По окончании всех испытаний данные о количестве циклов до разрушения были сведены в таблице 1 для дальнейшего анализа.

Таблица 1

#### Результат экспериментальное исследование

сечения	Нагрузка, Н	Катет шва, мм	Количество циклов до разрушения
Образца до усиления			
18Б1х 25 К1	68646,55	6	166
18Б1х 25 К1	68646,55	8	94
Образца после усиления с помощью накладок			
18Б1х 25 К1	68646,55	6	2836
18Б1х 25 К1	68646,55	8	1761

#### Выводы.

Экспериментально подтверждено влияния уровня остаточных сварочных напряжений на усталостную прочность рамных узлов строительных металлоконструкций, усиленных под нагрузкой, заключающееся в выборе способов усиления зданий в ходе эксплуатации.

Обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность применения сварных

швов малых катетов при проведении работ по усилению рамных узлов строительных металлоконструкций, эксплуатируемых в условиях динамические нагрузки, при этом можно прогнозировать повышение их усталостной прочности до 30 %.

Из данного наблюдения можно сделать вывод, что уменьшение расхода наплавленного ме-

талла в швах сварных соединений, при проведении работ по усилению металлических конструкций способствует повышению их надежности и обеспечивает возможность получения оптимального проектного решения.

Кроме того, используя метод усиления металлоконструкции при помощи наращивания сечений, следует рекомендовать к применению сварные швы малых катетов, а при недостаточной площади сварного соединения увеличивать длину сварных швов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аль-Сабаеи А.К., Абсиметов В.Э. Оценка надёжности усиления рамных узлов строительных металлоконструкций при динамические нагрузки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №11. С. 16–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-33-41
2. Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. – М.: Стройиздат, 1979. 320 с.
3. Дзюба А.С., Липин Е.К. Оптимальное проектирование силовых конструкций минимального объема при ограничениях по прочности и устойчивости // Ученые записки ЦАГИ. 1980. Т. 11. № 1. С. 58–71.
4. Гинзбург А.В., Василькин А.А. Постановка задачи оптимального проектирования стальных конструкций // Вестник МГСУ. 2014. № 6. С. 52–62.
5. Морозова Д.В., Серова Е.А. Проблематика исследования напряженно-деформированного состояния узлов металлических конструкций // Вестник МГСУ. 2014. № 5. С. 44–50.
6. Doyle James F., Phillips James W. Manual on Experimental Stress Analysis. Fifth Edition. – Society for Experimental Mechanics, 2015 [Электронный ресурс]. – URL: <http://courses.washington.edu/me354a/photoelastic.pdf> (дата обращения 10.10.2015).
7. Горев В.В., Уваров Б.Ю., Филиппов В.В., Белый Г.И., Металлические конструкции. Конструкции зданий: Учеб. для строит, вузов, т. 2, Г. В.В., Ред., Москва: Высшая школа, 2002.
8. Dimitrescu A., Baci F. The Variation of the Fatigue Curve of Different Surface Preparation Technologies of Aluminum Alloys 6rd Symposium “Durability and Reliability of Mechanical Systems” 2013. Pp. 213–218.
9. Web-site: <http://www.instron.com> – accessed on 28.05.2016.
10. Zhang Y., Chen W., Yan H., Wang X., Zhang H., Wu S. The Effect of Atmospheric Chloride Ions on the Corrosion Fatigue of Metal Wire Clips in Power Grids, MDPI 2023. Pp. 237–251.
11. Вахромеев А.М. Определение циклической долговечности материалов и конструкций транспортных средств: метод. указания. М.: МАДИ, 2015. 64 с.
12. Трощенко В.Т., Хамаза Л.А. Усталость и циклическая неупругость аустенитной стали после длительной эксплуатации при различных режимах нагружения // Проблемы прочности. 2012. №5. С. 5–14.
13. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. Киев: Наукова думка, 1981. 344 с.
14. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. М.: Наука, 2015. 484 с.
15. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов. М.: Машиностроение, 1964. 275 с.
16. Абакумов Р.Г., Аль-Сабаеи А.К., Оценка уровня надежности вариантов усиления строительных металлоконструкций с использованием математической модели вероятности их безотказной работы // Вестник БГТУ. 2021. № 7. С. 44–50. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-7-44-50
17. Аль-Сабаеи, А.К., Обоснование методов усиления строительных металлоконструкций при динамических нагрузках // Сборник научных трудов 5-й Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров. Редколлегия: С.В. Дубраков (отв. ред.) [и др.]. Курск, 2021. С. 16–21.
18. Усталостная испытательная система модели 8801 [Электронный ресурс]. Электрон. дан. INSTRON, 2020. URL.: <https://www.instron.ru/ru-ru/products/testing-systems/dynamicand-fatigue-systems/servo-hydraulic-fatigue/8801-floor-model> (дата обращения: 28.03.20).
19. Аль-Сабаеи А.К. Расчет многоциклового усталости рамных узлов // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона» 2024. №2. [Электронный ресурс] // [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/9003](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/9003).
20. Аль-Сабаеи А.К., Абсиметов В.Э. Расчет НДС рамных узлов строительных металлоконструкций при их усилении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №4. С. 26–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-26-35

## Информация об авторах

**Аль-сабаеи Арафат Касем**, ассистент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: [kasem90@bk.ru](mailto:kasem90@bk.ru). Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

**Абсиметов Владимир Эскендерович**, доктор технических наук, профессор кафедры строительства и городского хозяйств. E-mail: absimetov57@mail.ru. Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

Поступила 10.12.2024 г.

© Аль-Сабаети А.К., Абсиметов В.Э., 2025

*Al-Sabaei A. Q., Absimetov V.E.*

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

*\*E-mail: kacem90@bk.ru*

## EXPERIMENTAL STUDY OF MODELS OF BUILDING METAL STRUCTURES UNDER DYNAMIC LOADS

**Abstract.** In modern building structures, steel beams play a key role, ensuring the strength and stability of buildings and structures. The support units connecting beams and columns are critical elements that must cope with various mechanical loads, including static and dynamic impacts. At the same time, strengthening such nodes becomes an important task to ensure the durability and safety of structures. Dynamic loads arising from the effects of seismic vibrations, wind loads or vibrations require careful analysis. These loads can lead to unexpected deformations and failures, especially if you do not take into account the residual welding stresses that occur during the connection of structural elements. Residual stresses can have a significant impact on the strength of the nodes, changing their actual bearing capacity and stability. Taking into account the above, the purpose of this study is to experimentally simulate the nodes of support of steel beams on columns after reinforcement, with an emphasis on the effect of residual welding stresses when exposed to dynamic loads. The research includes the creation of various models for strengthening nodes, testing their strength and analyzing behavior under dynamic influences.

**Keywords:** Dynamic load, reinforcement, experimental research, frame assemblies, metal structures, strength, testing machine.

### REFERENCES

1. Al-Sabaei A.K., Absimetov V.E. Assessment of the reliability of reinforcing frame units of building metal structures under repeated static loads [Ocenka nadyozhnosti usileniya ramnyh uzlov stroitel'nyh metallokonstrukcij pri povtorno staticheskikh nagruzheniyah]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 11. Pp. 16–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-33-41 (rus)
2. Lichtarnikov Ya.M. Variant design and optimization of steel structures [Variantnoe proektirovanie i optimizaciya stal'nyh konstrukcij]. M.: Stroyizdat, 1979. 320 p. (rus)
3. Dzyuba A.S., Lipin E.K. Optimal design of minimum volume power structures with strength and stability constraints [Optimal'noe proektirovanie silovyh konstrukcij minimal'nogo ob'ema pri ograničeniyyah po prochnosti i ustojchivosti]. Scientific notes of TsAGI. 1980. Vol. 11. No. 1. Pp. 58–71. (rus)
4. Ginzburg A.V., Vasilkin A.A. Formulation of the problem of optimal design of steel structures [Postanovka zadachi optimal'nogo proektirovaniya stal'nyh konstrukcij]. Bulletin of MGSU. 2014. No. 6. Pp. 52–62. (rus)
5. Morozova D.V., Serova E.A. Problematics of the study of the stress-strain state of nodes of metal structures [Problematika issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya uzlov metallicheskih konstrukcij]. Bulletin of MGSU. 2014. No. 5. Pp. 44–50. (rus)
6. Doyle James F., Phillips James W. Manual on Experimental Stress Analysis. Fifth Edition. Society for Experimental Mechanics, 2015 [Electronic resource]. URL: <http://courses.washington.edu/me354a/photoelas.pdf> (date of application 10.10.2015).
7. Gorev V.V., Uvarov B.Yu., Filippov V.V., Bely G.I. Metal structures. Building structures: Studies for constructs, universities [Metallicheskie konstrukcii. Konstrukcii zdaniy], vol. 2, G. V.V., Ed., Moscow: High School, 2002. 528 p. (rus)
8. Dimitrescu A and Baciu F. The Variation of the Fatigue Curve of Different Surface Preparation Technologies of Aluminum Alloys 6rd Symposium "Durability and Reliability of Mechanical Systems" 2013. p. 213–218.
9. Web-site: <http://www.instron.com> – accessed on 28.05.2016.
10. Zhang Y., Chen W., Yan H., Wang X., Zhang H., Wu S. The Effect of Atmospheric Chloride Ions on the Corrosion Fatigue of Metal Wire Clips in Power Grids, MDPI 2023. Pp. 237–251.
11. Vakhromeev A.M. Determination of cyclic durability of materials and structures of vehicles [Opredelenie ciklicheskoj dolgovechnosti materialov]

i konstrukcij transportnyh sredstv]: method. instructions. M.: MADI, 2015. 64 p. (rus)

12. Troshchenko V.T., Khamaza L.A. Fatigue and cyclic inelasticity of austenitic steel after prolonged operation under various loading condition [Ustalost' i ciklicheskaya neuprugost' austenitnoj stali posle dlitel'noj ekspluatatsii pri razlichnyh rezhimah nagruzheniyas]. Strength problems. 2012. No.5. Pp. 5–14. (rus)

13. Troshchenko V.T. Deformation and destruction of metals under multicycle loading [Deformirovanie i razrushenie metallov pri mnogociklovom nagruzhenii]. Kiev: Naukova dumka, 1981. 344 p. (rus)

14. Terentyev V.F., Korableva S.A. Fatigue of metals [Ustalost' metallov]. M.: Nauka, 2015. 484 p. (rus)

15. Weibull V. Fatigue tests and analysis of their results [Ustalostnye ispytaniya i analiz ih rezul'tatov]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1964. 275 p. (rus)

16. Abakumov R.G., Al-Sabaei A.K. Assessment of the reliability level of reinforcement options for building metal structures using a mathematical model of the probability of their trouble-free operation [Ocenka urovnya nadezhnosti variantov usileniya stroitel'nyh metallokonstrukcij s ispol'zovaniem matematicheskoy modeli veroyatnosti ih bezotkaznoj raboty]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 7. Pp.

44–50. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-7-44-50 (rus)

17. Al-Sabaei A.K., Substantiation of methods for strengthening building metal structures under repeated static loads [Obosnovanie metodov usileniya stroitel'nyh metallokonstrukcij pri povtorno-staticheskikh nagruzheniyah]. Collection of scientific papers of the 5th International Scientific and Practical Conference of young scientists, graduate students, masters and bachelors. Editorial board: S.V. Durakov (ed.) [et al.]. Kursk, 2021. Pp. 16–21. (rus)

18. Fatigue test system model 8801 [Electronic resource] Electron. dan. INSTRON, 2020. URL.: <https://www.instron.ru/ru-ru/products/testing-systems/dynamicand-fatigue-systems/servo-hydraulic-fatigue/8801-floor-model> (date of application: 03/28/20).

19. Al-Sabaei A.K. Calculation of multicycle fatigue of frame assemblies [Raschet mnogociklovoj ustalosti ramnyh uzlov]. Electronic scientific journal "Engineering Bulletin of the Don". 2024. No.2. [Electronic resource]. [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/9003](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/9003). (rus)

20. Al-Sabaei A.K., Absimetov V.E., calculation of (SSS) of frame units of building metal structures when strengthening them [Raschet NDS ramnyh uzlov stroitel'nyh metallokonstrukcij pri ih usilenii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 4. Pp. 26–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-26-35 (rus)

#### Information about the author

**Al-Sabaei, Arafat Q.** Assistant. E-mail: [kacem90@bk.ru](mailto:kacem90@bk.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Absimetov, Vladimir E.** DSc, Professor. E-mail: [absimetov57@mail.ru](mailto:absimetov57@mail.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 10.12.2024*

#### Для цитирования:

Аль-Сабает А.К., Абсиметов В.Э. Экспериментальное исследование моделей образцов узлов строительных металлоконструкций при динамических нагрузках // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 9. С. 16–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-16-23

#### For citation:

Al-Sabaei A. Q., Absimetov V.E. Experimental study of models of building metal structures under dynamic loads. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 9. Pp. 16–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-16-23

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-24-34

**Супранович В.М.**

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: vmsupranovich@gmail.com

## УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ В АРХИТЕКТУРЕ ОБЪЕКТОВ ОБРАЩЕНИЯ С ТВЕРДЫМИ БЫТОВЫМИ ОТХОДАМИ В РОССИИ: ЗНАЧЕНИЕ, ИНТЕРПРЕТАЦИЯ, РЕАЛИЗАЦИЯ

**Аннотация.** Проблема реализации целей устойчивого развития в архитектуре объектов обращения с твердыми бытовыми отходами требует поиска системных решений в контексте законодательных изменений в Российской Федерации. За прошедшее десятилетие сформулировано значительное количество теоретических подходов, посвященных теме устойчивого развития в архитектуре, в том числе для промышленных зданий и комплексов. Однако, согласно результатам исследований, проведенных на кафедре Архитектурного проектирования СПбГАСУ 2023-2024 годах, при проектировании и строительстве объектов обращения с отходами большинство из них не применяется или имеет к архитектуре лишь косвенное отношение. Цель исследования – определить варианты реализации целей устойчивого развития в архитектуре объектов обращения с отходами в России для возможности дальнейшего практического применения. В ходе работы изучено значение термина «устойчивое развитие» и выполнен комплексный анализ существующих трактовок данного понятия среди отечественных ученых в области архитектуры. Определен перечень теоретических составляющих и их элементов, взаимодействие которых обеспечивает соответствие архитектуры объекта целям устойчивого развития. Предложены три варианта взаимодействия элементов технической и эстетической составляющих для реализации целей устойчивого развития на теоретическом уровне в архитектуре объектов обращения с отходами.

Статья публикуется по результатам выполнения гранта научно-педагогических работников СПбГАСУ 2025 года на тему «Методы функционально-планировочной организации объектов обращения с ТБО в России».

**Ключевые слова:** школа полного дня, реновация, существующий школьный фонд, внеурочная деятельность, новая типология, полудневный образовательный комплекс.

### Введение.

**Актуальность темы.** Внедрение целей устойчивого развития в архитектуру зданий ставит перед собой задачу гуманизации воздействия человека на природу и организацию комфортной и экологичной городской среды [1]. За последнее десятилетие отечественными учеными разработано множество предложений по интеграции принципов устойчивого развития в архитектуру жилых и общественных зданий, часть из которых реализуется на практике. Однако для объектов промышленности ситуация развивается иным образом: к зданиям производств применяются лишь технологические требования, которые не решают или решают не в полной мере вопросы архитектуры предприятий [2]. Согласно исследованиям, проведенным на кафедре Архитектурного проектирования СПбГАСУ в 2023-2024 годах и материалам выставочных программ XXIV Международного форума «Экология большого города» в Санкт-Петербурге в марте 2025 года, это характерно и для объектов обращения с твердыми бытовыми отходами (ТБО) [2,3], хотя, как отмечает

Ю. А. Табунщиков, данные предприятия являются ключевыми элементами в вопросе устойчивого развития городов и сохранения экологии [4]. Таким образом, установлено противоречие в общем значении объектов обращения с отходами и реализации их архитектурного образа в контексте устойчивого развития страны.

В данной статье представлены результаты выполнения гранта НПР СПбГАСУ 2025 года по теме «Методы функционально-планировочной организации объектов обращения с ТБО в России».

**Гипотеза исследования.** Существующие теоретические подходы к созданию устойчивой архитектуры в России не могут быть «буквально» интегрированы в архитектуру промышленных объектов, без учета отраслевой принадлежности, технологической специфики и экономической целесообразности. Поэтому необходимо конкретизировать возможные варианты реализации целей устойчивого развития в архитектуре объектов обращения с ТБО.

**Цель работы** – определить возможные варианты реализации целей устойчивого развития в архитектуре объектов обращения с твердыми бытовыми отходами в России.

**Задачи исследования:** определить значение термина «устойчивое развитие» в России и выполнить комплексный анализ существующих трактовок данного понятия в области архитектуры отечественными учеными; определить теоретические составляющие соответствия архитектуры целям устойчивого развития; предложить варианты реализации целей устойчивого развития в архитектуре объектов обращения с ТБО в России.

**Объект исследования** – архитектура объектов обращения с твердыми бытовыми отходами в России.

**Границы исследования.** В работе рассмотрены основные теоретические подходы к созданию архитектуры устойчивого развития, сформулированные отечественными авторами, для определения характерных путей формирования данного направления в архитектурном проектировании в России. Под объектами обращения с отходами в статье подразумеваются объекты первичной сортировки и переработки ТБО, а также утилизации отходов – мусоросортировочные станции, комплексы переработки отходов (КПО), мусоросжигательные заводы и технопарки с функцией переработки ТБО.

**Материалы и методы исследования.** В ходе работы над исследованием были изучены работы Д.О. Швидковского, Г.В. Есаулова, Н.А. Сапрыкиной, О.Е. Салминой, Т.Ю. Быстровой и Т.В. Шамаевой, посвященные теоретическим основам проектирования устойчивой архитектуры зданий и сооружений. Вопросы создания устойчивой городской среды и улучшения экологии городов проанализированы в работах В.А. Нефедова. Применение новых технологий и инженерного оборудования изучены в работах Ю.А. Табунщикова, В.В. Шилина. Ориентированность на социально-экологические особенности архитектуры изучена в работах А.Н. Тетиора. Тенденции развития архитектуры объектов обращения с мусором в России проанализированы в работах В.М. Супранович и А.Д. Сафроновой.

В работе применен системный анализ существующих высказываний о развитии устойчивой архитектуры в России. Используются методы графического анализа и комплексного моделирования схем взаимосвязи теоретических составляющих соответствия архитектуры целям устойчивого развития.

**Основная часть.** Развитие промышленной архитектуры в России на современном этапе,

имеет в первую очередь, технологический характер. Это обусловлено тем, что после распада Советского Союза научные разработки в области промышленной архитектуры были приостановлены [1]. В большинстве своем, к строительству предприятий применялся утилитарный подход, который учитывал прежде всего технологические требования и экономические затраты [5]. Более того, сокращение производств внутри городских территорий и перенос предприятий на «периферию», привели к обеднению архитектуры промышленных зданий, так как необходимость соблюдения санитарно-защитных зон, предполагала изоляцию объектов от внешней среды [5]. Технологические новшества, связанные с идеями устойчивого развития [6], требования к сертификации заводов и контролю выбросов в атмосферу, кардинально изменили подход к модернизации инженерного оснащения предприятий в России, но не оказали должного влияния на пересмотр подходов к их архитектуре.

Это относится и к проектированию объектов по обращению с твердыми бытовыми отходами: мусоросортировочным станциям, мусоросжигательным заводам, комплексам переработки отходов (КПО) и технопаркам по переработке отходов. Являясь главными элементами в системе улучшения экологии и предотвращения загрязнения природы, эти объекты все еще воспринимаются населением как опасные и социально неприемлемые для включения в городскую среду [3]. Более того, большинство предложений по улучшению качества архитектуры таких предприятий воспринимаются как экономически нецелесообразные и затратные [1]. Результаты изучения архитектуры объектов обращения с отходами в России подтвердили, что процесс модернизации объектов затрагивает лишь экологические аспекты и соответствие технологиям для предотвращения загрязнения окружающей среды [3, 5]. Вопросы интеграции систем энерго- и водо- сбережения, повышения процента озеленения территории, гуманизации внешнего облика зданий, одним словом, создание комфортной среды предприятия, является экономически неоправданным. Поэтому комплексное применение новых подходов к проектированию объектов по обращению с отходами в России возможно в контексте устойчивого развития архитектуры, где улучшение как экологических, так и экономических показателей предприятий связано не только с технологическими новшествами, но и с использованием новых методов архитектурной разработки зданий [6, 7].

**Значение термина «Устойчивое развитие»** (англ. Sustainable Development), предложенного в докладе «Наше общее будущее» Международной

комиссией по окружающей среде и развитию при ООН (WCED) в 1987 году, определяется как «развитие, которое удовлетворяет потребности настоящего, не ставя под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности» [8]. Концепция устойчивого развития формируется в процессе взаимодействия трех аспектов: социального и экономического развития общества, и охраны окружающей среды [8]. Таким образом, архитектурой устойчивого развития можно считать архитектуру, которая воплощает в себе триаду «Social–Environmen–Economic» [8].

Интерпретация термина «Устойчивого развития» в Российской Федерации, среди отечественных ученых в области архитектурного проектирования имеет множество формулировок [9]. Поэтому для возможности практического применения концепции в стране, выполнен комплексный анализ существующих трактовок понятия «устойчивая архитектура». В ходе исследования была выполнена «выборка» одиннадцати высказываний, которые максимально раскрывают спектр составляющих понятия «устойчивая архитектура» (рис. 1). Некоторые из приведенных трактовок обозначают смыслы устойчивой архитектуры в «общем виде», некоторые, в контексте жилых и общественных зданий. Также приведены высказывания относительно устойчивой архитектуры промышленных объектов. Однако все приведенные высказывания объединяет концепция трактовки устойчивого развития среды: городской [10, 11], экологической [12, 13], психологической [14], экономической [15].

В качестве инструмента исследования выбран графический анализ текста: каждое высказывание проанализировано с точки зрения его содержания. Определены слова и словосочетания, характеризующие ту или иную содержательную составляющую. Каждая группа слов выделена цветом, для составления общего представления о характере составляющих (то есть к какой области ее можно отнести), их количестве и комбинациях в формулировке понятия «устойчивая архитектура».

Определено, что приведенные формулировки (как в «общем виде», так и для жилых, общественных и промышленных зданий) содержат следующие составляющие:

- градостроительная;
- архитектурная;
- конструктивно-техническая;
- экономическая;
- экологическая;
- социо-культурная.

Графическое обозначение слов и словосочетаний определило «соотношение» каждой составляющей внутри высказывания. Для некоторых высказываний характерна монокомпетентность, то есть использование только одной из составляющих, но, в большинстве своем, высказывания содержат в себе от двух до четырех составляющих. Как правило это триада «экономика–экология–социо-культура», дополненная или находящая свое выражение в дополнительной составляющей: градостроительстве, архитектуре или конструктивно-техническом аспекте. Изученные понятия предполагают системное взаимодействие выделенных составляющих между собой и определяют техническое и эстетическое воплощение архитектуры, как таковой, для соответствия целям устойчивого развития. Важно отметить, что высказывание Т.В. Шамаевой выполнено в рамках изучения устойчивой архитектуры промышленных предприятий, где наиболее выраженной составляющей является именно экологическая [16]. Реализация данной составляющей, по мнению автора, возможна именно через архитектурно-градостроительные меры [16]. В этом можно отметить стремление к гуманизации архитектуры объектов, которые с точки зрения санитарных и правовых норм, должны быть максимально отдалены от взаимодействия с городским населением.

Также необходимо обратить внимание, что по мнению О.Е. Салминой и Т.Ю. Быстровой требования, предъявляемые к архитектуре устойчивого развития жилых и общественных объектов в России, часто могут иметь скорее техническое выражение, а вопросы эстетики и дизайна не рассматриваться [9]. Поэтому существует опасность, что здание будет лишь косвенно относиться к устойчивой архитектуре, но не являться таковым на практике [9]. Данное утверждение справедливо и для промышленных зданий: говоря об устойчивой архитектуре предприятий, необходимо системно подходить к вопросу взаимосвязи архитектурных и технических характеристик.

Реализация целей устойчивого развития в архитектуре объектов обращения с отходами возможна благодаря системе взаимодействия выявленных составляющих, в достижении баланса между ними (рис. 2 а). Для практической реализации системы и насыщения ее конкретными численными показателями предлагается принять, что архитектурная и градостроительная составляющие влияют на эстетику образа, а конструктивно-техническая составляющая на ее технологические характеристики. Совместно они влияют на экономическую, экологическую и социально-культурную составляющую объекта формируя



теоретические уровни соответствия объекта обращения с ТБО целям устойчивого развития (рис. 2 б).

Автор	Высказывание
Д. О. Швидковский	«Зодчество немислимо без устойчивости — современного понятия, которое подразумевает <b>толерантность к природе, истории, энергетическим ресурсам, пространству</b> . Устойчивую архитектуру определяют как ту, что <b>бережет целостность и красоту мира как в его антропогенной, так и биосферной составляющих</b> »
В. А. Нефедов	«Поддержание <b>экологического равновесия</b> между естественными и искусственными компонентами»
Н. А. Сапрыкина	«Применение <b>сомасштабных конструктивных и объемно-пространственных решений, вписанных в контекст природной среды</b> »
А. Н. Ремизов	« <b>Экономичность</b> , возведение <b>экономически выгодных объектов</b> »
Ю. А. Табуничиков	«Снижение потребления ресурсов, совершенствование <b>градостроительных решений</b> путем использования <b>энергоэффективных технологий, энергосбережение и использование возобновляемых источников энергии</b> »
В. В. Шилин	« <b>Повышение физического и психологического комфорта людей</b> путем улучшения <b>функциональных, микроклиматических и эстетических параметров среды обитания</b> »
Г. В. Есаулов	«Архитектура, имеющая программой непротиворечивое <b>единство эстетических позиций автора и времени, и социально-экономических, инженерно-технологических и природно-экологических требований, базирующихся на принципах устойчивого развития...</b> »
А. Н. Тетиор	«Ориентация на <b>региональные компоненты</b> , ориентация на <b>местные природные ландшафтные и культурные условия</b> »
О. Е. Салмина, Т. Ю. Быстрова	«Создание комплексных проектов, <b>удовлетворяющих потребности человека</b> , сохраняя при этом <b>окружающую среду</b> на протяжении всего жизненного цикла здания»
Т. В. Шамаева	«Применение энергоэффективных проектов, в том числе, <b>с возобновляемыми источниками энергии, экологически чистыми материалами; строительство высокотехнологичных объектов, применение мер по защите и даже улучшению окружающей среды, сбережению и восстановлению природных ресурсов</b> »
Е.М.Шнейдер, В.Н.Саданова, Е.Н. Драгунова	«Устойчивая архитектура представляет собой <b>синтез технологий, материалов и дизайна, направленный на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду и улучшение качества жизни</b> »
Условные обозначения: <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #d9d9d9; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> - Градостроительная составляющая;  <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #f08080; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> - Архитектурная составляющая;  <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #a9a9a9; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> - Конструктивно-техническая составляющая; </div> <div> <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #808080; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> - Экономическая составляющая;  <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #c0c0c0; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> - Экологическая составляющая;  <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #ffa07a; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> - Социо-культурная составляющая; </div> </div>	

Рис.1 Графическое выявление составляющих соответствия архитектуры целям устойчивого развития

Каждая составляющая содержит в себе несколько элементов. Для объектов обращения с отходами это:

– архитектурная составляющая (эстетика образа): функционально-планировочное решение объекта (а/ф-п) – монофункциональный или многофункциональный, формообразование здания или комплекса (а/ф) – масштаб сооружения малый, средний, крупный, фасадное решение объекта (а/фас) – колористика/суперграфика,

имитация природных материалов и фактур, внедрения свето/воздухо/водо-сберегающих элементов. Важно отметить, что для промышленных зданий кровля должна иметь качество «пятого фасада» [16], поэтому технологии озеленения и водо-сохранения относятся не только к фасадам в их стандартном понимании. При практическом решении архитектуры объекта данные элементы, несмотря на свою эстетическую роль, могут быть переведены в численные показатели и иметь стоимостные характеристики, для расчета затрат;



– градостроительная составляющая (эстетика среды): среда размещения объекта (г/с) – внутри (центральный, «буферный», периферийный) или вне городских границ (приближенный или удаленный от жилой и общественной застройки), зона размещения объекта (г/з) – промышленное предприятие, промышленный объект, промышленный кластер, индустриальный

парк, характер застройки участка (г/х) – сплошной, смешанный, павильонный, компактный или обширный. При практическом решении градостроительных характеристик объекта, аналогично архитектурным, данные элементы, несмотря на свою эстетическую роль, могут быть переведены в численные показатели и иметь стоимостные характеристики, для расчета затрат;

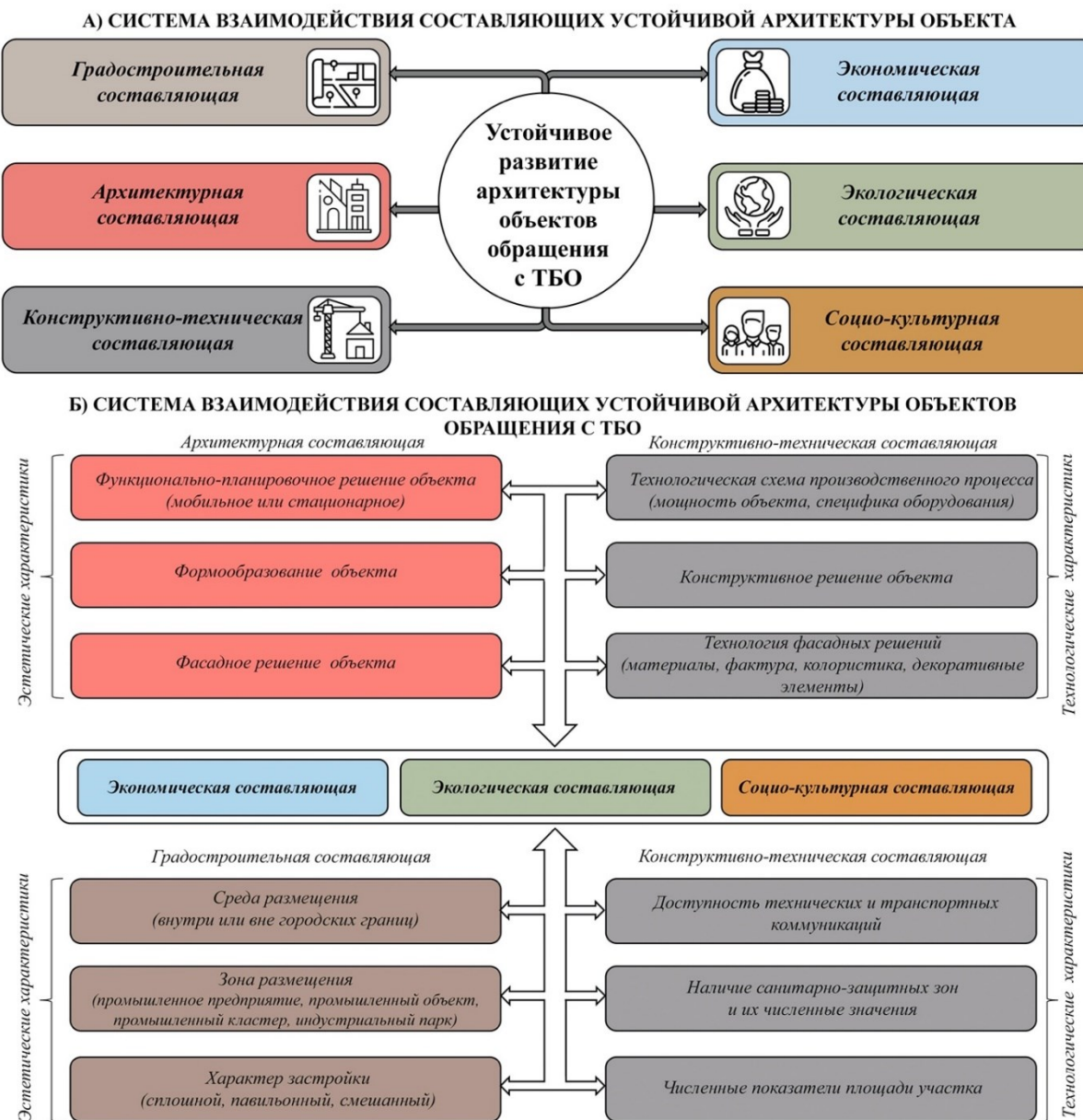


Рис. 2

Графическая схема системы взаимодействия составляющих устойчивой архитектуры  
а) общий вид б) для объектов обращения с ТБО

– конструктивно-техническая составляющая (технологии): технологическая схема производственного процесса (к-т/т) – мощность объекта, специфика оборудования, другими словами технологический модуль производства, инженерные решения, конструктивное решение объекта (к-т/к) – несущие конструкции, ограждающие конструкции, конструкции освещения, технологии фасадных решений (к-т/т-ф) – материалы фа-

сада (использование энергосберегающих материалов и технологий), фактура и колористика фасада (светоотражение, меры от переохлаждения/перегрева), декоративные элементы фасада (в том числе элементы энерго/водо-сбережения), доступность технических и транспортных коммуникаций (к-т/д) – доступность магистралей, наличие подъездов к территории, радиус действия предприятия («плечо охвата»), наличие са-

нитарно-защитных зон и их численные показатели (к-т/ссз), показатели площади участков (к-т/д) – площадь территории, форма участка, наличие перепада рельефа. Приведенные элементы соотносятся с элементами градостроительной и архитектурной составляющей, формируя единое сочетание технологии и эстетики объекта. Также элементы конструктивно-технической составляющей могут быть переведены в численные показатели и иметь стоимостные характеристики;

- экономическая составляющая: уровень затрат на строительство (э/з) – стандартный (общепринятый на современном этапе, наиболее экономичный), укрупненный (требует большего вложения капитала, но не более чем 25% по сравнению со стандартным), максимальный (требует значительного увеличения затрат на строительство, более 25%), уровень затрат на эксплуатацию (э/э) – низкий, средний, высокий, окупаемость проекта (э/о) – краткосрочная, среднесрочная, долгосрочная;

- экологическая составляющая: уровень выбросов в окружающую среду (э/у) – нулевой, низкий, средний (соответствует требованиям экологической экспертизы для начала работ по критериям безвредности производства: почва, вода, воздух), энергоэффективность/энергосбережение/ресурсосбережение (э/э) – базовый, полуавтономный, автономный (пассивный);

- социо-культурная составляющая: уровень интеграции объектов с точки зрения населения (с-к/и) – социально приемлемые (государственная инициатива, на которую нет противодействия общества), социально-одобряемые (общество выступает с инициативой появления объекта), социально-включенные (предприятие включено в жизнь общества благодаря инструментам просвещения и популяризации программы обращения с отходами).

Взаимодействие элементов архитектурной, градостроительной и конструктивно-технической составляющих непосредственно оказывают влияние на экономическую, экологическую и социо-культурную. Данный процесс может быть и обратным, когда мы говорим о запросе общества на появление того или иного объекта обращения с отходами и экономических возможностях заказчика. Количественная оценка каждого элемента во взаимосвязи друг с другом и формирует в дальнейшем диапазон стоимостных показателей вариантов взаимодействия составляющих. Главным условием, является то, что технические и эстетические характеристики объектов должны быть неразрывны. То есть задание на проектирование должно изначально учитывать все вышеперечисленные составляющие.

Важно отметить и тот факт, что невозможно привести к одному ряду все объекты обращения с отходами между собой и максимально интегрировать все инновационные достижения в каждом из них. Поэтому уровень проработки выявленных составляющих может отличаться, и это дает возможность для предложения нескольких вариантов реализации целей устойчивого развития на теоретическом уровне, который, в зависимости от типа объекта обращения с отходами (мусоросортировочная станция, комплекс переработки отходов, мусоросжигательный завод и или технопарк по переработке отходов) может конкретизироваться при разработке проекта. Предлагается три варианта взаимодействия элементов градостроительной, архитектурной, конструктивно-технической, экономической, экологической и социо-культурной составляющих (рис. 3).

Варианты взаимодействия элементов по составляющим в приведенной матрице предполагают, что объекты обращения с отходами отвечают целям устойчивого развития на разных уровнях:

- первый вариант – стандартное производство, позволяет достичь баланс между техническими и эстетическими характеристиками объекта при минимальном увеличении финансирования строительства объектов обращения с отходами. Этот вариант подходит для интеграции в проектирование мусоросортировочных станций (МСС) и комплексов по переработке отходов (КПО), так как в большинстве своем это временные объекты, а не объекты капитального строительства и их срок службы не превышает 25 лет (максимум для КПО). Поэтому использование модульных конструкций и легко утилизируемых сборных материалов позволяют оптимизировать сроки строительства и минимизировать ущерб при сносе объекта. Градостроительные и архитектурные решения позволяют создать благоприятную среду для пребывания сотрудников на предприятии. Колористика фасадов, а также использование суперграфики и различных сценариев освещения обеспечат процесс навигации и логистики на участке, психологический комфорт сотрудников и положительное восприятие объекта населением. Здания МСС и КПО требуют внешнего энерго- и водо-обеспечения и не являются автономными в данном варианте, однако качество материалов и их энергоэффективность должны учитываться, для того чтобы процесс жизненного цикла объекта от проектирования до сноса или модернизации был оптимальным;

- второй вариант – полуавтономное производство, обеспечивает равновесие технических и эстетических характеристик при укрупненном уровне финансирования объектов обращения с

отходами. Окупаемость таких объектов является средне срочной, однако в долгосрочной перспективе, благодаря технологиям энергосбережения,

а также организации процесса выработки энергии от производственного процесса предприятия

Варианты взаимодействия составляющих и их элементов		Вариант 1 (стандартное производство)	Вариант 2 (полуавтономное производство)	Вариант 3 (автономное или пассивное производство)
Составляющие устойчивой архитектуры	Экономическая	(э/з) стандартный (э/э) низкий (э/о) краткосрочная	(э/з) укрупненный (э/э) средний (э/о) среднесрочная	(э/з) максимальный (э/э) высокий (э/о) долгосрочная
	Экологическая	(э/у) средний (э/э) базовый	(э/у) низкий (э/э) полуавтономный	(э/у) нулевой (э/э) автономный
	Социально-культурная	(с-к/и) социально приемлемые	(с-к/и) социально-одобряемые	(с-к/и) социально-включенные
	Архитектурная	(а/ф-п) моно/ многофункциональный; (а/ф) малый или средний; (а/фас) колористика фасада/суперграфика;	(а/ф-п) многофункциональный; (а/ф) малый, средний, крупный; (а/фас) имитация природных материалов и фактур;	(а/ф-п) многофункциональный; (а/ф) малый, средний, крупный; (а/фас) наличие «пятого фасада», симбиоз цветового решения фасада, природных материалов и технологий свето/вода/водосберегающих элементов;
	Градостроительная	(з/с) вне городских границ (удаленный от жилой застройки) или на периферии городских границ; (з/з) промышленное предприятие, промышленный объект, индустриальный парк; (з/х) обширный павильонный или смешанный;	(з/с) вне городских границ (приближенный к жилой застройке) или внутри городских границ (периферия, буферная зона); (з/з) промышленное предприятие, промышленный объект, промышленный кластер; (з/х) обширный павильонный, компактный смешанный или сплошной;	(з/с) вне городских границ (приближенный к жилой застройке) или внутри городских границ (буферная или центральная зона); (з/з) промышленный объект, промышленный кластер, индустриальный парк; (з/х) компактный смешанный или сплошной;
	Конструктивно-техническая	(к-т/м) горизонтальный тех. модуль; (к-т/к) модульная схема, большепролетные конструкции, естественные системы вентиляции (к-т/т-ф) эффективные сендвич-панели со светоотражающими решениями от перегрева; (к-т/д) примыкание к шоссе и городским магистралям, дальнее «плечо» охвата; (к-т/ссз) С33 свыше 1000 м; (к-т/д) S свыше 10 га, форма – многоугольная;	(к-т/т) горизонтальный или вертикальный тех. модуль; (к-т/к) большепролетные конструкции с включением монолитных ж/б конструкций, системы естественной и искусственной вентиляции; (к-т/т-ф) использование энерго- эффективных материалов ограждающих конструкций, самостоятельное энергообеспечение; (к-т/д) примыкание к шоссе и городским магистралям, ближнее «плечо» охвата; (к-т/ссз) С33 от 500 до 1000 м; (к-т/д) S от 5 до 10 га, форма (сложная, обширная) – квадратная, прямоугольная вытянутая, многоугольная;	(к-т/т) горизонтальный, вертикальный или смешанный тех. модуль; (к-т/к) большепролетные конструкции с включением монолитных ж/б конструкций, системы естественной и искусственной вентиляции, самостоятельное энергообеспечение и энергопередача другим объектам;; (к-т/т-ф) использование энерго- эффективных материалов и систем ограждающих конструкций свето/вода/водосберегающих элементов фасада; (к-т/д) примыкание к шоссе и городским магистралям, минимальное «плечо» охвата; (к-т/ссз) С33 до 500 м; (к-т/д) S от 5 до 10 га, форма (простая, компактная)– прямоугольная, прямоугольная вытянутая;

Рис. 3 Матрица взаимодействия элементов по вариантам реализации целей устойчивого развития в архитектуре объектов обращения с ТБО



возможен полуавтономный процесс функционирования объекта, который способен обеспечивать себя энергией (искусственное освещение помещений, организация подсветки зданий), а также оптимизации затрат на отопление за счет использования энергоэффективных материалов. Целесообразно использовать данный вариант для объектов капитального строительства сроком службы свыше 25 лет, таких как: мусоросжигательные заводы, технопарки с функцией переработки мусора, а также, в отдельных случаях, комплексов переработки отходов (при организации промышленных узлов с предприятиями вторичного цикла переработки). Эстетические качества архитектуры в данном случае будут поддерживать не только благоприятный уровень восприятия сотрудников, туристических групп и населения в целом, но и влиять на процесс функционирования объекта на протяжении всего цикла жизни здания. Точечное внедрение таких технологий как озеленение кровель, имитация природных материалов и фактур позволит развить пути биотехнологии в архитектуре, способствовать увеличению процента озеленения территорий и поддерживать процесс экологического восстановления и существующий контекст природной или городской среды на протяжении всего цикла функционирования объекта;

– третий вариант – автономное или пассивное производство, предполагает баланс технических и эстетических характеристик для создания безвредного объекта обращения с отходами, не только с нулевым выбросом, но и с организацией самообеспечения здания электроэнергией, водой для технических нужд производства и эксплуатации, организации взаимодействия с населением и интеграции общественных функций для обеспечения социальной включенности производства в жизнь общества. При решении генерального плана – это создание общественного пространства для доступа посетителей, функционально-планировочного зонирования – создание дополнительных групп помещений и пространств, организация «белых коридоров» для доступа экскурсионных групп. Архитектурный облик объекта, особенно при крупном масштабе, может нести знаковое значение не только для зоны его размещения, но и для городского значения в целом – такой объект может служить доминантой в промышленной застройке, элементом искусственного рельефа и/или объектом спортивного назначения при организации эксплуатируемых озелененных кровель. Это отразится на уровне и качестве архитектурных решений и повышении затрат на строительство, однако для последующей минимизации процессов сноса или модерни-

зации является наиболее оптимальным вариантом. Очевидно, что условия взаимодействия характеристик в случае выбора третьего варианта целесообразно применять для объектов капитального строительства – мусоросжигательных заводов и технопарков с функцией переработки ТБО в случае, когда роль объекта является определяющей для окружающего контекста территории.

**Выводы.** Система утилизации твердых бытовых отходов в России находится на этапе своего становления: пересматриваются правила сортировки отходов населением, составу и количеству упаковочных материалов, технологий утилизации для решения задачи перехода к «нулевому» остатку от накапливаемого мусора. Таким образом, объекты обращения с отходами уже сейчас должны учитывать неминуемые законодательные и технологические обновления, для оптимизации процессов производства на этапе функционирования объекта. Интеграция целей устойчивого развития возможна при системном взаимодействии технических и эстетических аспектов с учетом полного жизненного цикла зданий и его отраслевой принадлежности.

В ходе исследования получены следующие результаты:

1. Изучено значение термина «устойчивое развитие» и установлены аспекты, на которых базируется концепция устойчивого развития. Выполнен комплексный анализ одиннадцати трактовок данного понятия ведущими отечественными учеными в области архитектуры;

2. Определены теоретические составляющие: экономическая, экологическая, социо-культурная, градостроительная, архитектурная и конструктивно-техническая, для соответствия архитектуры целям устойчивого развития и элементы, их образующие. Предложена система взаимодействия градостроительной, архитектурной и конструктивно-технической составляющей для объектов обращения с отходами. Установлено, что эстетические качества объекта формирует градостроительная и архитектурная составляющая.

3. Предложено три варианта реализации целей устойчивого развития в архитектуре объектов обращения с отходами в России с учетом взаимодействия выявленных составляющих и потребностей жизненного цикла объекта, его типологической принадлежности и предполагаемого срока службы. Определены оптимальные пути достижения качественных архитектурных решений при различном уровне экономических затрат, системы взаимосвязи технологических систем самообеспечения зданий и элементов фасадов, а также сценарии интеграции дополнитель-

ных общественных функций. Предложено создание полуавтономных и автономных (пассивных) производств, позволяющих минимизировать уровень воздействия на окружающую среду в целом, в том числе и за счет архитектурно-градостроительных инструментов.

Таким образом, определены возможные направления развития архитектуры объектов обращения с отходами в России на теоретическом уровне с учетом целей устойчивого развития. Это позволит в дальнейшем предложить оптимальные методы проектирования и модернизировать существующие подходы к реализации практических задач строительства таких предприятий.

**Источник финансирования.** Конкурс грантов на выполнение научно-исследовательских работ научно-педагогическими работниками Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ) в 2025 году.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Супранович В.М. Особенности градостроительного размещения существующих объектов мусоросортировки и мусоропереработки в России // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2023. № 10 С. 68–77. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-68-77 EDN WFXLPI
2. Супранович В.М. Архитектура существующих объектов мусоросортировки и мусоропереработки в России // Перспективы науки. 2023. № 9 (168). - С. 107-111. EDN: IWITUZ
3. Супранович В.М., Сафронова А.Д. Особенности функционально-планировочной организации вертикальных технопарков // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2024. № 12. С. 71–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-71-81 EDN SJEFCZ
4. Табунщиков Ю. А. Основы формирования экологически устойчивой среды обитания человека // Экологически ориентированная архитектура высоких технологий: Пленарные доклады и тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции 24-25 ноября 2022 г., Москва, МАРХИ / Под общ. редакцией академика РААСН Г. В. Есаулова. Москва : МАРХИ, 2023. С. 15-17. EDN SPRGKS
5. Супранович В. М., Сафронова А. Д. Тенденции формообразования мусороперерабатывающих объектов. Основные направления и их влияние на архитектуру МПО // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2023. № 3. С. 97–110. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-97-110 EDN JSQUOM
6. Есаулов Г.В. Устойчивая архитектура - от принципов к стратегии развития // Вестник ТГАСУ. 2014. № 6. С. 9–23. EDN TBZNDD
7. Шнейдер Е.М., Саданова В.Н., Драгунова Е.П. Концепции устойчивой архитектуры: инновации и их реализация // Инженерный Вестник Дона. 2025. № 3 (123). С. 598–611. EDN OWUPPJ
8. Бродач М.М., Шилкин Н.В. Зеленые здания и глобальные цели устойчивого развития // Экологически ориентированная архитектура высоких технологий: Пленарные доклады и тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции 24-25 ноября 2022 г., Москва, МАРХИ / Под общ. редакцией академика РААСН Г. В. Есаулова. Москва : МАРХИ, 2023. С. 23–28.
9. Салмина О.Е., Быстрова Т.Ю. Принципы создания устойчивой архитектуры // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2015. № 4. С. 36-40. EDN: VDJVJL
10. Швидковский Д.О., Ревзина Ю.Е. Классическая архитектура в устойчивой форме. Интерпретация в контексте глобализации и цифровой культуры // Архитектура и строительство России. 2015. № 3 (207). С. 2–10. EDN TMENMJ
11. Тетиор А.Н. Урбоэкологическая концепция России в условиях кризисного развития мира // Жилищное строительство. 2013. № 1. С. 13–16. EDN: PVXYZB
12. Нефедов В.А. Альтернативная архитектура: взаимодействие с природой // Приволжский научный журнал. 2012. № 2 (22). С. 127–130. EDN PBEVRL
13. Сапрыкина Н.А. Экологическая адаптация: компенсаторные приемы преобразования пространства обитания // Архитектура и современные информационные технологии. 2021. № 2 (55). С. 17–36. DOI: 10.24412/1998-4839-2021-2-17-36 EDN PFQEGI
14. Шилин В.В., Горшкова Г.Ф. Архитектурно-пространственная среда зданий и человек: условия гармонического взаимодействия // Приволжский научный журнал. 2012. № 4. С. 126-131. EDN PXBNWF
15. Ремизов А.Н. Экоустойчивая архитектура как процесс // Жилищное строительство. 2016. № 4. С. 48-51. EDN WEEZGN
16. Шамаева Т.В. Устойчивое развитие архитектурного облика промышленных объектов на примере зарубежного опыта // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 12. С. 46–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-46-61 EDN NYHSYK

Информация об авторах

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

Поступила 28.06.2025 г.

© Супранович В.М., 2025

**Supranovich V.M.**

*Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*

*E-mail: vmsupranovich@gmail.com*

## **SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE ARCHITECTURE OF SOLID WASTE MANAGEMENT FACILITIES IN RUSSIA: MEANING, INTERPRETATION, IMPLEMENTATION**

**Abstract.** *The problem of implementing sustainable development goals in the architecture of solid waste management facilities requires a search for systemic solutions in the context of legislative changes in the Russian Federation. Over the past decade, a significant number of theoretical approaches have been formulated devoted to the topic of sustainable development in architecture, including for industrial buildings and complexes. However, according to the results of research conducted at the Department of Architectural Design of SPbGASU in 2023-2024, most of them are not used in the design and construction of waste management facilities or are only indirectly related to architecture. The purpose of the study is to determine options for implementing sustainable development goals in the architecture of waste management facilities in Russia for the possibility of further practical application. In the course of the work, the meaning of the term "sustainable development" was studied and a comprehensive analysis of existing interpretations of this concept among domestic scientists in the field of architecture was carried out. A list of theoretical components and their elements has been defined, the interaction of which ensures that the architecture of the object complies with the goals of sustainable development. Three options for the interaction of technical and aesthetic components are proposed for the implementation of sustainable development goals at the theoretical level in the architecture of waste management facilities.*

*The article is published based on the results of the implementation of the grant of scientific and pedagogical staff of SPbGASU 2025 on the topic "Methods of functional planning organization of solid waste management facilities in Russia".*

**Keywords:** *industrial architecture, waste management facilities, sustainable development goals, theoretical approaches, Russian Federation.*

### **REFERENCES**

1. Supranovich V.M. Features of urban planning location of existing objects of waste sorting and waste processing in Russia. [Osobennosti gradostroitel'nogo razmeshcheniya sushchestvuyushchih ob'ektov musorosortirovki i musoropererabotki v Rossii]. Bulletin of BSTU named after V.G.Shukhov. 2023. No. 10. Pp. 68–77. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-68-77 EDN WFXLII (rus)
2. Supranovich V.M. Architecture of existing waste sorting and recycling facilities in Russia. [Arhitektura sushchestvuyushchih ob'ektov musorosortirovki i musoropererabotki v Rossii]. Science Prospects. 2023. No. 9 (168). Pp. 107–111. EDN IWITUZ (rus)
3. Supranovich V.M., Safronova A.D. Features of the functional planning organization of vertical technology parks. [Osobennosti funktsional'no-planirovочноj organizatsii vertikal'nyh tekhnoparkov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024.

No. 12. Pp. 71–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-71-81 EDN SJEFCZ (rus)

4. Tabunshchikov Yu. A. Fundamentals of the formation of an ecologically sustainable human habitat. [Osnovy formirovaniya ekologicheskii ustojchivoj sredy obitaniya cheloveka]. Ecologically oriented architecture of high technologies: Plenums and thesis of the papers of the Global scientific-practical conference November 24-25, 2022, Moscow, MARHI / Under the general editorship of Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences G. V. Esaulov. Moscow: MARHI, 2023. Pp. 15–17. EDN SPRGKS (rus)

5. Supranovich V.M., Safronova A.D. Trends in the formation of waste processing facilities. Main directions and their influence on the architecture of waste processing facilities. [Tendentsii formirovaniya musoropererabatyvayushchih ob'ektov. Osnovnye napravleniya i ih vliyaniye na arhitekturu MPO]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.

2023. No. 3. Pp. 97–110. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-97-110 EDN JSQUOM (rus)

6. Esaulov G.V. Sustainable architecture - from principles to development strategy [Ustojchivaya arhitektura – ot principov k strategii razvitiya]. Journal of Construction and Architecture. 2014. No 6. Pp. 9-23. EDN TBZNDD (rus)

7. Shnejder E.M., Sadanova V.N., Dragunova E.P. Sustainable Architecture Concepts: Innovations and their Implementation. [Konceptii ustojchivoj arhitektury: innovacii i ih realizaciya]. Engineering Journal of Don. 2025. No. 3 (123). Pp. 598–611. EDN OWUPPJ (rus)

8. Brodach M.M., Shilkin N.V. Green Buildings and the Global Sustainable Development Goals [Zelenye zdaniya i global'nye celi ustojchivogo razvitiya]. Ecologically oriented architecture of high technologies: Plenums and thesis of the papers of the Global scientific-practical conference November 24–25, 2022, Moscow, MARHI. Under the general editorship of Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences G. V. Esaulov. - Moscow: MARHI, 2023. Pp. 23–28. (rus)

9. Salmina O.E., Bystrova T.Yu. Principles for creating sustainable architecture. [Principy sozdaniya ustojchivoj arhitektury]. Akademicheskij vestnik URALNIIPROEKT RAASN. 2015. No. 4. Pp. 36–40. EDN: VDJVJL (rus)

10. Shvidkovskij D.O., Revzina Yu.E. Classical architecture in sustainable form. Interpretation in the context of globalization and digital culture. [Klassicheskaya arhitektura v ustojchivoj forme. Interpretaciya v kontekste globalizacii i cifrovoj kul'tury]. Architecture and construction in Russia. 2015. No. 3 (207). Pp. 2–10. EDN TMENMJ (rus)

11. Tetior A.N. Urboecological concept of Russia in the conditions of crisis development of the

world. [Urboekologicheskaya koncepciya Rossii v usloviyah krizisnogo razvitiya mira]. The Zhilishchnoe Stroitel'stvo (Housing Construction) Journal. 2013. No. 1. Pp. 13–16. EDN PVXYZB (rus)

12. Nefedov V.A. Alternative architecture: interaction with nature. [Alternativnaya arhitektura: vzaimodejstvie s prirodoj]. Privolzhsky scientific journal. 2012. No. 2 (22). Pp. 127–130. EDN PBEVRL (rus)

13. Saprykina N.A. Ecological adaptation: compensatory techniques for transforming habitat [Ekologicheskaya adaptaciya: kompensatornye priemy preobrazovaniya prostranstva obitaniya]. Architecture and modern information technologies. 2021. No. 2 (55). Pp. 17–36. DOI: 10.24412/1998-4839-2021-2-17-36 EDN: PFQEGI (rus)

14. Shilin V.V., Gorshkova G.F. Architectural and spatial environment of buildings and man: conditions of harmonious interaction. [Arhitekturno-prostranstvennaya sreda zdaniy i chelovek: usloviya garmonicheskogo vzaimodejstviya]. Privolzhsky scientific journal. 2012. No. 4. Pp. 126–131. EDN PXBWNF (rus)

15. Remizov A.N. Sustainable architecture as a process. [Ekoustojchivaya arhitektura kak process]. The Zhilishchnoe Stroitel'stvo (Housing Construction) Journal. 2016. No. 4. Pp. 48–51. EDN WEEZGN (rus)

16. Shamaeva T.V. Sustainable development of the architectural appearance of industrial facilities based on foreign experience. [Ustojchivoe razvitie arhitekturnogo oblika promyshlennykh ob'ektov na primere zarubezhnogo opyta]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 46–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-46-61 EDN NYHSYK (rus)

#### *Information about the authors*

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

*Received 28.06.2025*

#### **Для цитирования:**

Супранович В.М. Устойчивое развитие в архитектуре объектов обращения с твердыми бытовыми отходами в России: значение, интерпретация, реализация // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 9. С. 24–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-24-34

#### **For citation:**

Supranovich V.M. Sustainable development in the architecture of solid waste management facilities in Russia: meaning, interpretation, implementation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 9. Pp. 24–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-24-34

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-35-46

Чечель И.П.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: Golden-line7@yandex.ru

## ИННОВАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ «ШКОЛА ПОЛНОГО ДНЯ», КАК ИНСТРУМЕНТ АРХИТЕКТУРНОЙ РЕНОВАЦИИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ШКОЛЬНЫХ ЗДАНИЙ

**Аннотация.** Современная Россия ведет решительное обновление всех сфер жизни, что невозможно без обновления в системе образования. Сегодня в Белгородской области строится несколько школ нового поколения - «школа поколения 5.0», что говорит о стремлении перейти на новый уровень создания образовательной среды и комфортных условий для выполнения требований государственных стандартов к воспитательно-образовательной деятельности в школе. Однако, основную часть регионального школьного фонда составляют здания школ прошлых поколений массового советского строительства и начала федеративного периодов, которые морально устарели, использовали свой резерв роста и не могут обеспечить такой же уровень образовательной среды, как проекты нового поколения, построенные после 2020 года. Актуальным является реновация этих зданий для реализации современных законодательных требований к организации урочной и внеурочной деятельности на основе инновационной модели общего образования «школа полного дня». Реализовать такую модель возможно в образовательном комплексе полного дня – объекте образования новой типологии, который интегрирует в себе функции образовательных организаций дошкольного, школьного и дополнительного образования. Это требует развития функциональной и архитектурно-планировочной структуры образовательного комплекса, с учетом существующей типологии действующих зданий школьного фонда. Ключ к решению данной проблемы лежит в плоскости включения в структуру комплексов новых дополнительных функциональных блоков для ведения внеурочной деятельности, представляющих собой многофункциональные планировочные блок-модули для применения при реновации школьных зданий.

**Ключевые слова:** школа полного дня, реновация, существующий школьный фонд, внеурочная деятельность, новая типология, полудневный образовательный комплекс.

**Введение.** «Школа полного дня» (далее, ШПД) является инновационной моделью современной образовательной организации. Она обусловлена модернизацией системы образования в Российской Федерации [1,2], несет в себе новую миссию, подтвержденную ее целеполаганием и представляет собой особую форму организации внутришкольного устройства и режима работы. ШПД должна стать новой школой в новом обществе, таков ее смысл.

Миссией ШПД является установление новых, более качественных требований к результатам учебно-воспитательного процесса и усиление ее социальной функции, которая определена потребностями и возможностями семьи, что диктует оказание работающим родителям помощи в присмотре за детьми, их здоровьесбережении, подготовке домашних заданий, социальной адаптации.

Целеполаганием перехода на модель ШПД являются стремление перейти на «семейный» график работы школы, снижение учебной нагрузки, объединение в единый комплекс воспитательного, образовательного, развивающего и оздоровительного процессов [3].

Новое осмысление тема полудневной школы получила с принятием в 2012 году Федерального закона «Об образовании в Российской Федерации» и федеральных государственных образовательных стандартов, которые устанавливают требования к ведению воспитательно-образовательного процесса в школе, сделав внеурочную деятельность его обязательным элементом, наравне с классно-урочной деятельностью. Работа ШПД способствует объединению классно-урочной и внеурочной деятельности детей в рамках единого образовательного сообщества и созданию полноценного образовательного пространства, диктует необходимость интеграции основного и дополнительного образования и требует изменения в подходах к организации внеурочной коллективной, групповой и индивидуальной деятельности учащихся [3]. Ключ к организации полудневной школы лежит в плоскости совершенствования материально-технической базы действующих зданий школ и в поиске новых архитектурных типов зданий и комплексов объектов образования. Разработка новых и актуализация существующих архитектурных реше-



ний является необходимым и обязательным шагом при реализации государственных реформ в области образования [4, 5].

Типология школьного здания находится под влиянием изменений в образовательной системе и подвержена постоянному обновлению ввиду того, что запрос, который формирует государство и общество постоянно корректируется под воздействием развития самого государства и общества [6].

Многие российские ученые посвящали свои исследования теме школьного строительства:

- труды В.И. Степанова, в которых он еще на рубеже XX–XXI веков, в качестве главного

- вектора в развитии типологии школьного здания определял модель ШПД, как самую перспективную из моделей школьного образования [7]; работы В.В. Смирнова, посвященные системам и типам учебно-воспитательных зданий; его разработки методик определения площадей при выполнении работ по реконструкции существующих зданий школ;

- труды по теории и практике архитектурного проектирования общественных зданий, в том

- числе общеобразовательных школ и их комплексов Гельфонд А.Л.;

- исследования, освещающие аспекты модернизации существующего школьного фонда;

- совершенствования номенклатуры помещений; особенности архитектуры школ с учётом региональных условий: Моргун Н.А., Евтушенко–Мулукаева Н.М., Барабаш М.В.; Буник О.А., Славинский С.П.; Пименова Е.В., Позняк С.В., Зудин А.В., Миронюк А.В., Полуй Б.М.; Тургумбекова Э.З.;

- современные требования к проектированию школ и учреждений дополнительного

- образования: Ульяновская С.И., Балакина А.Е., Яковенко Н.Е. [8, 9];

- работы Колодина К.И. об особенностях интеграции школьных пространств в

- урбанизированную среду больших городов [10];

- исследования по проблемам реновации и реконструкции зданий школ: Радионов Т.В.,

- Откидач М.Ю., Ахмедов А.З. [11];

- работы авторов, занимающихся вопросами организации внутренних пространств, в том числе

- атриумных общественных пространств в структуре многофункциональных комплексов [12, 13];

- изучены практические и теоретические работы современных архитекторов - авторов многих

- объектов образования Бутко В., Надточий А. (бюро ATRIUM и Проект Россия) [14];

- исследования зарубежных авторов: Stefano Della Torre, Massimiliano Bocciarelli, Laura Daglio,

- Raffaella Neri Editors, Mark Dudek и др. [15-19];

- научные исследования, внесшие фундаментальный вклад в развитие отечественной педагогики, труды Сухомлинского В.А., Шацкого С.Т., архитектора–педагога Зеленко А.У.; работы Дорошенко С.И., Дорошенко Ю.И., посвященные перспективным моделям школьного образования; Пчелинцевой Т.С. по теме внеурочной деятельности [20].

Исследование развивает подход к созданию комфортного пространства образовательной организации с учетом запросов современного потребителя образовательных услуг.

**Целью исследования** является подготовка предложений по типологии объекта образования с услугой полного дня, в условиях реновации существующих школьных зданий, описание его функциональной и архитектурно–планировочной структуры.

**Задачами исследования** являются: 1) сформулировать предложения по типологии объекта образования с услугой полного дня; 2) описать функциональные блоки; 3) предложить типологические модели внеурочных центров.

**Объект исследования** – образовательные комплексы полного дня на основе реновации существующих школьных зданий.

Необходимость перехода действующих зданий в полудневный режим работы обусловлена рядом факторов, к которым необходимо отнести, как внутренние факторы, влияющие на функциональную составляющую и внутреннюю организацию здания, так и внешние факторы, которые определяют объемно–пространственную структуру комплекса, а также ряд специфических, дополнительных факторов, связанных с эргономикой, психологией, цифровизацией, чрезвычайными ситуациями.

**Теоретическая значимость** исследования заключается в разработке предложений по архитектурной типологии современного объекта образования с услугой полного дня; в описании его функциональной и архитектурно–планировочной структуры; введении в научный оборот терминов «общеобразовательный комплекс полного дня» и «центр внеурочной деятельности и дополнительного образования».

**Материалы и методы.** Исследование основано на комплексном подходе и включает в себя ряд последовательно примененных научных ме-

тодов, таких как изучение специальной литературы и электронных ресурсов различных информационных источников по архитектурным и объемно-планировочным решениям современных школ и комплексов с услугой полного дня; анализ нормативных документов строительного и ведомственного нормирования; структурно-системный метод для формирования основных положений теоретических моделей объекта исследования; экспериментальное моделирование на основе теоретических результатов.

**Основная часть.** Как показало изучение опыта Белгородской области, одним из направлений формирования комплексов, является реорганизация и объединение нескольких действующих организаций (ДОО, ООО и ОДО) в новую многоуровневую образовательную организацию, с единым центром управления, на основе суще-

ствующих зданий школ. На региональном законодательном уровне определено, что именно образовательный комплекс полудневного формата должен стать массовой региональной общеобразовательной организацией [3–5].

Типология образовательного комплекса не является новым явлением в теории и практике архитектурной науки, однако современный образовательный комплекс имеет свои отличия. Известно несколько определений понятия «образовательный комплекс». Одно из них сформулировано в работах А.Л. Гельфонд и основано на функциональном процессе, другое определение дано Н.Н. Каганович и учитывает уровни образования (дошкольное и школьное).

Сегодня есть необходимость скорректировать данный термин с опорой на полудневный режим работы и читать его в следующей редакции – «образовательный комплекс полного дня».



Рис.1. Направления воспитательно–образовательной деятельности в образовательной организации полного дня. Разработал Чечель И.П.

Особенностью образовательного комплекса полного дня является развитая внеурочная деятельность (рис.1). Внеурочная деятельность ведется во вторую половину дня, свободную от уроков. Возможна иная организация распорядка дня обучающихся, но она носит индивидуальный характер и определяется самой организацией, оказывающей услуги полудневной школы.

Внеурочная деятельность представлена следующими основными направлениями:

- дополнительное образование в области углубленного изучения отдельных предметов по
- выбору обучающихся и их законных представителей (родителей) по согласованию с организацией, оказывающей образовательные услуги;

- внеурочная работа классного руководителя – это проведение классных часов, совместные;
- походы, субботники, тематические мероприятия;
- организация общешкольных мероприятий, в том числе с привлечением родителей и общественных организаций, семейные программы выходного дня;
- профориентация в старших классах;
- занятия в организациях дополнительного образования и развивающих кружках различных;
- направлений – творческих, инженерно-технических, спортивных и других;
- отдых и здоровьесбережение школьников, индивидуальные траектории развития;

- подготовка домашних заданий и самоподготовка;
- проектная деятельность, школьное самоуправление.

Все эти направления и виды деятельности должны быть обеспечены необходимым материальным ресурсом. Выполненный автором анализ зданий действующего фонда (на примере Белгородской области) показал, что существующая материально-техническая база, в целом отстает от

социального запроса. Данная ситуация имеет место не только в Белгородской области, но и в других регионах страны, так как основной школьный фонд формировался в советский период и был основан на единой номенклатуре школьных зданий массового строительства (рис. 2, 3).

Необходим переход региональных школьных зданий из состояния «школа» в состояние «образовательный комплекс», с расширением и внедрением новых и альтернативных функций для ведения внеурочной деятельности.

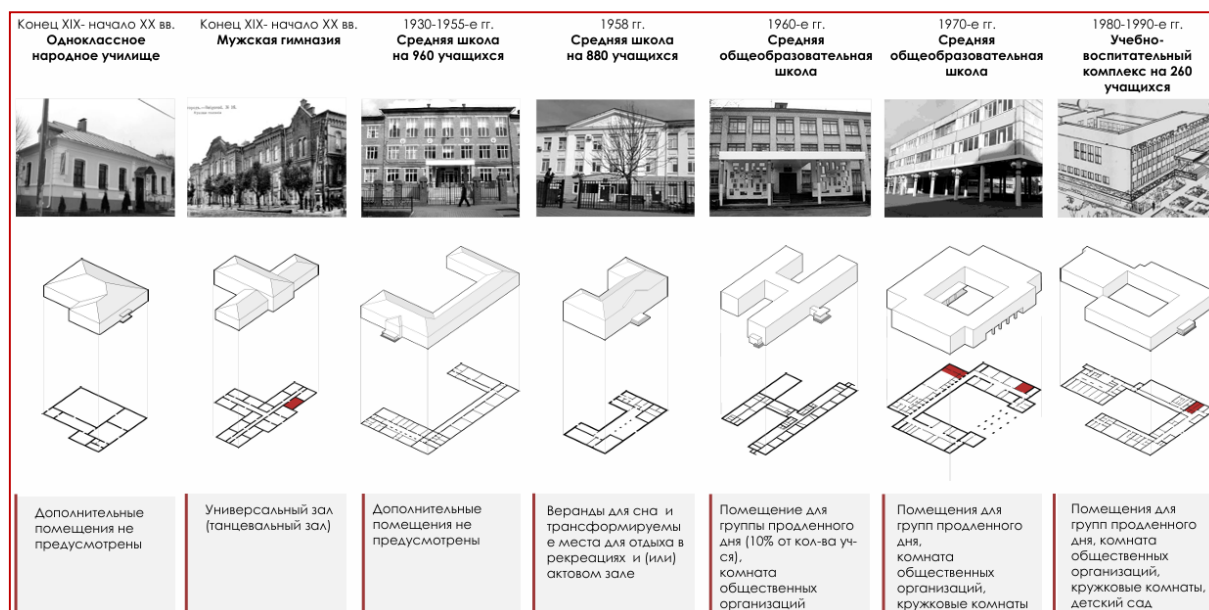


Рис. 2. Развитие функции внеурочной деятельности в структуре здания школы (конец XIX – конец XX вв.). Разработал Чечель И.П.

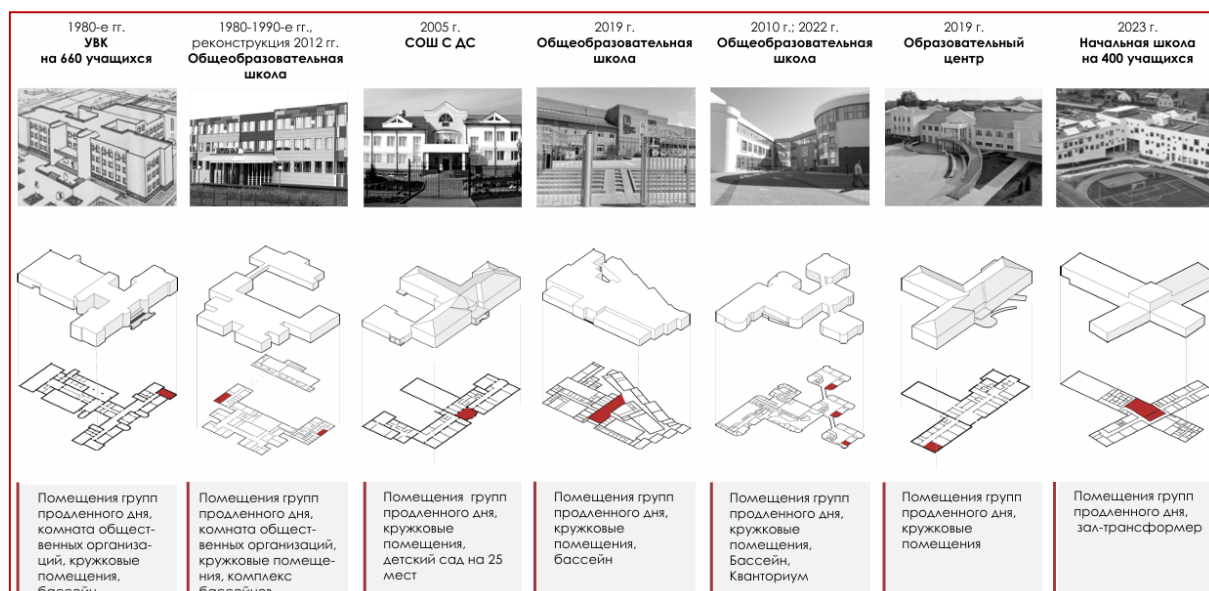


Рис. 3. Развитие функции внеурочной деятельности в структуре здания школы (конец XX – начало XXI вв.). Разработал Чечель И.П.

Современный образовательный комплекс полного дня представляет собой системный многоуровневый объект со сложной органи-

онно-педагогической и архитектурно-планировочной структурой с большой социальной нагрузкой (рис. 4).

Основным структурным элементом комплекса является здание общеобразовательной школы (или несколько зданий), в которых размещаются организации, осуществляющие образовательную деятельность по предоставлению услуг начального (1–4 классы); основного (5–9 классы) и среднего общего образования (10–11), в соответствии с утвержденными программами.

К основным структурным элементам комплекса так же относится здание детского сада (или несколько зданий), в которых размещаются организации, осуществляющие деятельность по воспитанию, обучению, присмотру, уходу и оздоровлению детей в возрасте от 2-х месяцев до 7 лет, в соответствии с образовательными программами дошкольного образования.



Рис. 4. Организационно-педагогическая структура образовательного комплекса полного дня с интеграцией блок-модулей центров внеурочной деятельности и дополнительного образования. Разработал Чечель И.П.

Согласно методическим указаниям по организации ШПД, в образовательном комплексе должны быть помещения для работы классов-групп или групп, организованных из обучающихся одной или нескольких параллелей; разноакцентированные пространства (кабинет, лаборатория, мастерские, библиотека, читальный зал, компьютерный класс, игротека, медиатека, помещения для работы классов-групп или групп, организованных из обучающихся одной или нескольких параллелей, пространства для общения и уединения, для игр, подвижных занятий и спокойной работы); мебель и оборудование должны соответствовать гигиеническим требованиям, предъявляемым к ней с учетом возрастных категорий обучающихся (при самоподготовке или организации других учебных занятий); наличие спортивных площадок, актового и спортивного залов, различных студий и т.д., необходимых для организаций дополнительного образования, досуга и отдыха; помещения для организации двухразового горячего питания [3].

ШПД интегрирует в себе функции общеобразовательной организации и организаций дополнительного образования. Но, как правило, дефицит площадей в существующих зданиях школ

не позволяет ввести новые функции и расширить услуги по дополнительному образованию.

Структуру комплекса необходимо дополнить новым функциональным элементом, который обеспечит решение этой проблемы. Таким структурным элементом, по мнению автора, должен стать центр внеурочной деятельности и дополнительного образования детей (ЦВДиДО) полнодневного образовательного комплекса, осуществляющий деятельность, направленную на реализацию программ раннего развития дошкольников и внеурочного времени школьников для их гармоничного и всестороннего развития. ЦВДиДО должны так же учитывать интересы взрослого населения – жителей территории, на которой расположены образовательные комплексы.

Все участники образовательных сообществ могут пользоваться услугами ЦВДиДО в соответствии с гибким режимом их эксплуатации – в послеурочные, утренние и вечерние часы, в выходные и праздничные дни. Вопрос вместимости ЦВДиДО может быть отрегулирован при составлении задания на проектирование для выполнения





**Вспомогательный, обслуживающий, инженерно-технический блоки** – проектируются в соответствии с действующими нормативными требованиями для обеспечения основных функций образовательного комплекса, а также бесперебойной, безаварийной эксплуатации всех его инженерных систем.

**Коммуникационный блок** – к нему отнесены горизонтальные и вертикальные коммуникации для связи различных функциональных блоков, зон и помещений между собой, это – коридоры, рекреации, холлы, лестницы.

Необходимо отдельно рассмотреть **состав дополнительного функционального блока ЦВДиДО**. В нем, основываясь на проведенном анализе отечественного и зарубежного опыта проектирования и строительства школьных зданий с услугой полного дня, а также выполненного социологического исследования среди групп потребителей и экспертов, рекомендуется предусмотреть следующие функциональные зоны:

- для самоподготовки и выполнения домашних заданий;
- для проведения досуга;
- для отдыха и укрепления здоровья;
- для работы комитетов ученического самоуправления;
- для школьного кванториума и мини-кванториума (дошкольного подразделения);
- для занятий по программам дополнительного образования взрослых и жителей территории;
- для школьного коворкинга
- для творческих студий и коворкинга жителей территории;

– для культурно-массовой работы детей и взрослых и школьного кафетерия;

– для развития творческого и технического потенциала учащихся и освоения образовательных программ организаций дополнительного образования по направлениям художественно-эстетической, инженерно-технической, биолого-опытнической, туристско-краеведческой деятельности; изучения космоса и астрономии; военно-патриотического воспитания; спортивных занятий;

– для дополнительного предпрофессионального образования.

Функциональные зоны (рис. 5) объединены в многофункциональные или полифункциональные блоки, на основании которых предложены следующие **архитектурно-типологические модели блок-модулей ЦВДиДО**:

**базовые** – предназначены для организации внеурочной деятельности и являются обязательными для включения в архитектурно-планировочную структуру полудневных комплексов. К ним относятся блоки для массовой работы; для самоподготовки и ученического самоуправления; для дополнительного образования детей и взрослых по освоению ИТ-технологий, кванториумы; коворкинги дошкольные, школьные, для взрослых жителей (тип 1Б, 2Б, 3Б) (рис.6);

**специализированные** – предназначены для развития творческого потенциала учащихся в различных сферах – в области художественно-эстетического и технического творчества; в спортивной и военно-спортивной подготовке в военно-патриотическом воспитании; в профориентации, в освоении образовательных программ организаций дополнительного образования.

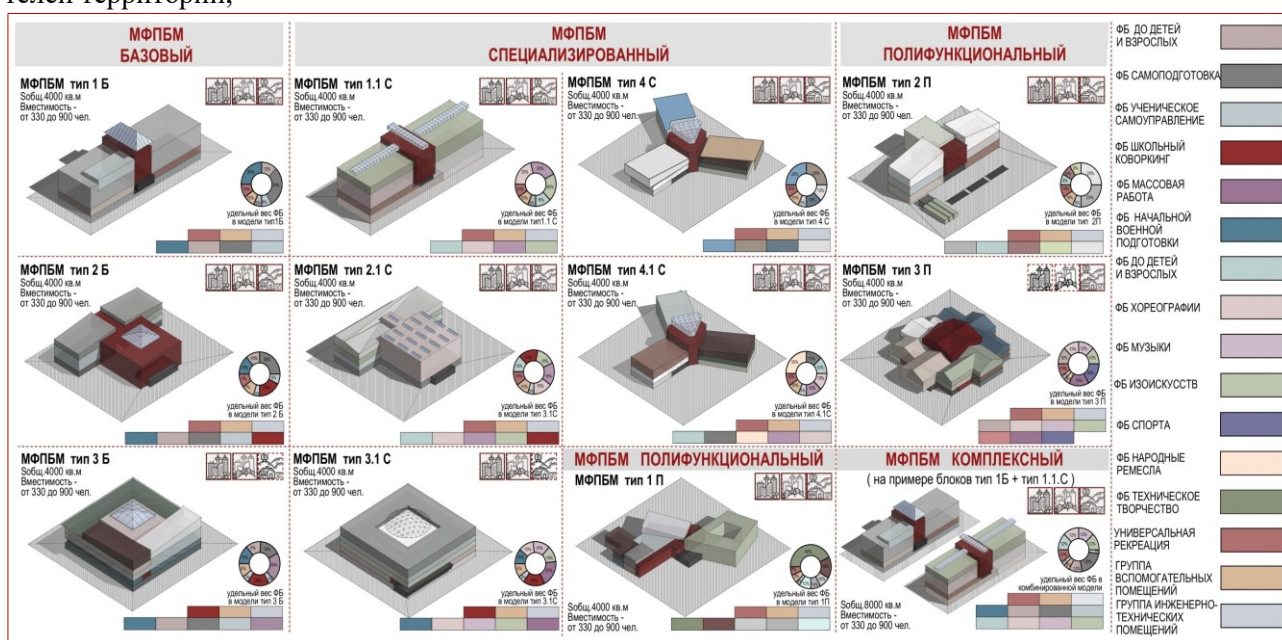


Рис. 6. Архитектурно-типологические модели блок-модулей ЦВДиДО образовательных комплексов полного дня. Разработал Чечель И.П.

Включение этих блоков в архитектурно–планировочную структуру комплекса позволяет совместить освоение программ организаций дополнительного образования с полудневным форматом занятий в школе (тип 1.1С, 2.1С, 3.1С, 4С, 4.1С) (рис.6);

**полифункциональные** – обеспечивают широкое направление внеурочной деятельности для детей и взрослых (тип 1П, 2П, 3П) (Рис.6);

**комплексные** блоки, которые представляют собой комбинации из базовых и специализированных модулей, на основе выбора потребителей, например, комбинируются блоки тип 1Б и 1.1С (рис.6).

**Применение** и состав специализированных, полифункциональных и комплексных блок-модулей ЦВДиДО регулируется выбором участников образовательных сообществ.

Архитектурно-типологические модели базовых (тип 1Б, 2Б, 3Б) и специализированных (тип 1.1С; 2.1С; 3.1С) блок-модулей ЦВДиДО в условиях реновации существующих зданий могут применяться в качестве пристроек к существующим зданиям – непосредственно к зданию или соединяться с ним через организацию наземного (надземного) перехода. Эти блоки могут быть выполнены в виде самостоятельных отдельно стоящих зданий, в зависимости от возможностей градостроительной площадки реновируемого объекта. Отдельные функциональные блоки, входящие в состав блок-модулей, могут быть выполнены в виде надстроек существующих школьных

зданий в один или два этажа из легких конструкций.

Для зданий с Н, Ш, П и Г – образной формой плана актуальным будет являться формирование замкнутой формы двора школы за счет пристроек блок-модулей типов 1Б и 1.1С или 2Б и 2.1С. Замкнутая система двора школы будет способствовать улучшению микроклимата внутришкольных дворовых пространств, что является целесообразным в отдельных районах Белгородской области с неблагоприятной экологией (города Губкин, Старый Оскол, Белгород) (рис. 7).

Архитектурно-типологические модели специализированных (тип 3.1С; 4С; 4.1С) или полифункциональных (тип 1П; 2П; 3П) блок-модулей ЦВДиДО удобно применять в качестве отдельно стоящих зданий для «точечной» вставки между зданиями, при объединении нескольких зданий школ и детских садов в один комплекс. Отдельно стоящее здание будет способствовать развитию объемно-пространственной композиции комплекса и его архитектурной выразительности. Данные блок-модули будут актуальны при реновации сельских или пригородных школ.

Разнообразные варианты проектных решений пристроек блок-модулей ЦВДиДО усилят архитектурно-типологическое многообразие образовательных комплексов полного дня, помогут лучше структурировать территорию и сформировать новые пространства – точки притяжения вокруг зданий внеурочных центров.

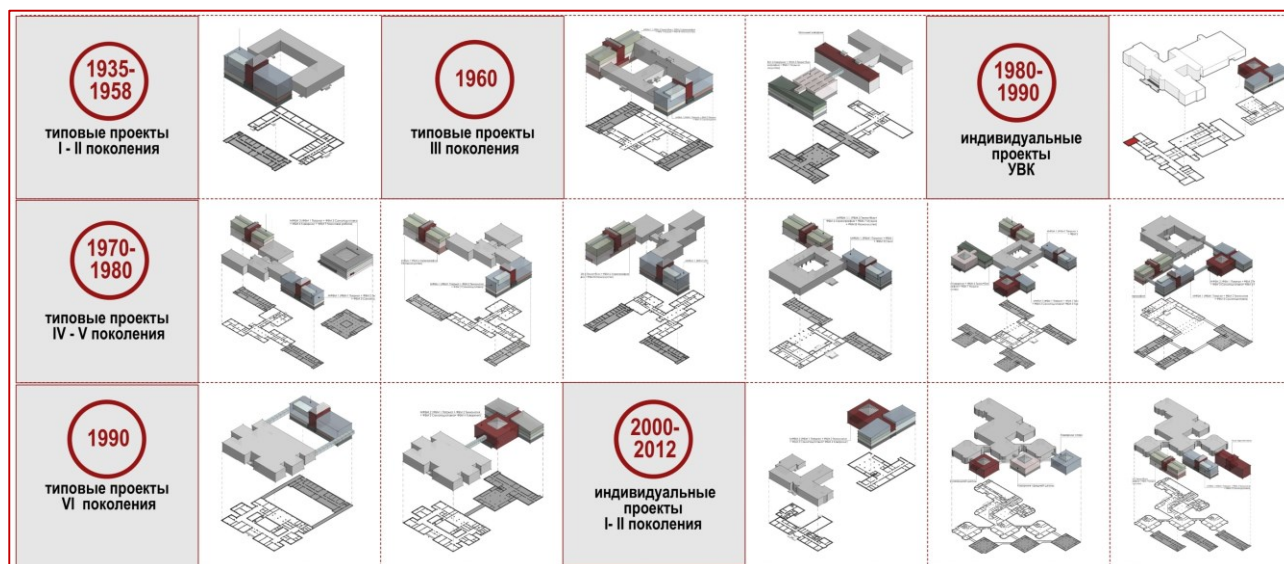


Рис. 7. Рекомендации по применению блок – модулей ЦВДиДО при реновации зданий школьного фонда Белгородской области. Разработал Чечель И.П.

### Выводы

1) Сформулированы предложения по типологии объекта образования с услугой полного дня. Предложено ввести в научный оборот новые термины, это – «образовательный комплекс полного

дня» и «центр внеурочной деятельности и дополнительного образования». Полудневный образовательный комплекс ориентирован на установление новых, более качественных требований к результатам учебно-воспитательного процесса и



усиление его социальной функции, которая определена потребностями и возможностями семьи.

2) Объединение в единый функциональный комплекс образовательного процесса с использованием имеющихся ресурсов организаций разных уровней (включая правовое, финансово-экономическое, материально-техническое, кадровое обеспечение), социума и семьи позволит максимально эффективно использовать существующую материально-техническую базу действующего школьного фонда и обеспечит адресное решение проблемы с хорошим экономическим результатом, который возможно получить на основе реновации, основанной на модульном подходе.

3) Целесообразность внедрения новых функций в архитектурно-планировочную структуру новых комплексов обусловлена современными тенденциями в развитии архитектуры образовательных организаций с услугой полного дня и факторами, определяющими требования к их проектированию. К функциональным блокам комплексов относятся основные (школы и детские сады), дополнительные (блок-модули ЦВДиДО), вспомогательные, обслуживающие и инженерно-технические, коммуникационные блоки.

4) Предложены архитектурно-типологические модели блок-модулей ЦВДиДО – базовый, специализированный, полифункциональный и комплексный. Базовые модели являются обязательными для применения при реновации, специализированные и полифункциональные могут применяться по выбору участников (потребителей) образовательных групп, комплексные модели представляют собой сочетание обязательных и вариативных блоков.

Вариативный ряд архитектурно-типологических моделей ЦВДиДО позволяет создавать широкую номенклатуру полудневного образовательного комплекса за счет комбинаторики предложенных вариантов.

5) Сделаны рекомендации по применению архитектурно-типологических моделей блок-модулей ЦВДиДО для реновации школьных зданий, относящихся к различным поколениям типовых советских проектов и индивидуальных проектов переходного этапа федеративного периода, основанные на таких приемах реновации, как пристройка, надстройка, «упаковка», встройка, блокировка через переход, отдельно стоящее здание и комплексное решение (включает несколько приемов одновременно).

Значимость полученных результатов для архитектуры состоит в развитии новых типов образовательных комплексов с развитым комплексом социальных функций, в которых создана комфортная образовательная среда для всех возрастов – от самых юных до взрослых пользователей.

Реновация зданий на основе блок-модулей центров внеурочной деятельности и дополнительного образования позволяет формировать новую архитектуру объектов образования, основанную на новых стандартах обучения и воспитания, для раскрытия таланта каждого обучающегося.

Комплексы создаются для обеспечения равных условий по доступности новых стандартов в образовании на всей территории субъекта РФ и для широкого охвата разнообразной образовательной, творческой деятельностью и коммуникацией различных групп участников образовательных сообществ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральный закон. Об образовании в Российской Федерации. от 29 декабря 2012 г. N273-ФЗ: [принят ГД ФС РФ 21.12.2012]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/36698/page/1> (дата обращения: 06.01.2025).
2. Школа полного дня. Методические рекомендации для образовательных организаций // ЦНППМ Центр непрерывного повышения педагогического мастерства. URL: <https://kuro-mo.ru/media/download/9778> (дата обращения: 03.02.2025).
3. Проект «Формирование доброжелательного пространства в образовательных организациях Белгородской области». URL: <http://образование31.пф/deyatelnost/proekty/formirovanie-dobrozhe-latelnogo-prostranstva-v-obrazovatelnyh-organizaciyah-belgorodskoj-oblasti/> (дата обращения: 06.01.2025).
4. Региональный проект «Организация образовательной деятельности в общеобразовательных учреждениях Белгородской области в режиме «Школа полного дня». URL: <https://obr.belregion.ru/deyatelnost/proekty/organizaciya-obrazovatelnoj-deyatelnosti-v-obsheobrazovatelnyh-uchrezhdeniyah-belgorodskoj-oblasti-v/> (дата обращения: 18.09.2024).
5. Рабочая программа воспитания ОГАОУ ОК «Алгоритм успеха» на 2022-2027 годы Белгород. 2022 г. URL: [https://algoritmuspeha.gosuslugi.ru/netcat\\_files/30/69/Rabochaya\\_programma\\_vospitaniya\\_OGAOU\\_OK\\_Algoritm\\_Uspeha\\_v\\_no-voy\\_redaktsii.pdf?ysclid=m41ndw8rqs330121235](https://algoritmuspeha.gosuslugi.ru/netcat_files/30/69/Rabochaya_programma_vospitaniya_OGAOU_OK_Algoritm_Uspeha_v_no-voy_redaktsii.pdf?ysclid=m41ndw8rqs330121235) (дата обращения: 26.11.2024).
6. Гельфонд А.Л. Общественное здание и общественное пространство. Дуализм отношений // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 2. С. 18–31.

7. Степанов В.И. Школьные здания. Москва: Стройиздат, 1975. 239 с.
8. Ульяновская С.И., Балакина А.Е. Нормы и регламенты для проектирования образовательных учреждений нового формата // Строительство: наука и образование. 2019. № 2. С. 1–20. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.6.
9. Ульяновская С.И. Архитектурно-планировочная организация учреждений дополнительного образования нового формата // Architecture and Modern Information Technologies. 2020. №1(50). С. 180–194. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15012
10. Колодин К.И. Особенности интеграции школьных пространств в урбанизированную среду больших городов // Вестник Евразийской науки. 2021. №4. [Электронный ресурс]. URL: <https://esj.today/PDF/09SAVN421.pdf> (дата обращения: 26.11.2024)
11. Радионов Т. В., Откидач М.Ю. Современные направления развития архитектуры зданий и сооружений общеобразовательных школ, подлежащих реконструкции // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2021. № 2(148). С. 78–83.
12. Гулькова Л.А., Каганович Н.Н. Архитектурно-функциональный потенциал атриумных структур в современных общественных зданиях // Сборник статей VI Международной конференции. Екатеринбург. 2021. С. 110–119.
13. Еремеева А.Ф. Общественные пространства в структуре многофункционального комплекса: современные тенденции организации // Вестник гражданских инженеров. 2020. №4 (81). С. 4–12. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-4-5-12.
14. Бутко В., Надточий А. АРХИТЕКТУРА РАЗВИТИЯ. Методология проектирования современных школ. Москва.: издательство ООО «Вокруг книги», 2022. 272 с.
15. Della Torre S., Bocciarelli M., Daglio L., Neri R. Buildings for Education. A Multidisciplinary Overview of the Design of School Buildings // SpringerOpen. Research for Development Series Editors. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1739111520&tld=ru&lang=en&name=2019%20Bovisa.pdf> (дата обращения 10.12.24).
16. Dudek M. The new learning environments [Электронный ресурс]. URL: [https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1739111320&tld=ru&lang=en&name=preview9781135142971\\_A23799714.pdf](https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1739111320&tld=ru&lang=en&name=preview9781135142971_A23799714.pdf) (дата обращения 10.12.24).
17. Vertakova Y., Babich T., Lebedenko O. Public-private partnership in the implementation of innovative urban development policy // E3S WEB OF CONFERENCES. 2019. Vol. 138, 02006. DOI: 10.1051/e3sconf/201913802006.
18. Arcus Center for Social Justice Leadership / Studio Gang // ArchDaily. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.archdaily.com/576630/arcus-center-for-social-justice-leadership-studio-gang> (дата обращения: 07.03.2023).
19. Yunzhai Village Community Activity Center / THAD + SUP Atelier // ArchDaily. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.archdaily.com/989336/yunzhai-village-community-activity-center-thad?ad\\_source=myad\\_bookmarks&ad\\_medium=bookmark-open](https://www.archdaily.com/989336/yunzhai-village-community-activity-center-thad?ad_source=myad_bookmarks&ad_medium=bookmark-open) (дата обращения: 09.03.2023).
20. Пчелинцева Т.С. О внеурочной деятельности в образовательных учреждениях // Вектор науки ТГУ. Серия: Педагогика, психология. 2016. № 3 (26). С. 53–57.

#### Информация об авторах

**Чечель Иван Павлович**, старший преподаватель кафедры «Архитектура и градостроительство». E-mail: [Golden-line7@yandex.ru](mailto:Golden-line7@yandex.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

Поступила 13.02.2025 г.

© Чечель И.П., 2025

**Chechel I.P.**

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

*E-mail: [Golden-line7@yandex.ru](mailto:Golden-line7@yandex.ru)*

## AN INNOVATIVE MODEL OF AN EDUCATIONAL ORGANIZATION "FULL-TIME SCHOOL" AS A TOOL FOR ARCHITECTURAL RENOVATION OF EXISTING SCHOOL BUILDINGS

**Abstract.** Modern Russia is resolutely renewing all spheres of life, which is impossible without updating the education system. Today, several new generation schools are being built in the Belgorod Region – the 5.0

generation school, which indicates a desire to move to a new level of creating an educational environment and comfortable conditions for meeting the requirements of state standards for educational activities at school. However, the main part of the regional school fund consists of school buildings of previous generations of mass Soviet construction and the beginning of the federal period, which are obsolete, have used their growth reserve and cannot provide the same level of educational environment as the projects of the new generation built after 2020. The renovation of these buildings is relevant to implement modern legislative requirements for the organization of regular and extracurricular activities based on the innovative model of general education "full-time school". It is possible to implement such a model in a full-time educational complex, an object of education of a new typology that integrates the functions of educational organizations of preschool, school and additional education. This requires the development of the functional and architectural planning structure of the educational complex, taking into account the existing typology of existing school buildings. The key to solving this problem lies in the inclusion of new additional functional blocks in the structure of the complexes for extracurricular activities, which are multifunctional planning block modules for use in the renovation of school buildings.

**Keywords:** full-day school, renovation, existing school fund, extracurricular activities, new typology, full-day educational complex.

## REFERENCES

1. Federal Law. About education in the Russian Federation. [Federal'ny'j zakon . Ob obrazovanii v Rossijskoj Federacii] Dated December 29, 2012, No. 273- FZ: [adopted by the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation on December 21, 2012]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/36698/page/1> (date of request: 06.01.2025). (rus)
2. Full-time school Guidelines for educational organizations. [Shkola polnogo dnya Metodicheskie rekomendacii dlya obrazovatel'ny'x organizacij]. CNPPM Center for Continuous Improvement of Pedagogical Skills URL: <https://kuro-mo.ru/media/download/9778> (date of request: 02/03/2025). (rus)
3. The project "Creating a friendly space in educational institutions Belgorod region". [Proekt«Formirovanie dobrozhelatel'nogo prostranstva v obrazovatel'ny'x organizacijax Belgorodskoj oblasti»]. URL: <http://образование31.рф/deyatelnost/proekty/formirovanie-dobrozhelatelnogo-prostranstva-v-obrazovatelnyh-organizacijah-belgorodskoj-oblasti/> (date of request: 06.01.2025). (rus)
4. Regional project "Organization of educational activities in educational institutions of the Belgorod region in the "Full-time school" mode [Regional'ny'j proekt «Organizaciya obrazovatel'noj deyatel'nosti v obshheobrazovatel'ny'x uchrezhdeniyax Belgorodskoj oblasti v rezhime «Shkola polnogo dnya»]. URL: <https://obr.belregion.ru/deyatelnost/proekty/organizaciya-obrazovatelnoj-deyatelnosti-v-obshheobrazovatelnyh-uchrezhdeniyah-belgorodskoj-oblasti-v/> (date of access: 09/18/2024). (rus)
5. The work program of education of the OG-AOU OK "Algorithm of success" for 2022–2027 Belgorod [Rabochaya programma vospitaniya OG-AOU OK «Algoritm uspeha» na 2022-2027 gody` Bedgorod]. 2022. URL:[https://algorithmspeha.gosuslugi.ru/netcat\\_files/30/69/Rabochaya\\_programma\\_vospitaniya\\_OGAOU\\_OK\\_Algoritm\\_Uspeha\\_v\\_no-voy\\_redaktsii.pdf?ysclid=m41ndw8rqs330121235](https://algorithmspeha.gosuslugi.ru/netcat_files/30/69/Rabochaya_programma_vospitaniya_OGAOU_OK_Algoritm_Uspeha_v_no-voy_redaktsii.pdf?ysclid=m41ndw8rqs330121235) (date of access: 11/26/2024). (rus)
6. Gelfond A.L. Public building and public space. Relationship dualism [Obshhestvennoe zdanie i obshhestvennoe prostranstvo. Dualizm otnoshenij]. Academia. Architecture and construction. 2015. No. 2. Pp. 18–31. (rus)
7. Stepanov V.I. School buildings [Shkol'ny'e zdaniya]. Moscow: Stroyizdat, 1975. 239 p. (rus)
8. Ulianovskaya S.I., Balakina A.E. Norms and regulations for designing educational institutions of a new format [Normy` i reglamenty` dlya proektirovaniya obrazovatel'ny'x uchrezhdenij novogo formata]. Construction: science and education. 2019. No. 2. Pp. 1–20. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.6. (rus)
9. Ulyanovskaya S. Architectural-Planning Organization of Institutions for Additional Education of a New Format. Architecture and Modern Information Technologies. 2020. No. 1(50). Pp. 180–194. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15012
10. Kolodin K.I. Features of the integration of school spaces into the urbanized environment of large cities [Osobennosti integracii shkol'ny'x prostranstv v urbanizirovannuyu sredu bol'shix gorodov]. Bulletin of Eurasian Science. 2021. No. 4. URL: <https://esj.today/PDF/09SAVN421.pdf> (date of access: 11/26/2024). (rus)
11. Radionov T.V., Otkidach M.Yu. Modern trends in the development of architecture of buildings and structures of secondary schools subject to reconstruction [Sovremennyye napravleniya razvitiya arxitektury` zdaniy i sooruzhenij obshheobrazovatel'ny'x shkol, podlezhashhix rekonstrukcii]. Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture. 2021. No. 2(148). Pp. 78–83. (rus)

12. Gulkova, L.A., Kaganovich N.N. Architectural and functional potential of atrium structures in modern public buildings. [Arxitekturno-funkcional'nyj potencial atriumnyx struktur v sovremennyx obshchestvennyx zdaniyax]. Collection of articles of the VI International Conference. Yekaterinburg, 2021. Pp. 110–119. (rus)

13. Ereemeeva A.F. Public spaces in the structure of a multifunctional complex: current trends in the organization [Obshchestvennye prostranstva v strukture mnogofunkcional'nogo kompleksa: sovremennye tendencii organizacii]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2020. No. 4 (81). Pp. 4–12. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-4-5-12 (rus)

14. Butko V., Nadochiy A. Architecture of development. Methodology of designing modern schools [Arxitektura razvitiya. Metodologiya proektirovaniya sovremennyx shkol]. Moscow.: publishing house of OOO "Around the book", 2022. 272 p. (rus)

15. Della Torre S., Bocciarelli M., Daglio L., Neri R. Buildings for Education. A Multidisciplinary Overview of the Design of School Buildings. SpringerOpen. Research for Development Series Editors. 2020. URL: [https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1739111520&tld=ru&lang=en](https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1739111520&tld=ru&lang=en&name=2019%20Bovisa.pdf)

[n&name=2019%20Bovisa.pdf](https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1739111520&tld=ru&lang=en&name=2019%20Bovisa.pdf) (date of access: 10.12.24).

16. Dudek M. The new learning environments. URL: [https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1739111320&tld=ru&lang=en&name=preview9781135142971\\_A23799714.pdf](https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1739111320&tld=ru&lang=en&name=preview9781135142971_A23799714.pdf) (date of access: 10.12.24).

17. Vertakova Y., Babich T., Lebedenko O. Public-private partnership in the implementation of innovative urban development policy. E3S WEB of Conferences. 2019. Vol. 138. 02006. DOI: 10.1051/e3sconf/201913802006.

18. Arcus Center for Social Justice Leadership / Studio Gang // ArchDaily. URL: <https://www.archdaily.com/576630/arcus-center-for-social-justice-leadership-studio-gang> (date of access: 07.03.2023).

19. Yunzhai Village Community Activity Center / THAD +SUP Atelier // ArchDaily URL: [https://www.archdaily.com/989336/yunzhai-village-community-activity-center-thad?ad\\_source=myad\\_bookmarks&ad\\_medium=bookmark-open](https://www.archdaily.com/989336/yunzhai-village-community-activity-center-thad?ad_source=myad_bookmarks&ad_medium=bookmark-open) (date of access: 09.03.2023).

20. Pchelintseva T.S. About extracurricular activities in educational institutions [O vneurochnoj deyatel'nosti v obrazovatel'nyx uchrezhdeniyax]. Vector of Science TSU. Series: Pedagogy, psychology. 2016. No. 3 (26). Pp. 53–57. (rus)

#### *Information about the authors*

**Chechel, Ivan P.** Senior lecturer at the Department of Architecture and Urban Planning. E-mail: Golden-line7@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

---

*Received 13.02.2025*

#### **Для цитирования:**

Чечель И.П. Инновационная модель образовательной организации «школа полного дня», как инструмент архитектурной реновации существующих школьных зданий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 9. С. 35–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-35-46

#### **For citation:**

Chechel I.P. An innovative model of an educational organization "Full-Time School" as a tool for architectural renovation of existing school buildings. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 9. Pp. 35–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-35-46

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-47-61

**Спирин П.П.***Научно-Исследовательский Институт Перспективного Градостроительства (ООО «НИИ ПГ»)**Центральный научно-исследовательский и проектный институт**Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства**Российской Федерации (ЦНИИП Минстроя России)**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**\*E-mail: pavelsp@list.ru*

## ЭКОЛОГО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ В ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВЕ

**Аннотация.** Отсутствие преемственности систем градостроительной документации между СССР и Российской Федерацией и достаточного количества специалистов градостроительного профиля, адаптированных к новым рыночным условиям градостроительной деятельности, привели к формированию новой системы градостроительных отношений. В документах территориального планирования и градостроительного проектирования исчезли разделы комплексной оценки территорий, а также пласт документов эколого-ориентированного планирования – территориальные комплексные схемы охраны природы, которые в СССР разрабатывались на разные административно-территориальные единицы. Значительное упрощение состава и содержания документов территориального планирования, определили интерес к зарубежной практике решения вопросов охраны окружающей природной среды и обеспечения устойчивого развития территорий. Как заимствование западного опыта устойчивого развития на перспективу, в нашей стране стали внедряться конъюнктурные документы «мастер-планы», по сути, не привносящие ничего нового. При этом в нашей стране имеются фундаментальные отечественные градостроительные методико-технические наработки, доказавшие свою многолетнюю эффективность на практике, которые необходимо использовать при подготовке градостроительной документации и развития правовой системы градостроительной деятельности.

**Основные научные результаты:** обоснована роль применения эколого-ориентированного подхода в подготовке и реализации градостроительной документации в России. Рассмотрены варианты имплементации в российскую градостроительную систему документов экологического планирования, как в виде отдельного отраслевого планирования, существовавшего в практике планирования СССР, так и в виде отдельных разделов комплексной оценки территорий и мероприятий по охране окружающей природной среды в составе градостроительной документации.

**Ключевые слова:** Эколого-ориентированное территориальное планирование, территориальные комплексные схемы охраны природы (терКСОП), ландшафтное планирование, генеральный план, пригородная лесопарковая зона, природно-экологический каркас, территориально-природные комплексы (ТПК).

Термин «эколого-ориентированное планирование (проектирование)» достаточно давно и часто используется в публикациях, посвященных градостроительной деятельности, но получил правовое закрепление в новом национальном проекте «Экологическое благополучие» (2025-2030 гг.), пришедшем на смену нацпроекту «Экология» [1]. Минстрою России совместно с другими органами власти и институтами развития предстоит разработать стандарты эколого-ориентированного городского проектирования, которые предполагают, в том числе создание вокруг городов лесопарковых зеленых поясов.

На современном этапе социально-экономического развития страны для достижения стратегических целей в природоохранной сфере необходим переход к рыночным инструментам использования природных ресурсов, охраны природы и окружающей среды, что в свою очередь

требует совершенствования нормативно-правовой базы. В ряду первоочередных задач экологического развития стоят задачи:

- реализация прав человека на благоприятную окружающую среду;
- обеспечение экологически ориентированного роста экономики с внедрением эффективных инновационных технологий, направленных на сокращение негативного воздействия на окружающую среду;
- восстановление нарушенных естественных экосистем, сохранение биологического разнообразия;
- внедрение экологически безопасного обращения с отходами;
- бережное использование природных ресурсов для удовлетворения потребностей нынешнего и будущих поколений людей;

– совершенствование правопорядка в области охраны окружающей среды и экологической безопасности населения и территорий.

Несомненно, приоритетом была и остается экологическая безопасность – указом Президента РФ от 19 апреля 2017 г. № 176 утверждена Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года. План по реализации данного документа включает 108 мероприятий, выполнение которых находится под контролем Правительства РФ [2].

Экологическое развитие регламентируется документами федерального уровня как общего действия, так и направленными на отдельные компоненты природной среды. При этом особое значение имеет Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ «Об охране окружающей среды», как базовый документ в области экологического развития и обеспечения экологической безопасности. Нормативная правовая база в области охраны природы и снижения неблагоприятного воздействия на окружающую среду ежегодно пополняется десятками регулирующих правовых актов.

Так с первого марта 2025 г. вводится новый порядок и правила проведения оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) в отношении планируемой хозяйственной и иной деятельности, которая может оказать прямое или косвенное воздействие на окружающую среду (*Постановление Правительства РФ от 28.11.2024 № 1644 «О порядке проведения оценки воздействия на окружающую среду». ОВОС разрабатывается для всех объектов, которые проходят государственную экологическую экспертизу (ГЭЭ)*). Также наряду с производственным экологическим контролем в области охраны природы вводится общественный экологический контроль и др.

На оздоровление окружающей среды и создание достойных условий для жизни людей в период 2025–2030 гг. направлена реализация национального проекта «Экологическое благополучие» вместо нацпроекта «Экология», из которого перешли федеральные проекты: «Генеральная уборка» и «Экономика замкнутого цикла», включающего 6 федеральных проектов – по созданию инфраструктуры для сортировки и переработки отходов, ликвидации свалок и расчистке водоемов, сохранению лесов, снижению выбросов в атмосферу, сбережению биологического разнообразия и развитию экологического туризма.

Реализация мероприятий федерального проекта «Вода России» в составе данного нацпроекта позволит улучшить условия проживания более чем 23 млн человек, проживающих на приморских и приречных территориях регионов с наиболее высокой плотностью населения. Будет

продолжена работа по обеспечению населения качественной питьевой водой и развитию рекреационного потенциала особо охраняемых территорий и объектов.

Устойчивое развитие территории является основополагающим принципом и целью градостроительной деятельности, обеспечивающее «стабильное социально-экономическое сбалансированное развитие, не разрушающее окружающую природную среду и обеспечивающее непрерывный прогресс общества» [3].

В основных принципах законодательства о градостроительной деятельности (ст. 2 Гр К РФ) экологические требования присутствуют в 7 из 12 позиций, которые, однако имеют декларативный характер, так как не находят полноценного раскрытия в последующих статьях, регулирующих все виды градостроительной деятельности по развитию территорий (ст. 1 Гр К РФ), прежде всего в регламентации подготовки градостроительной документации. Термин градостроительная документация широко используется для обозначения всей совокупности и включает документы территориального планирования, документацию по планировке территории и по ее межеванию, хотя в Гр К РФ этот термин относится лишь к проектам планировки и проектам межевания территории.

Нормативное правовое регулирование в области развития территорий постоянно и преемственно развивается, как в градостроительной, так и природоохранной сферах, что находит отражение в особенностях осуществления как градостроительной, так и экологической политики государства в разные исторические периоды развития страны.

Этапы нормативного и правового регулирования вопросов рационального природопользования, охраны окружающей среды в градостроительной документации:

*Первый этап: Период 1917 – 1930-х гг.*

Проблемам сохранения и рационального использования природных богатств в стране Советов изначально придавалось большое значение. В первые годы после революции издавались декреты, распоряжения, постановления об охране земель, лесов, вод, растительного и животного мира. По данным В. В. Соколова, в 1917-1920 годах было издано 268 декретов, постановлений, распоряжений руководящих органов, посвященных проблемам природопользования и охраны природы [4]. Уже в этот период были заложены правовые основы охраны окружающей среды крупных городов и промышленных объектов.

В разработке правовых актов Советской страны принимали участие опытные специалисты – представители научной и педагогической



школ дореволюционного времени, что способствовало созданию ряда государственных комитетов и комиссий, в том числе Государственного комитета по охране природы (1925 г.), Всероссийского общества охраны природы (1924 г.), а также расширению общественного движения по охране природы. В этот период также был принят принципиально важный документ для городского строительства: «Положение о нормах чистоты сточных вод» (1923 г.), – декрет «Об охране памятников природы, садов и парков» (1921), по которому можно было объявлять участки природы, представляющие собой научную и культурно-историческую ценность; Лесной кодекс РСФСР (1923), декрет «Об учете и охране памятников искусства, старины и природы» (1924), стал основой разработки инструкции «Об учете и охране памятников природы»; декрет «Об охране участков природы и ее отдельных произведений, имеющих преимущественно научное и культурно-историческое значение» (1925).

*Второй этап: Период 1930 – 1960-х гг.*

На указанный период приходится принятие очень важных документов в области экологического оздоровления территорий. В 1930-е годы приняты нормативы в природопользовании, установлены предельно-допустимые концентрации (ПДК) для 12 вредных веществ, также декрет «О загрязнении воздуха выбросами электростанций» (1937 г.), «Временный стандарт качества воды, подаваемой в сеть хозяйственно-питьевых водопроводов» (1939 г.), а позднее и ГОСТы по питьевой воде (1944 г.). В октябре 1960 г. принимается закон «Об охране природы в РСФСР». Таким образом, в законодательстве было закреплено исключительное право государства на природопользование, в том числе и на уровне городского планирования и строительства [5].

*Третий этап: Период 1960 – 1991-х гг.*

Данный период характеризуется самым масштабным и эффективным с позиций законодательного регулирования учета природно-экологических условий при подготовке градостроительной документации в СССР. Причиной таких изменений стали продолжающиеся интенсивные темпы индустриализации, экстенсивное развитие народного хозяйства и нарастающая деградация уникальных природных комплексов потребовали принятия специальных постановлений Совета Министров СССР по решению ряда проблем в отношении: озера Байкал, Каспийского моря, крупных рек Волга и Урал. Однако, для радикального улучшения ситуации принятые меры оказались недостаточными. По мнению специалистов, лишь к концу 1960-х годов природоохранительная функция государства оформилась как

самостоятельное направление, что позволило перейти на новый уровень решения экологических проблем.

В 1970-1980-е гг. проблемы охраны окружающей среды в стране были признаны приоритетными. В связи с этим в начале 1970-х гг. активизировалась работа по совершенствованию механизмов природопользования и охраны окружающей среды, усилилось влияние общественности на процессы принятия экологически значимых решений. В этот период были разработаны и приняты фундаментальные законы о земельных и водных ресурсах, недрах, лесах, атмосферном воздухе, животном мире и здравоохранении.

В 1970-х годах завершилось создание системы охраны природы на всех уровнях государственного управления и контроля за использованием и охраной отдельных видов природных ресурсов, которые стали осуществляться разными государственными органами.

Характерной чертой этого периода стал поиск экономических решений в области охраны окружающей среды и рационального природопользования, а также вопросы управления в сфере окружающей среды.

В Постановлении ЦК КПСС и СМ СССР от 29 декабря 1972 года № 898 «Об усилении охраны природы и улучшении использования природных ресурсов» отмечается, что многие министерства, ведомства, предприятия и организации не занимаются должным образом вопросами охраны окружающей природной среды от загрязнения и обеспечением рационального использования природных ресурсов.

К постановлению разработано 7 приложений, включающих: задания по проведению в 1973-1975 годах мероприятий по уменьшению вредных выбросов в атмосферу, список 48 городов с наибольшим загрязнением атмосферного воздуха, перечень объектов капитального строительства предприятий по производству специального оборудования по очистке сточных вод городов и промышленных предприятий, производству аппаратуры для очистки газов налаживанию серийного выпуска продукции.

Однако уже 1 декабря 1978 г. было принято Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР от № 984 «О дополнительных мерах по усилению охраны природы и улучшению использования природных ресурсов» [5].

Указанные постановления послужили основанием для введения Госстроем СССР нового документа для эколого-планировочного и эколого-хозяйственного развития города – Комплексной схемы охраны окружающей среды (КСОС).

Госстроем СССР, Госпланом СССР и Госкомитетом по науке и технике в ноябре 1982 г были

утверждены «Методические указания по составлению комплексных схем охраны природы».

В указанных документах должны были решаться задачи по нормированию антропогенных нагрузок на окружающую природную среду, нивелирования последствий от негативного влияния промышленных предприятий, сельского хозяйства, развития инфраструктуры и рекреационной деятельности, установление планировочных ограничений для сохранения ландшафтного разнообразия и экологической устойчивости территорий. Выработка рекомендаций по формированию экологически сбалансированной среды для проживания населения, рациональному природопользованию, средозащитным мероприятиям, выделению проблемных ареалов окружающей

природной среды, требующих сохранения и восстановления.

ТерКСОПы разрабатывались на 10-25 лет в зависимости от административно-территориальной единицы планирования (рис. 1).

Методикой было предусмотрено разработка КСОП для городов и крупных промышленных центров, производственно-территориальных и отдельных природных комплексов, а также для областей, краев, автономных и союзных республик, укрупненных регионов, охватывающих несколько областей или республик. Эти методические указания стали основой для составления методических рекомендаций КСОП области и города.

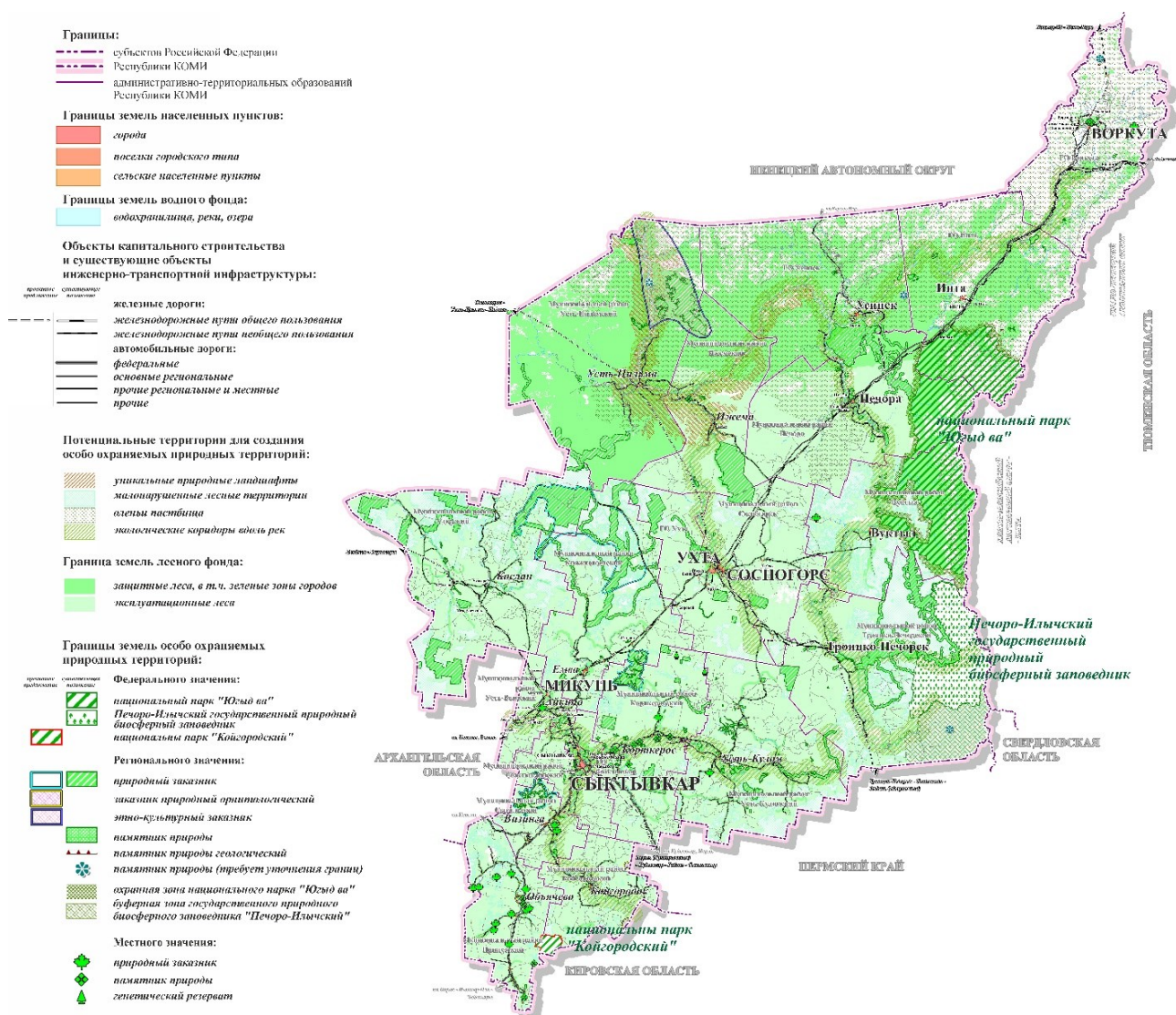


Рис. 1. Пример территориальной комплексной схемы охраны природы Республики Коми (Презентация НИИ ПГ)

В 1986 г. ЛенНИИПградоостроительства были разработаны «Методические рекомендации по составлению территориальных комплексных

схем охраны природы области» (авторский коллектив: канд. арх. В. И. Смирнов, И. А. Жаворонкова и И. Ф. Михайлова. Научные редакторы: канд. философ. наук Г.М. Воропаева и д. биол.

наук О. Г. Чертов) на основе обобщения опыта подготовки КСОП Ленинградской, Мурманской и Архангельской областей.

ТерКСОПы разрабатывались как самостоятельная документация территориального планирования регионального уровня, или как природоохранный раздел в проектах и схемах районной планировки. Подготовка нового вида территориально-планировочной документации велась институтами градостроительного профиля с привлечением специализированных научных, проектных и других организаций, занимающихся природопользованием. Работы выполнялись за счет госбюджета по плану министерств и ведомств, согласованных с Госпланом СССР. Заказчиками таких работ могли выступать: Госстрой союзной, автономной республики, краевой и областной исполкомы, а в отдельных случаях – министерства и ведомства СССР [7].

Аналоги терКСОПов появились и в большинстве европейских государств, в частности в Германии имеется отраслевая система эколого-ориентированного планирования, которая называется ландшафтное планирование. Необходимо пояснить, что понятие ландшафт в России и Германии отличаются по-своему сутевому значению. Ландшафт в немецком правовом и научном толковании – это участки природной среды, свободные от застройки, в отличие от сложной иерархии ландшафтной дифференциации, которая сложилась в российском научном направлении ландшафтоведения начиная от неделимой единицы биотопа фации до природно-климатической зоны. Цели и задачи ландшафтного планирования регламентируются Федеральным законом об охране природы Германии, согласно которому использование природных ресурсов и ландшафтов не должно нарушать природное равновесие. Целью ландшафтного анализа является изучение структуры и экологического состояния природных ландшафтов, характера землепользования и проблемных ситуаций, определение допустимого уровня антропогенной нагрузки. В результате оценки ландшафтов устанавливается степень пригодности ландшафтов (участков природы) для того или иного видов использования с учетом устойчивости к нагрузкам и проводится зонирование территории, определяющее функции ландшафтов (лесохозяйственные, сельскохозяйственного использования, урбанизированные, рекреационные, курортные и другие). Ландшафтное планирование также включает информацию по возможным неблагоприятным воздействиям на ландшафты, что позволяет спрогнозировать возникновение конфликтных ситуаций и предусмотреть мероприятия по их устранению.

Таким образом, ландшафтное планирование взаимосвязано с общей пространственной организацией территории.

Также, как и территориальное планирование, ландшафтное планирование осуществляется на нескольких иерархических уровнях с соответствующим уровнем детализации и масштабом проработки. Планируемые положения и предписания всех уровней последовательно детализируются. Программа развития ландшафтов, разрабатываемая на уровне федеральных земель, реализуется в рамках региональных планов ландшафтных планов. В ландшафтном планировании на муниципальном уровне (община, город) на основе рамочных предписаний вышестоящих уровней уточняются цели охраны природы и сохранения ландшафтов для соответствующего планируемого пространства и разрабатываются ландшафтные планы общин, планы озеленения с непосредственной привязкой к земельным участкам – в городах [8, 9].

*Современный период развития* градостроительной деятельности ознаменован принятием нового градостроительного кодекса РФ в 2004 году, в содержании которого не оказалось экологического планирования, подготовка ТерКСОПов была прекращена, а методические рекомендации по их составлению потеряли свою легитимность.

Небольшие разделы, по комплексной оценке, территорий, которые требовались при подготовке градостроительной документации окончательно были исключены принятием поправок 41-ФЗ в градостроительный кодекс РФ в 2011 году.

Однако, многие коллективы традиционных градостроительных институтов используют методические рекомендации по терКСОПам для разработки материалов обоснований и выработки качественных проектных решений при подготовке документов территориального планирования – схем территориального планирования, генеральных планов, крупномасштабных проектов документации по планировке территорий. В частности, продолжают использоваться в Научно-Исследовательском Институте Перспективного Градостроительства (НИИ ПГ, Санкт-Петербург) для выполнения отдельных задач (природоохранное и хозяйственное районирование, эколого-планировочное зонирование, определение предельно-допустимых антропогенных, в том числе демографических или рекреационных нагрузок на территориально-природные комплексы) в составе документов территориального планирования [10].

Опыт подготовки документов территориального планирования на принципах системно-экологического проектирования, в частности, был осуществлен при разработке проекта схемы территориального планирования Всеволожского муниципального района Ленинградской области (Схема территориального планирования Всеволожского района Ленинградской области утверждена в 2012 году. Рук. П.П. Спирин, ГАП Т.В. Варгина, ГИП М.М. Амиров, специалисты: Ю.С. Вязилова, В.М. Мякиненков, Э.А. Миленина, Н.П. Фомичева, С.Г. Кудымова и др.) на административной границе с Санкт-Петербургом. Район является зоной взаимных интересов по использованию его территории: Ленинградской областью, Санкт-Петербургом, собственно муниципальным районом и входящими в него муниципальными образованиями (поселениями), поэтому увязка многочисленных и разнонаправленных интересов по использованию его территории стала важнейшей задачей разрабатываемого документа.

Всеволожский район является одним из самых развитых по экономическим показателям, транспортной инфраструктуре, плотности и численности населения и остается одним из самых привлекательных для инвестиций вследствие его непосредственного примыкания к Санкт-Петербургу.

Территория Всеволожского района – это также зеленая лесопарковая зона, лёгкие крупнейшего мегаполиса; рекреация (еженедельная, сезонная). Во Всеволожском районе сосредоточено более 80 % всех садоводческих некоммерческих объединений Санкт-Петербурга (в настоящее время более 1000 ед.); места элитного малоэтажного жилищного строительства, а также несоразмерно большие массивы многоэтажных жилых кварталов, как продолжение окраин мегаполиса на территории соседнего региона Ленинградской области.

Привлекательность Всеволожского района определяется также расположением на его территории объектов инженерной инфраструктуры Санкт-Петербурга в электроэнергетике, водоснабжении, мусоропереработке и др.

Анализ принятых за последние годы генеральных планов муниципальных образований первого уровня, в том числе – Мурино, Новодевяткинского, Бугровского, Заневского, Колтушского, а также Всеволожского и Сертоловского городских поселений показал, что объемы запроектированного на их территориях жилищного строительства позволят разместить в нем порядка одного миллиона человек при общей численности населения Ленинградской области в то время – 1 600 000 человек.

Проектировщики генеральных планов и проектов планировки первоочередных жилых районов стремились максимально удовлетворить запросы инвесторов – крупных строительных компаний исходя из площади территорий, включенных в границы населенных пунктов земель сельскохозяйственного назначения и земель лесного фонда.

При этом в большей части сельских поселений района перспективная численность населения не была увязана с соответствующим созданием рабочих мест. Проектировщику необходимо решить задачи по снижению доли будущей официальной и скрытой безработицы, предусматривать мероприятия по стабилизации градообразующей базы поселений, ликвидации территориальной диспропорции в структуре занятости.

Одной из самых сложных проблем подготовки проекта схемы территориального планирования Всеволожского района являлось определение перспективной численности населения, что требовало учета демографической структуры постоянного и сезонно пребывающего на территории населения, а также учета специфики хозяйственной и градостроительной деятельности. В этих целях анализировалось и оценивалось сложившееся положение в структуре занятости, определялись перспективы видов экономической деятельности во всех поселениях района, моделировалось соотношение занятых в основных отраслях (промышленности, производственно-логистической деятельности, транспорте, инфраструктуре, сельском хозяйстве, рекреации, сфере услуг).

Оптимизация численности населения особенно затруднительна для поселений, примыкающих к границе Санкт-Петербурга. Для муниципальных образований, примыкающих к кольцевой автодороге (КАД), характерна преимущественно логистическо-складская и транспортная специализация, которые в градообразующей базе муниципальных образований не играют системообразующей роли и не формируют большую численность населения.

В расчетах были использованы критерии оптимальной численности населения:

- рациональное соотношение экономически активного и нетрудоспособного населения;
- максимальная занятость трудоспособного населения с наличием резерва трудовых ресурсов;
- соответствие структуры трудовых ресурсов требованиям хозяйственной специализации, типу населенного пункта и градостроительной ситуации.

Под влиянием инвесторов при подготовке генеральных планов муниципальных образований «прикадovской» зоны численность населения определялась в зависимости от территориальных ресурсов, в основном за счет включенных в границы населенных пунктов земель других категорий, преимущественно, сельскохозяйственного назначения [11].

На рисунке 2 представлены диаграммы перспективной численности населения по современному состоянию, максимальному и оптимальному сценариям с отображением на картах схем плотности населения по каждому поселению, выполненные в составе Схемы территориального планирования Всеволожского района.

Так в дер. Кудрово Заневского сельского поселения с населением 91 человек, по генеральному плану планируется 80 тыс. чел., из них реально подтверждено расчетом градообразующей базы чуть более 10 тыс. человек – такой анализ был проведен по каждому населенному пункту зоны, примыкающей к Санкт-Петербургу.

Ориентировочные расчёты перспективного населения выполнялись с выделением трёх групп населения (постоянного зарегистрированного, живущего постоянно, но незарегистрированного и сезонного населения) и проведены для каждого муниципального образования индивидуально.

Фактически достигнутая численность постоянного населения (зарегистрированного) Всеволожского района на 2024 год составляет 554,3 тыс. человек, что достаточно близко к показателям, определенным в СТП Всеволожского района, с учетом изменений статуса части сельских населенных пунктов на городские, а также возможностей легализации постоянного проживания в садоводствах. Сегодня статус города получили бывшие сельские населенные пункты: Мурино и Колтуши, статус поселка городского типа – дер. Б. Янино.

Экологическое состояние Всеволожского района определяется воздействием промышленных производств, сельскохозяйственных комплексов, находящихся на территории района, транспорта, но основным источником антропогенного воздействия является расположенный с наветренной (западной) стороны г. Санкт-Петербург.

В районе продолжается интенсивное развитие производственных зон, вводится в эксплуатацию жилая многоэтажная застройка практически во всех приближенных к границам Санкт-Петербурга муниципальных образованиях, а, следовательно, возрастает трафик движения транспорта, что негативно отражается на состоянии окружающей среды. В результате увеличения антропо-

генной нагрузки на природные комплексы, ухудшается состояние сосновых древостоев, отмечается нарушение лишайникового покрова и сокращение их видов, др.

Дополнительно выявлено, что прогрессируют процессы разрушения традиционного природопользования – сельскохозяйственной деятельности, значительно осложняется решение задач сохранения экологического равновесия и создания новых особо охраняемых и рекреационных территорий.

Основным направлением деятельности по оздоровлению экологической обстановки и охраны окружающей среды на территории Всеволожского района является проведение превентивных и реабилитационных мероприятий по каждому природному комплексу: атмосферный воздух, поверхностные и питьевые воды, почвы, природные ландшафты.

В составе материалов по обоснованию СТП Всеволожского района были проведены инженерные изыскания по оценке окружающей среды и разработана ландшафтная карта Всеволожского района с выделением территориально-природных комплексов (ТПК) по типам ландшафтов и установлением максимально возможных нагрузок на ТПК (рис. 3, 4, 5).

В ходе подготовки проекта были определены предельно допустимые – антропогенная, рекреационная и демографическая емкости территории ТПК каждого поселения, примыкающего к границам Санкт-Петербурга, при превышении которой процессы деградации не могут компенсироваться естественными природными процессами и требуют значительных инвестиционных ресурсов для восстановления. Сложившийся природный каркас территории является частью природно-экологического каркаса территории Всеволожского района, Карельского перешейка и Ленинградской области в целом.

Для сохранения экологического баланса при осуществлении градостроительной деятельности на территории любого городского или сельского поселения в границах района должны учитываться экологические и природоохранные ограничения, предъявляемые к территории, входящей в границы района. Все планируемые мероприятия должны проверяться с точки зрения сохранения природных комплексов, её особо охраняемых природных территорий и объектов и не должны нарушать регламенты природопользования в разных зонах каркаса [12–14].

Схема территориального планирования Всеволожского муниципального района Ленинградской области утверждена Решением Совета депутатов МО «Всеволожский муниципальный район» Ленинградской области № 88 от



20.12.2012 г. и остается до настоящего времени актуальным действующим документом [15]. Важным стратегическим направлением охраны окружающей среды и сохранения естественных экосистем является сохранение биоразнообразия и повышение устойчивости естественных экосистем к антропогенным нагрузкам. Основной формой защиты, охраны и поддержки всего биораз-

нообразия являются особо охраняемые природные территории (ООПТ). На территории Всеволожского муниципального района после 2008 года организовано две ООПТ – Токсовские высоты – памятник природы площадью 59 га (2014 г.), Токсовский природный парк площадью 2753 га (2019 г.). При этом площадь юридически оформленных ООПТ чрезвычайно мала – 1,5 % от площади района.

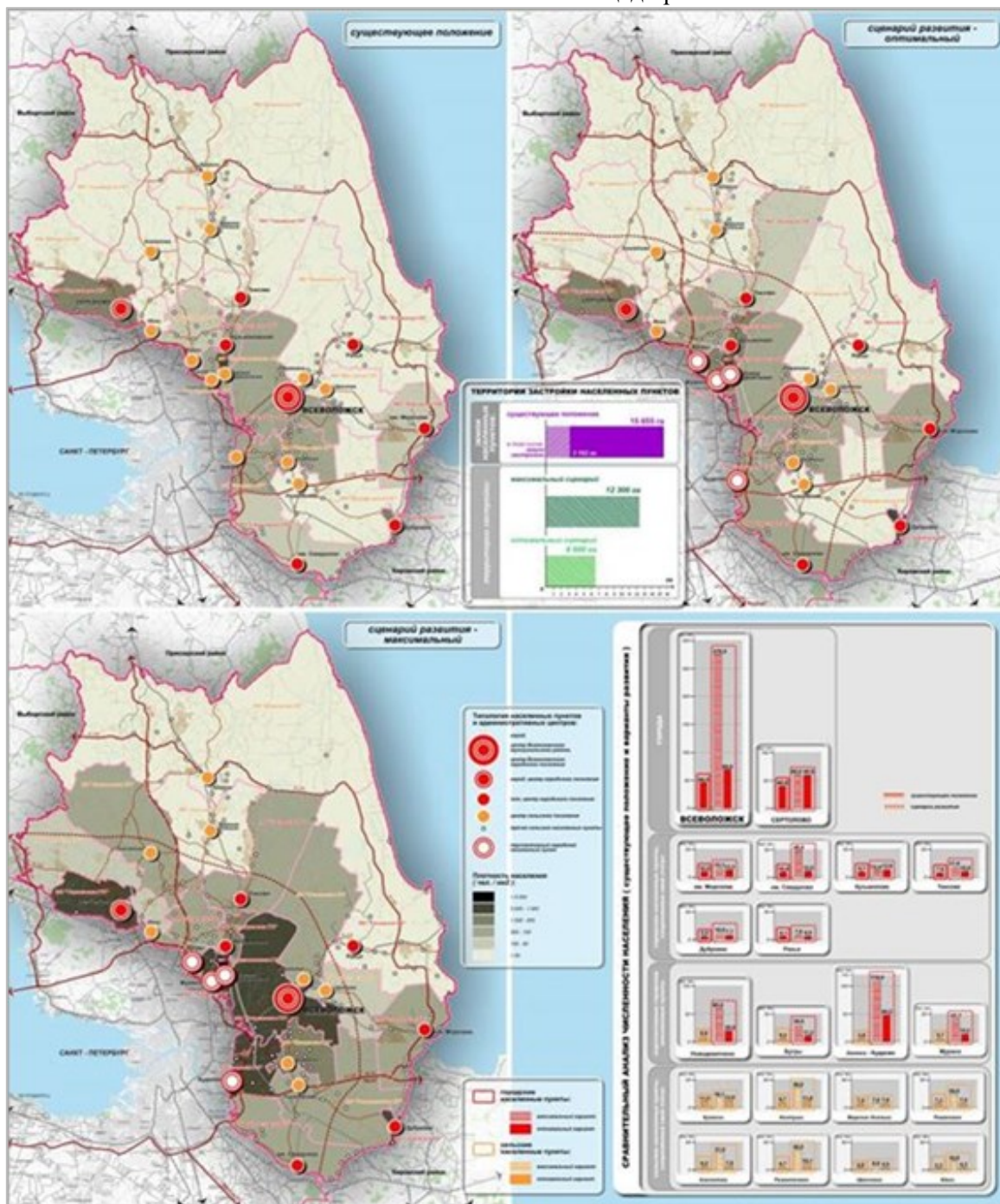


Рис. 2. Сценарии перспективной численности населения: оптимальный и максимальный в сравнении с современным состоянием

Главной особенностью Всеволожского муниципального района является его геоэкологическое положение в качестве буфера между Санкт-Петербургом и Ладожским озером, в связи с чем,

важное значение приобретает регламентация хозяйственной деятельности на территориях, имеющих природоохранное, средозащитное и средоформирующее значение.



Планирование устойчивого развития территории района проводится с учетом необходимости сохранения пространственных связей между экологически ценными природными комплексами. Под экологическим каркасом территории понимается совокупность её экосистем, с индивидуальными характеристиками природопользования для каждого участка, образующих про-

странственно-организованную структуру, которая поддерживает экологическую стабильность территории, предотвращая потерю биоразнообразия и деградацию природных систем [16]. Формирование экологического каркаса на территории Всеволожского муниципального района направлено на развитие и регламентацию существующих форм территориальной охраны природы и регулирования природопользования.

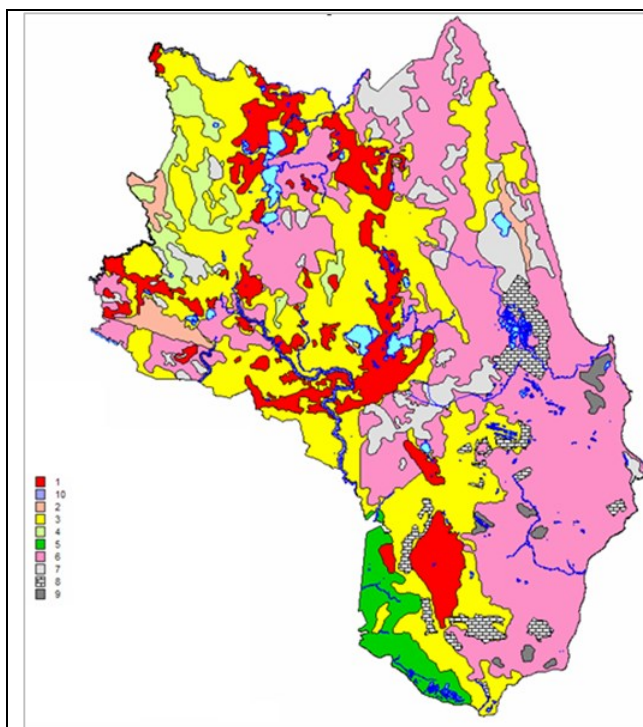


Рисунок 3. Ландшафтная карта Всеволожского муниципального района Ленинградской области

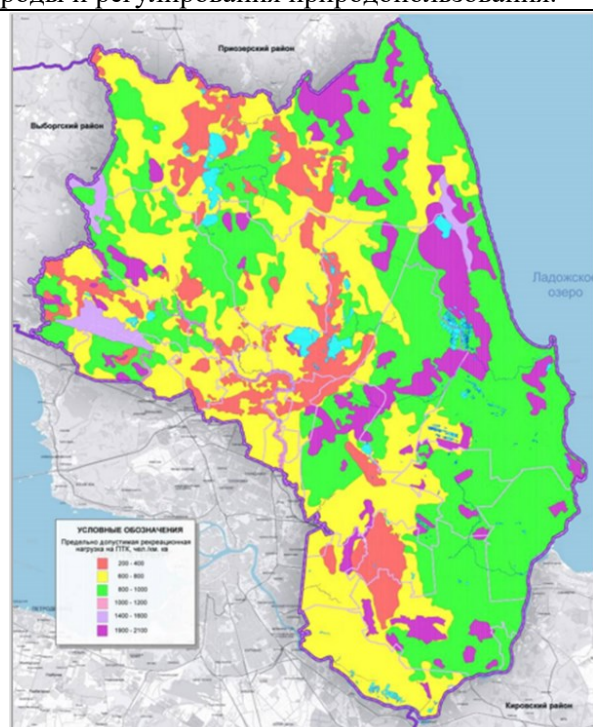


Рисунок 4. Предельно допустимая рекреационная нагрузка на природно-территориальные комплексы

**Условные обозначения для рисунка 3 Ландшафтная карта Всеволожского муниципального района  
Ленинградской области**

1. Округлые холмы и группы холмов с крутыми склонами ( $5 - 25^\circ$ ), сложенные безвалунными, реже галечными и мелко-валунными песками и супесями, хорошо дренируемые с сосняками зеленомошными и лишайниковыми на подзолистых иллювиально-гумусово-железистых почвах.
2. Плоско-волнистые равнины, с нормальным или кратковременно избыточным увлажнением на валунных суглинках, частично антропогенно освоенные с мелколиственными и мелколиственно-еловыми зеленомошными лесами на дерново-подзолистых и болотно-подзолистых почвах.
3. Низменные плоские и волнистые равнины с нормальным или кратковременно избыточным увлажнением на озерно-ледниковых песках и супесях, слабо освоенные с сосняками зеленомошными и лишайниковыми на подзолистых и болотно-подзолистых почвах.
4. Плоские и слабоволнистые равнины с длительным избыточным увлажнением на безкарбонатном валунном суглинке с сосново-еловыми и еловыми долгомошными и черпично-сфагновыми лесами на болотно-подзолистых почвах.
5. Плоские равнины с длительным избыточным увлажнением на озерно-ледниковых суглинках и глинах, неравномерно освоенные с мелколиственными травяными и еловыми зеленомошными лесами на дерново-подзолистых и болотно-подзолистых почвах.
6. Плоские равнины с длительным избыточным увлажнением на озерно-ледниковых песках с сосновыми сфагновыми и долгомошными заболоченными лесами на болотно-подзолистых почвах.
7. Олиготрофные верховые болота (преимущественно грядово-мочажинные) с сосновыми кустарниково-сфагновыми лесами на болотных почвах.
8. Олиготрофные и мезоолиготрофные торфяники с осушительной сетью с сосновыми кустарниково-сфагновыми лесами на болотных почвах (частично минерализованных).
9. Мезоолиготрофные и мезотрофные торфяники переходных и низинных болот с мохово-травяным, травяным и травяно-сфагновым растительным покровом на болотных почвах (частично минерализованных).
10. Поймы и надпойменные террасы рек с мелколиственными травяными лесами с участками закустаренных лугов на пойменных дерново-глеевых почвах.

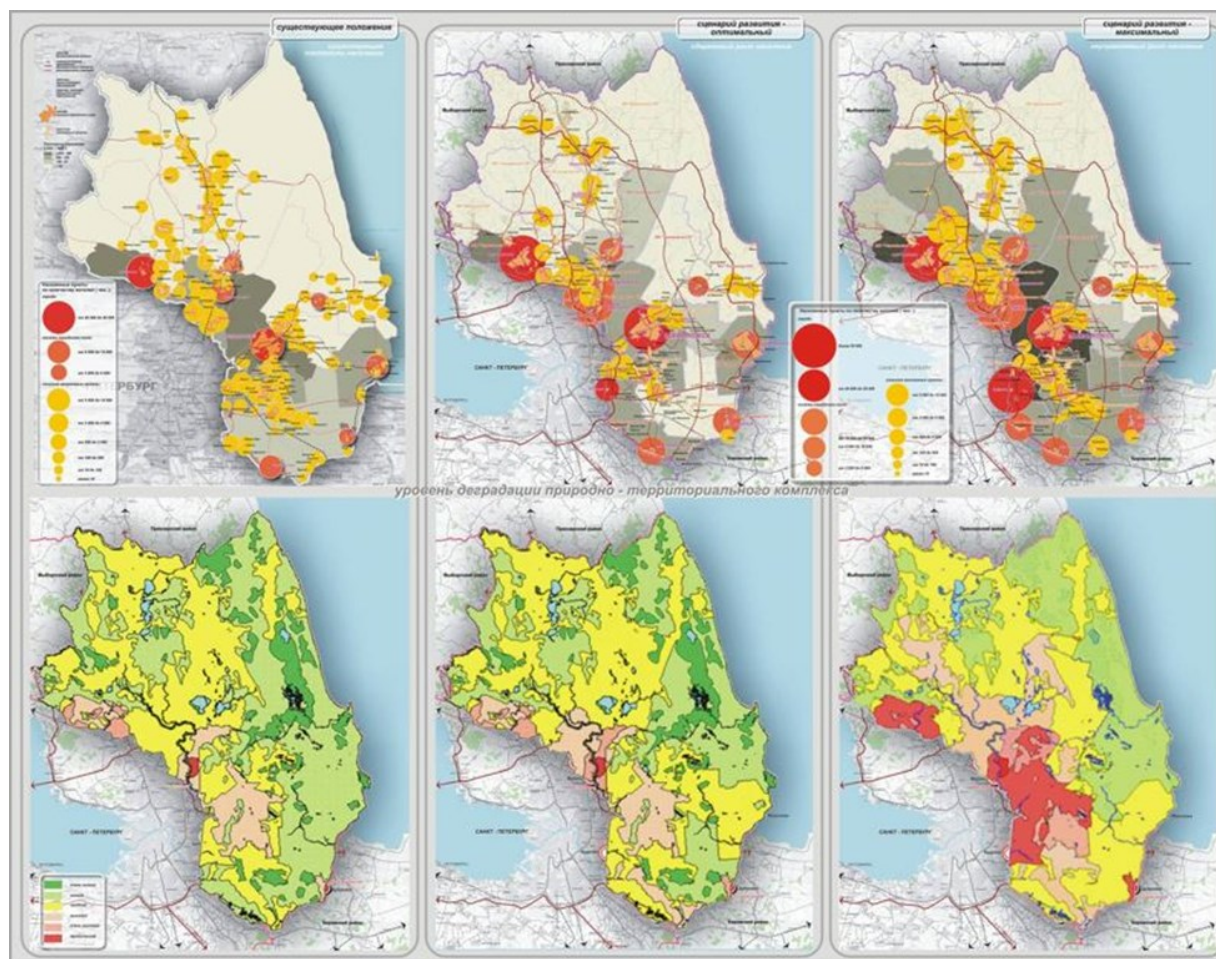


Рис. 5. Влияние демографической нагрузки на состояние природно-территориальных комплексов

Экологический каркас состоит из площадных и линейно вытянутых элементов. Площадные структуры играют роль ядер, биоцентров – это в основном особо охраняемые природные территории, имеющие самостоятельную природоохранную ценность. Это обширные экосистемы, внутри которых протекают природные процессы, стабилизирующие экологическую обстановку на значительной территории. Они включают существующие и планируемые особо охраняемые природные территории (ООПТ): заказники, памятники природы, охраняемые природные ландшафты (рис. 6).

Транзитные территории – участки, посредством которых, осуществляются экологические связи между ключевыми территориями, осуществляется перенос потоков вещества и энергии. Прежде всего, это линейные элементы ландшафта (долины рек, прибрежная акватория Ладожского озера, водоохранные зоны водных объектов) – экологические коридоры, а также обширные участки природных и природно-антропогенных ландшафтов между ядрами каркаса: водораздельные возвышенности.

В структуре экологического каркаса также выделяются буферные территории, защищающие

ключевые и транзитные территории от неблагоприятных антропогенных воздействий.

Эколого-ориентированный подход в подготовке градостроительной документации на примере СТП Всеволожского района находится в единой связи с актуальным вопросом воссоздания лесопаркового пояса вокруг Санкт-Петербурга.

Положения статей 62.1-62.5 главы IX.1. Лесопарковые зеленые пояса, введенных Федеральным законом от 03.07. 2016 № 353-ФЗ, регулируют создание, режим особой охраны природных объектов и другие вопросы. В соответствии со статьей 62.1 «В целях реализации права граждан на благоприятную окружающую среду могут создаваться лесопарковые зеленые пояса – зоны с ограниченным режимом природопользования и иной хозяйственной деятельности, включающие в себя территории, на которых расположены леса, водные объекты или их части, природные ландшафты, и территории зеленого фонда в границах городских населенных пунктов, которые прилегают к указанным лесам или составляют с ними единую естественную экологическую систему и выполняют средообразующие, природоохранные, экологические, санитарно-гигиенические и рекреационные функции».



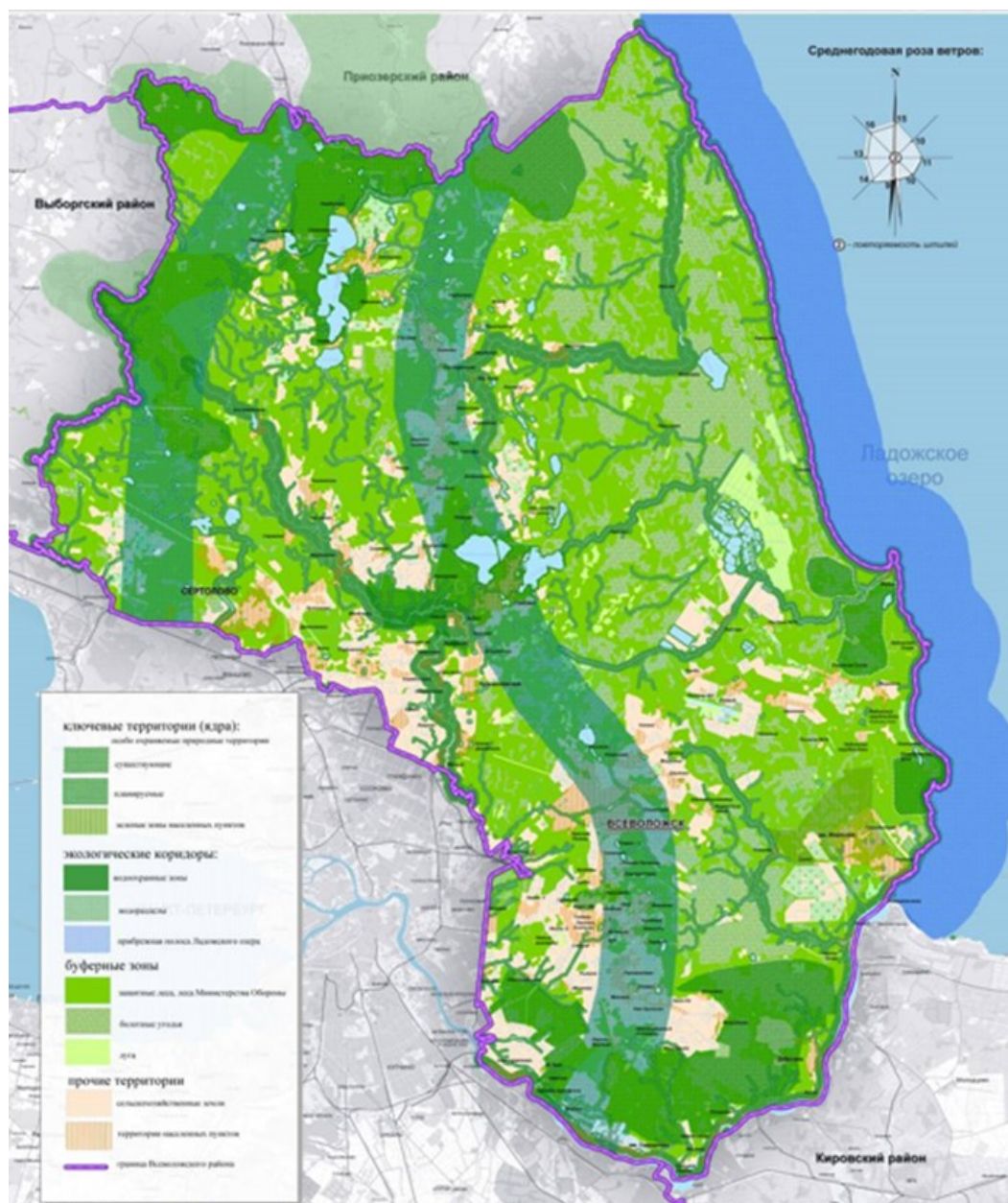


Рис. 6. Природно-экологический каркас Всеволожского района

Первые предложения по формированию вокруг Ленинграда пригородной лесопарковой зеленой зоны были сделаны еще в 1932 году, когда все леса пригородного района в границах, совпавших с границами большого Ленинграда (Гослесфонд, учебно-опытные и местного значения), были перечислены в леса особого назначения с отнесением к лесам общегосударственного значения». Далее в 1948 г. 164,1 тыс. га леса, находившегося в пригородной зоне Ленинграда, была передана в распоряжение Ленинградского Горисполкома.

На территории выделенной лесопарковой пригородной зоны Ленинграда было создано Управление пригородной лесопарковой зоны Исполкома Ленгорсовета с финансированием лесохозяйственных мероприятий на территории данной зоны из городского бюджета.

Однако в соответствии с приказом Рослесхоза от 2008 года, на основании внесенных в Лесной кодекс РФ изменений территория лесничеств пригородной лесопарковой зоны Санкт-Петербурга (Ленинграда) вошла в состав Ломоносовского, Кировского и Приозерского лесничеств Ленинградской области. Таким образом, лесопарковая зона Санкт-Петербурга фактически прекратила существование.

В декабре 2017 года Правительство Санкт-Петербурга выступило с инициативой воссоздания зеленого пояса вокруг Санкт-Петербурга как города федерального значения на отдельных территориях Ленинградской области. Инициатива была поддержана Общественной палатой Санкт-Петербурга и Министерством природных ресурсов и экологии РФ с учетом необходимости доработки представленных материалов и проведения

публичных слушаний Общественной палатой Ленинградской области.

К настоящему времени (май 2025 г.) все необходимые по закону процедуры по созданию вокруг границ Санкт-Петербурга лесопаркового зеленого пояса выполнены, проведены публичные слушания, получено одобрение обоих субъектов Федерации, а также Правительства Российской Федерации. В закон о новом генеральном плане Санкт-Петербурга с расчетным сроком – до 2040 года с прогнозным периодом до 2050 года внесены сведения о развитии «лесопаркового зеленого пояса» вокруг административных границ города.

В связи с вышеизложенным, можно сделать несколько **выводов**:

1. Территориальное планирование и градостроительное проектирование – инструменты обеспечения устойчивого развития территорий, направленные на комплексное развитие экономических, социальных и природных систем. В современных социально-экономических условиях достаточно актуальны вопросы эффективного использования территорий, сохранения природно-экологических качеств окружающей среды;

2. Сравнительный анализ систем документов экологического планирования отечественных ТерКСОПов и ландшафтного планирования в Германии показывает, что более комплексный характер имеют территориальные схемы охраны природы, методический и технический инструментарий которых может быть использован при решении задач рационального природопользования в пространственной организации территории как субъекта Российской Федерации, так и муниципального образования;

3. Отечественная школа эколого-ориентированного планирования (градостроительной экологии) имеет все необходимые методические и технические наработки для формирования рациональной системы природопользования, создания качественной, безопасной, комфортной среды жизнедеятельности и в обязательном порядке должна быть составной частью градостроительной деятельности;

4. Система документов экологического планирования (аналоги систем терКСОПов в СССР или ландшафтного планирования в Германии) может быть интегрирована в качестве полноценных разделов в градостроительную документацию России: документы территориального планирования соответствующего уровня (схемы территориального планирования, генеральные планы) приобретая, таким образом, нормативно-обязательный характер. Подготовка документов эко-

логического планирования возможна также отраслевым, самостоятельным образом параллельно с разработкой градостроительной документации для обязательного учета экологических ограничений и природоохранных мероприятий;

5. Ландшафтное планирование по сути является отраслевым экологическим планированием охраны природы и сохранения ландшафтов (участков природы) в Германии. Положения отраслевого экологического планирования подлежат обязательному исполнению только после интеграции в планы пространственной организации (градостроительную документацию). В основном, отраслевое экологическое планирование представляет собой отдельные проекты или разделы охраны природы и экологических мероприятий в градостроительной документации (в зависимости от законодательства конкретной Федерации земли Германии), которые используются для пространственного (территориального) планирования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новый национальный проект «Экологическое благополучие» (2025-2030 гг.). <https://finance.rambler.ru/economics/53402634-v-novom-natsproekte-zakrepyat-ekologo-orientirovannoe-planirovanie-gorodov>. Дата обращения 31.01.2025.
2. Указ Президента Российской Федерации от 19 апреля 2017 г. № 176 «Об утверждении стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025». [Электронный ресурс] <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41879> (дата обращения 28.05.2025).
3. Ершов Б.А., Устинова Е.А. Новые подходы в экологическом развитии России // Journal «Agrarian History». 2022. № 9. DOI: 10.52270/27132447\_2022\_9\_13
4. Соколов В.В. Социализация природы в Советской России (1917-1940 гг.). СПб., 1994. С. 5.
5. Шмыглева А.В. Природоохранная политика Советского государства: основные этапы формирования и механизм реализации // 1917 год в России: социалистическая идея, революционная мифология и практика: сборник научных трудов. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2016. С. 159–171.
6. Шмыглева А.В. Реализация государственной экологической политики в Западной Сибири в 1970-1980-е гг.: монография; Сиб. гос. индустр. ун-т. 2-е изд. перераб. и доп. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. 242 с.

7. Дубино А.М., Перькова М.В. Формирование природно-экологического каркаса г. Белгорода // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20, № 2. С. 167–179. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.167-179. EDN EVYPDV.

8. Maiboroda V.A., Maiboroda E.T., Spirin P.P. Formation and legal regulation of urban agglomerations in the Russian Federation: ensuring sustainable development of territories // Journal of Law Studies. 2023. Vol. 4, No. 76. Pp. 1–15. DOI 10.26668/revistajur.2316-753X.v4i76.4211. EDN RKBMWWS.

9. Красная Б.А., Спирин П.П., Риффель Н.И., Шарабарина С.Н. Опыт ландшафтно-экологической оценки территории в схемах территориального планирования муниципальных образований особой эколого-экономической ответственности // Регионы нового освоения: экологические проблемы, пути их решения : материалы Межрегиональной научно-практической конференции, Хабаровск, 10–12 октября 2008 года. Том 1. Хабаровск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных и экологических проблем Дальневосточного отделения Российской академии наук, 2008. С. 116–118. EDN SCIYRP.

10. Сидоренко Н.М., Варгина Т.В., Спирин П.П., Гаевская З.А. Основные подходы к определению приоритетных направлений пространственного развития сельских территорий Российской Федерации // Экономика и управление. 2016. № 1(123). С. 17–22. EDN VPCDAX.

11. Алимова Д.Н., Перькова М.В. Сравнительный анализ международных экологических стандартов, регулирующих процессы «зеленого»

строительства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 4. С. 55–66. DOI 10.34031/2071-7318-2023-8-4-55-66. EDN LJNXJI.

12. Митягин С.Д. Правовые изъятия градостроительной проектной деятельности // Academia. Архитектура и строительство. 2024. № 3. С. 101–105. DOI: 10.22337/2077-9038-2024-3-101-105. EDN FRNNUG.

13. Перькова М.В., Дубино А.М. Выявление и классификация градостроительных конфликтов при использовании водных ресурсов в г. Белгороде // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 12. С. 54–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-12-54-62. EDN VWWKSS.

14. Спирин П.П. О гармонизации отображения объектов в документах территориального планирования и градостроительного зонирования // Градостроительное право. 2024. № 2. С. 34–37. DOI 10.18572/2500-0292-2024-2-34-37. EDN RFGJSP.

15. Схема территориального планирования Всеволожского муниципального района Ленинградской области утверждена Решением Совета депутатов МО «Всеволожский муниципальный район» Ленинградской области № 88 от 20.12.2012.

<https://www.vsevreg.ru/about/grad/docplan/skhema-raiona/?ysclid=mb7o88igld391805666> (дата обращения 28.05.2025)

16. Спирин П.П. Градостроительное развитие территорий высокой экологической ответственности (на примере Республики Алтай) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 5. С. 30–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-30-44.

#### Информация об авторах

**Спирин Павел Павлович**, кандидат географических наук, академик РААСН, директор ООО «НИИ ПГ». E-mail: pavelsp@list.ru. Научно-Исследовательский Институт Перспективного Градостроительства. Россия, 191186, Санкт-Петербург, ул. Итальянская, 4; Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. Россия, 119331, Москва, просп. Вернадского, 29; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.

Поступила 21.05.2025 г.

© Спирин П.П., 2025

**Spirin P.P.**

*Scientific Research Institute Perspective Urban Planning  
Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing  
and Communal Services of Russia  
St. Petersburg Polytechnic University official website  
\*E-mail: pavelsp@list.ru*

## ECO-ORIENTED PLANNING IN URBAN SYSTEM

**Abstract.** The lack of continuity of urban planning documentation systems between the USSR and the Russian Federation and a sufficient number of urban planning specialists adapted to the new market condi-

tions of urban development led to the formation of a new system of urban relations. The sections of the integrated assessment of territories disappeared in the documents of territorial planning and urban planning, as well as a layer of documents of environmentally oriented planning - territorial integrated schemes of nature protection, which in the USSR were developed for different administrative-territorial units. A significant simplification of the composition and content of territorial planning documents has determined the interest in foreign practice in solving environmental protection issues and ensuring sustainable development of territories. As a borrowing of the Western experience of sustainable development for the future, opportunistic documents "master plans" began to be introduced in our country, which in fact do not introduce anything new. At the same time, our country has fundamental domestic urban planning methodological and technical developments that have proven their long-term effectiveness in practice, which must be used in the preparation of urban planning documentation and the development of the legal system of urban development.

*Main scientific results: the role of the application of an environmental-oriented approach in the preparation and implementation of urban planning documentation in Russia is substantiated. The options for the implementation of environmental planning documents into the Russian urban planning system are considered, both in the form of separate sectoral planning that existed in the planning practice of the USSR, and in the form of separate sections of a comprehensive assessment of territories and environmental protection measures as part of urban planning documentation.*

**Keywords:** Ecological-oriented territorial planning, territorial integrated schemes of nature protection (terISNP), landscape planning, master plan, suburban forest park area, natural and ecological framework, territorial and natural complexes.

## REFERENCES

1. The new national project "Environmental well-being" (2025-2030). [Novyj nacional'nyj proekt «Ekologicheskoe blagopoluchie» (2025-2030 gg.)]. <https://finance.rambler.ru/economics/53402634-v-novom-natsproekte-zakrepyat-ekologo-orientirovannoe-planirovanie-gorodov>. The date of the request is 31.01.2025.
2. Decree of the President of the Russian Federation dated April 19, 2017 No. 176 "On Approval of the Strategy of Environmental Safety of the Russian Federation for the period up to 2025". [Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 19 aprelya 2017 g. No. 176 «Ob utverzhdenii strategii ekologicheskoy bezopasnosti Rossijskoj Federacii na period do 2025».] <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41879> (data obrashcheniya 28.05.2025).
3. Ershov B.A., Ustinova E.A. New approaches in the ecological development of Russia. [Novye podhody v ekologicheskom razvitii Rossii]. Journal «Agrarian History». 2022. No. 9. DOI: 10.52270/27132447\_2022\_9\_13
4. Sokolov V.V. Socialization of nature in Soviet Russia (1917-1940) [Socializaciya prirody v Sovetskoy Rossii (1917-1940 g.g.)]. St. Petersburg, 1994. 5 p. (rus)
5. Shmygleva A.V. The environmental policy of the Soviet state: the main stages of formation and the mechanism of implementation. The year 1917 in Russia: The Socialist idea, revolutionary mythology and practice: a collection of scientific papers. [Prirodohrannaya politika Sovetskogo gosudarstva: osnovnye etapy formirovaniya i mekhanizm realizacii. 1917 god v Rossii: socialisticheskaya ideya, revolyucionnaya mifologiya i praktika: sbornik nauchnykh trudov] Yekaterinburg: Ural University Press, 2016. Pp. 159–171. (rus)
6. Shmygleva A.V. Implementation of the state environmental policy in Western Siberia in the 1970s and 1980: a monograph. [Realizaciya gosudarstvennoj ekologicheskoy politiki v Zapadnoj Sibiri v 1970-1980 gg.: monografiya]. Siberian State University. industry. Univ. 2nd ed. reprint. and dop. Novokuznetsk: Publishing Center of SibGIU, 2017. 242 p. (rus)
7. Dubino A.M., Perkova M.V. Formation of the natural and ecological framework of Belgorod. [Formirovanie prirodno-ekologicheskogo karkasa g. Belgoroda]. Bulletin of MGSU. 2025. Vol. 20, No. 2. Pp. 167–179. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.167-179. EDN EVYPDV. (rus)
8. Maiboroda V.A., Maiboroda E.T., Spirin P.P. Formation and legal regulation of urban agglomerations in the Russian Federation: ensuring sustainable development of territories. Journal of Law Studies. 2023. Vol. 4, No. 76. Pp. 1–15. DOI 10.26668/revistajur.2316-753X.v4i76.4211. EDN RKBWMS.
9. Krasnoyarova B.A., Spirin P.P., Riffel' N.I., SHarabarina S.N. Experience in landscape and environmental assessment of territories in municipal planning schemes of special environmental and economic responsibility [Opyt landshaftno-ekologicheskoy ocenki territorii v skhemah territorial'nogo planirovaniya municipal'nyh obrazovaniy osoboj ekologo-ekonomicheskoy otvetstvennosti]. Regions of New Development: Environmental Problems and Solutions: Proceedings of the Interregional Scientific and Practical Conference, Khabarovsk, October 10–12, 2008. Volume 1. Khabarovsk: Federal State Budgetary Institution of Science, Institute of Water and Environmental Problems of the Far



Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008. Pp. 116–118. EDN SCIYRP. (rus)

10. Sidorenko N.M., Vargina T.V., Spirin P.P., Gaevskaya Z.A. Main approaches to determining priority areas for spatial development of rural territories in the Russian Federation [Osnovnye podhody k opredeleniyu prioritetnykh napravlenij prostranstvennogo razvitiya sel'skih territorij Rossijskoj Federacii]. Economics and Management. 2016. No. 1(123). Pp. 17–22. EDN VPCDAX. (rus)

11. Alimova D.N., Perkova M.V. Comparative analysis of international environmental standards governing the processes of "green" construction [Sravnitel'nyj analiz mezhdunarodnykh ekologicheskikh standartov, reguliruyushchih processy «zelenogo» stroitel'stva]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 4. Pp. 55–66. DOI 10.34031/2071-7318-2023-8-4-55-66. EDN LJNXJI. (rus)

12. Mityagin S.D. Legal flaws in urban planning and design activities [Pravovye iz'yany gradostroitel'noj proektnoj deyatel'nosti]. Academia. Architecture and Construction. 2024. No. 3. Pp. 101–105. DOI 10.22337/2077-9038-2024-3-101-105. EDN FRNNUG. (rus)

13. Perkova M.V., Dubino A.M. Identification and classification of urban planning conflicts in the use of water resources in Belgorod [Vyyavlenie i klassifikaciya gradostroitel'nykh konfliktov pri ispol'zovanii vodnykh resursov v g. Belgorode]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No.

12. Pp. 54–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-12-54-62. EDN VWWKSS. (rus)

14. Spirin P.P. On the harmonization of the display of objects in the documents of territorial planning and urban zoning [O garmonizacii otobrazheniya ob"ektov v dokumentah territorial'nogo planirovaniya i gradostroitel'nogo zonirovaniya] Urban planning law. 2024. No. 2. Pp. 34–37. DOI: 10.18572/2500-0292-2024-2-34-37. EDN RFGJSP. (rus)

15. The territorial planning scheme of the Vsevolozhsky Municipal District of the Leningrad Region was approved by the Decision of the Council of Deputies of the Vsevolozhsky Municipal District of the Leningrad Region No. 88 dated December 20, 2012 [Skhema territorial'nogo planirovaniya Vsevolozhskogo municipal'nogo rajona Leningradskoj oblasti utverzhdena Resheniem Soveta deputatov MO «Vsevolozhskij municipal'nyj rajon» Leningradskoj oblasti № 88 ot 20.12.2012.] <https://www.vsevreg.ru/about/grad/docplan/skhema-raiona/?ysclid=mb7o88igld391805666> (data obrashcheniya 28.05.2025)

16. Spirin P.P. Urban development of territories of high environmental responsibility (on the example of the Altai Republic). [Gradostroitel'noe razvitie territorij vysokoj ekologicheskoy otvetstvennosti (na primere Respubliki Altaj)]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 5. Pp. 30–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-30-44. (rus)

#### *Information about the authors*

**Spirin, Pavel P.** Candidate of Sciences in Geography, Academician of RAACS, director NII PG. E-mail: pavelsp@list.ru. Russia., 191186, St. Petersburg, Italiyskaya St., 4; The Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of Russia. 29 Vernadskogo avenue, Moscow, 119331, Russia; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, St. Petersburg, Politechnicheskaya str., 29.

*Received 21.05.2025*

#### **Для цитирования:**

Спирин П.П. Эколого-ориентированное планирование в градостроительстве // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 9. С. 47–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-47-61

#### **For citation:**

Spirin P.P. Eco-oriented planning in urban system. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 9. Pp. 47–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-47-61

# ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-62-70

**Трепалин Д.В., \*Мишин Д.А., Трепалина Ю.Н., Ковалев С.В., Смагина А.Р.***Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**\*E-mail: mishinda.xtsm@yandex.ru*

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМОВАНИЯ МЕЛКОФРАКЦИОННОГО КЕРАМЗИТА ИЗ МАЛОПЛАСТИЧНОГО СЫРЬЯ

**Аннотация.** Состояние современной экономики ставит перед производителями задачи по замещению импортных композиционных материалов, как в случае с мелкофракционным керамзитом. Остановка сотрудничества с компаниями Laterlite (Италия) и Liapor (Германия), по созданию совместного предприятия по выпуску современных стеновых материалов и сухих строительных смесей на базе собственного производства, дала старт проведению исследований в этом направлении. Разрабатываемые составы из глин местных месторождений позволяют получить керамзитовый гравий из малопластичного сырья и техногенных отходов. Отработка способов гранулирования позволяет получать мелкие фракции из керамических составов на начальном этапе производства керамзита. Это дает возможность использовать технологию получения мелкофракционного керамзита (размер гранул менее 5 мм) без дробления крупных гранул, как это осуществляется по классическому пластическому методу формования. Изменение скорости вращения ротора гранулятора, позволяет формировать сферические гранулы различного размера. Применение опудривания гранул не дает возможности полуфабрикату слипаться между собой. Разрабатываемая технология формования гранул позволяет получать керамзит заданных мелких фракций (1–2 мм и 2–5 мм) в достаточно большом количестве – до 60 – 70 %.

**Ключевые слова:** керамзитовый гравий, способы формования, глина, мел, скорость вращения ротора, влажность массы, опудривание, фракционный состав.

**Введение.** Керамзитовый гравий является одним из распространенных материалов строительной отрасли. Он используется для утепления зданий и перекрытий, как заполнитель в бетонах [1–3]. В настоящее время керамзит нашел новую область применения, как заполнитель для производства особых строительных материалов. Примером таких материалов могут служить внутренние и внешние аквапанели, основу сердечника которых составляет мелкофракционный пористый заполнитель. Аквапанели на нашем рынке были представлены продукцией фирмы KNAUF. Для производства качественных панелей требуются узкие мелкие фракции керамзита сферической формы (0–3 мм). При существующем уровне технологий отечественных производителей получать такие фракции довольно затруднительно. В основном мелкие фракции получают отсевом из общей массы или дроблением крупных фракций керамзита. Доля мелкой фракции керамзита невелика, а при дроблении качество гранул ухудшается. Возникает необходимость разработки новых технологий получения мелкофракционного керамзита.

Размер гранулы керамзита определяется, в первую очередь, размером гранулы полуфабриката. Получение изначально мелких гранул полуфабриката осложняется тем, что большинство отечественных заводов работает на малопластичном сырье, которое составляет основную часть

месторождений для производства керамзита. Это обуславливает преимущественное использование пластического метода формования гранул (более 80% действующих предприятий), при котором основное количество гранул полуфабриката достигает большого размера 10–20 мм [4, 5].

Мелкие гранулы керамзита можно получить сухим способом, который предполагает дробление однородного, плотного (камнеподобного) глинистого сырья (глинистые сланцы, аргиллиты и др.) пониженной влажности. Однако данный способ исключает использование слабовспучивающихся глин для получения керамзита, т.к. отсутствует возможность дополнительного введения вспучивающего агента. Это сужает сырьевую базу для получения мелкофракционного заполнителя.

Технологии сухого и пластического формования не всегда дают возможность получать гранулы сферической формы. Пластическим способом получают гранулы вытянутой продолговатой формы, которые в процессе сушки ударяются друг о друга, образуя мелкие и неровные частицы. При обжиге таких мелких частиц сферичная форма отсутствует. Сферические гранулы можно получить при использовании шликерного способа производства полуфабриката. Однако, этот способ достаточно трудоемкий и энергозатратный и поэтому не используется.

Достижение показателей размера гранулы керамзита и ее сферичности обеспечит конкурентоспособность отечественных материалов с зарубежными производителями.

Поэтому целью данной работы является разработка новой технологии формования сферических гранул полуфабриката для получения мелкофракционного керамзита из малопластичного сырья.

**Материалы и методы.** В качестве основного компонента для керамических масс при производстве мелкофракционного керамического гравия использовали умереннопластичную глину Харлановского месторождения (Белгородская область), число пластичности которой составляет ЧП=14. В качестве корректирующих добавок была рассмотрена пластичная глина (число пластичности ЧП=27) Латненского месторождения марки ЛТ-1 (Воронежская обл.). Минералогический состав глин выявлен на рентгенофлуоресцентном спектрометре серии ARL 9900 WorkStation со встроенной системой дифракции.

Используемые глины являются слабовспучивающимися, коэффициент вспучивания 1,2 – 1,6. На образование газов при вспучивании влияет как минералогический состав сырья, так и введение корректирующих добавок, которые могут влиять так же и на возникновение пиропластического состояния [4, 6, 7]. Поэтому для улучшения вспучивания использовали дизельное топливо (ДТ).

С другой стороны, тонкий помол сырья (без добавок) улучшает пластичность глины [8], способствует вспучиванию, снижая объемной массу керамзита на 50–120 кг/м<sup>3</sup> за счет снижения вязкости расплава и уменьшения газопроводимости материала, находящегося в пиропластическом состоянии в период вспучивания [9, 10], повышает реакционную способность глинообразующих частичек, улучшает структуру керамзита и прочность, а также положительно отражается на технико-экономические показатели производства [11].

Поэтому глины, предварительно высушенные при 100–120 °С до постоянной массы, измельчались в бегунах ЛМе до полного прохождения через сито № 0,16. Рассев частиц осуществлялся с помощью вибросита. Фракция, не прошедшая через сито, возвращалась на домол в бегуны.

Составы для исследования были ранее разработаны и изучены с применением пластического способа подготовки масс [12]. Они показали хорошие результаты после обжига. Насыпная плотность составила 0,78...0,43 г/см<sup>3</sup>, коэффициент вспучивания – 1,6...2,8.

Для исследования возможности получения мелкой фракции керамзита (размером 2 – 5 мм), были выделены составы, показавшие лучшие характеристики.

Составы исследуемых масс приведены в таблице 1.

Таблица 1

Составы экспериментальных масс

Составы сырьевых масс	Содержание сырьевых компонентов, масс. %		
	глина Харлановская	глина ЛТ-1	дизельное топливо (ДТ)
Состав 1	100	–	–
Состав 2	100	–	1,00
Состав 3	80	20	–

Смешение составов, увлажнение и получение гранул осуществляли в одном агрегате смесителя-грануляторе турболопастным интенсивного действия СГТЛ-20.

Для получения состава № 2 глину и вспучивающую добавку - дизельного топлива предварительно смешивали в емкости с резиновыми шарами в течение 60 минут.

При получении гранул использовалось опудривание мелом в количестве 1,2–1,5 % от сухой массы глины.

**Основная часть.** Согласно ГОСТ 9169-75 (Сырье глинистое для керамической промышленности) исследуемое глинистое сырье Харлановского месторождения классифицируется по группе полуокислого сырья ( $Al_2O_3$  – 18,58%) с высоким содержанием красящих оксидов

( $Fe_2O_3$  – 3,99 %). Глина Латненского месторождения относится к группе высокоосновных глин ( $Al_2O_3$  – 40,07 %) [13].

Данные фазового анализа глины Харлановского месторождения представлены на рисунке 1.

Минералогический состав Харлановской глины, по данным анализа порошковой рентгеновской дифрактограммы (рис.1), представлен основным минералом: монтмориллонитом (14,779; 4,466; 2,564). В качестве примесей присутствуют: кварц (4,258; 3,348; 2,549; 2,282; 2,129; 1,982; 1,819), иллит (4,044; 2,240) и кальцит (3,034). Наличие кальцита делает возможным процесс вспучивания гранул без введения корректирующих добавок.

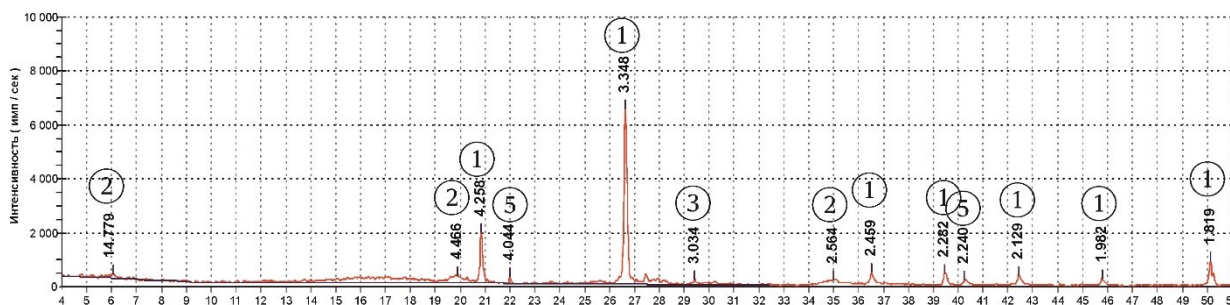


Рис. 1. Порошковая рентгеновская дифрактограмма глины Харлановского месторождения.

① – кварц; ② – монтмориллонит; ③ – кальцит, ⑤ – иллит

Данные фазового анализа глины Латненского месторождения представлены на рисунке 2.

Минералогический состав Латненской глины, по данным рентгенофазового анализа (рис. 2), представлен основным минералом: каолинитом (7,219; 4,457; 3,579; 2,562; 2,453; 2,349;

2,193). В качестве примесей присутствует кварц (4,266; 3,348; 2,453; 2,285; 2,130; 1,983; 1,820). Соединения железа и карбоната кальция отсутствуют.

Фазовый состав мела для опудривания представлен на рисунке 3.

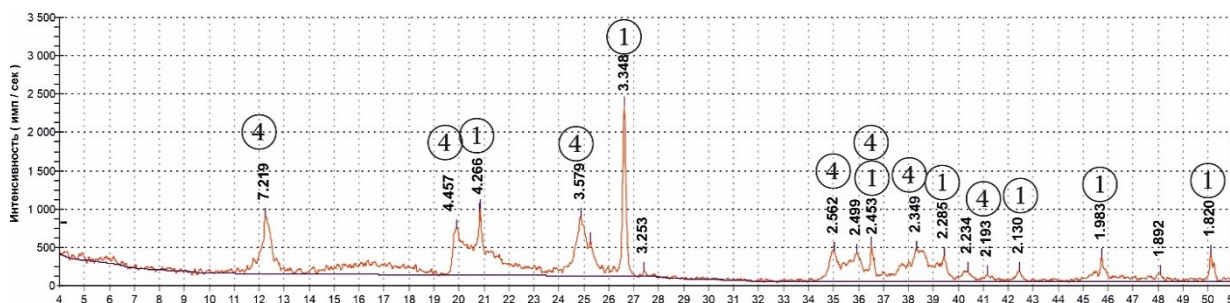


Рис. 2. Порошковая рентгеновская дифрактограмма глины Латненского месторождения.

① – кварц; ④ – каолинит

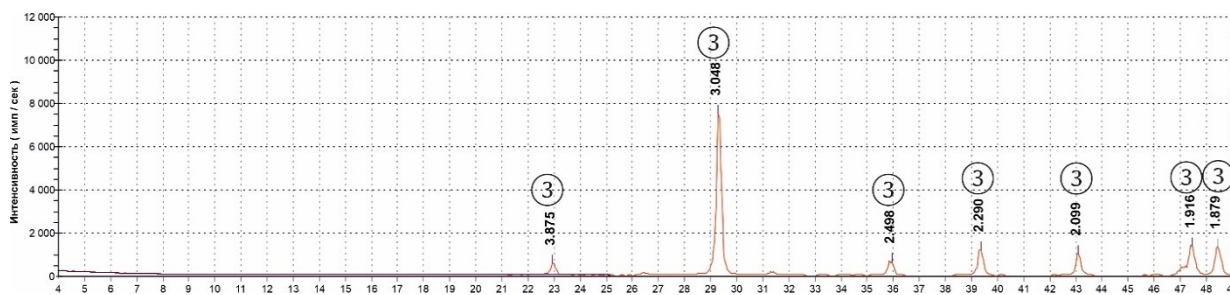


Рис. 3. Порошковая рентгеновская дифрактограмма мела Белгородского месторождения

③ – кальцит

На рис. 3 представлена дифрактограмма Белгородского мела основной минерал представлен карбонатом кальция. Использование в массе для производства керамзита мела и кальцийсодержащих добавок хорошо известно и применяется на некоторых предприятиях [14].

В результате проведенных экспериментов был определен оптимальный режим гранулирования. Он заключался в постадийном смешивании и увлажнении керамической массы:

а) Первичное увлажнение массы составляет 90% от общей влажности интенсивной подачей воды в смеситель. Смешивание – гранулирование происходит в течении 2 мин при скорости вращения ротора 1800 об/мин (30 Гц).

б) Далее происходит доувлажнение массы путем ввода еще 5 % общего количества воды методом орошения. Гранулирование происходит при снижении скорости вращения ротора до 900 об/мин (15 Гц). Процесс гранулирования осуществляется в течение 2 минут.

в) На заключительном этапе грануляции масса методом орошения доувлажняется оставшимся количеством воды, а гранулирование происходит при скорости вращения ротора 420 об/мин (7 Гц) в течение 2 мин.

г) Перед выгрузкой, для снижения слипания влажных гранул, происходит опудривание полуфабриката тонкомолотым мелом Белгородского

месторождения. Количество опудривающей добавки составляет около 1,2–1,5 % от массы сухой смеси.

Общая влажность полученной массы составляет 14–14,7 %.

Выбор скорости вращения ротора основан на том, что при высокой скорости вращения формируются гранулы низкой сферичности. Работа смесителя в режиме скорости вращения ротора 3000 об/мин (50 Гц) не позволяет получить сферичные гранулы (рис. 4 а).

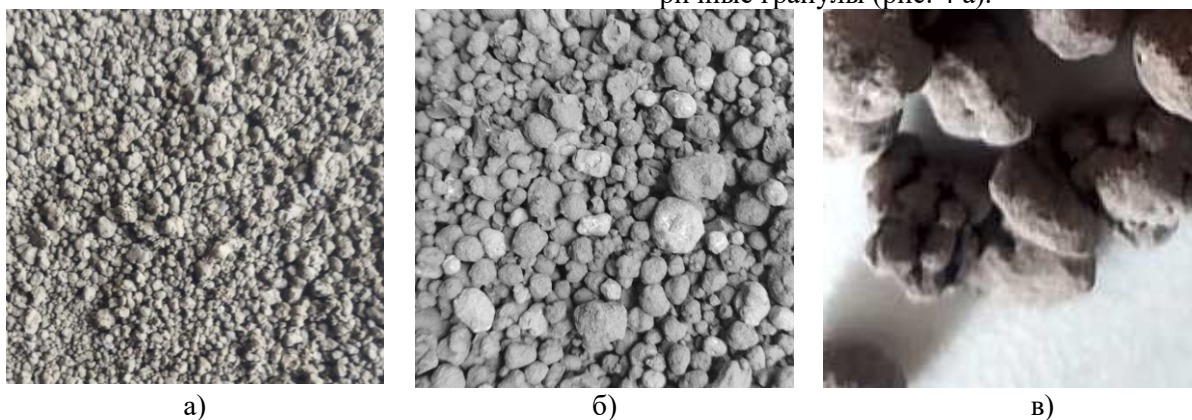


Рис. 4. Внешний вид гранул при скорости вращения ротора: а) 3000 об/мин; б) 1800 об/мин; в) 900 об/мин

При снижении скорости вращения ротора до 1800 об/мин (30 Гц) (рис. 4 б) формируются более крупные гранулы, обладающие лучшей сферичностью. Дальнейшее снижение скорости вращения ротора приводит к снижению качества гранул. Они становятся рыхлыми и пористыми (рис. 4в), т.к скорости ротора не хватает, чтобы сбить первичные гранулы глины в плотную частицу.

На плотность гранул влияет время смешивания глиняной массы и воды. При увеличении времени смешивания происходит более равномерное распределение влажности по всему объему

гранулы. Это способствует повышению пластической прочности [15]. В принятом режиме вращения ротора 1800 об/мин (30 Гц) время перемешивания сухой глиняной массы с вводимой водой определяет качество затворения глинистых частиц. При продолжительности перемешивания массы в течении 30 сек, гранулы имеют рыхлую структуру и пластическую прочность равную  $14,7 \cdot 10^{-4}$  Па. Увеличение времени гранулирования до 2 минут, позволяет уплотнить материал до пластической прочности равной  $41,5 \cdot 10^{-4}$  Па.

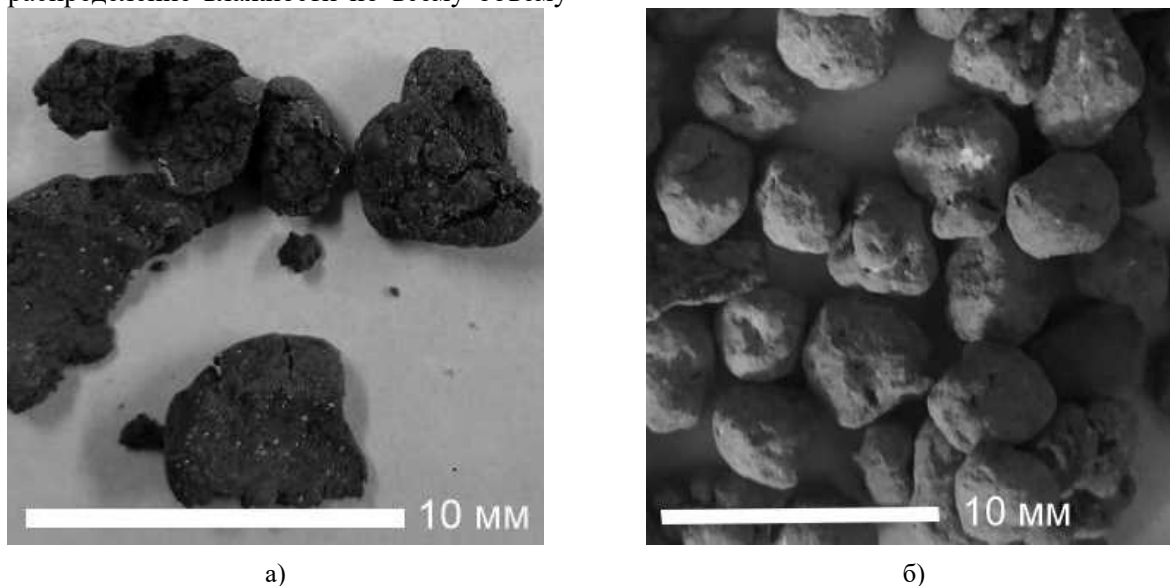


Рис. 5. Влияние времени формирования гранулы на ее качество при скорости вращения ротора 1800 об/мин: а) 30 секунд; б) 120 секунд.

Равномерность распределения воды и качество гранулы зависит от способа подачи воды в сухую массу. При вводе всего количества воды за 1 этап достигается первоначально неравномерное распределение воды в глиняной массе. Это приводит к формированию большого количества первичных крупных гранул, которые с трудом

разбиваются при вращении ротора, и к неравномерности распределения фракционного состава (рис. 6а) Наилучшая сферичность и равномерность фракционного состава массы достигаются при стадийном вводе воды для увлажнения в три этапа. Скорость вращения на каждом из этапов понижается для лучшего окатывания гранулы.

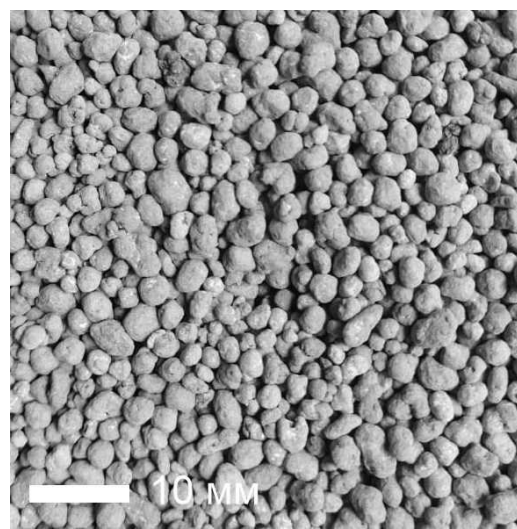


На первом этапе добавляется 90 % общего количества воды и происходит гранулирование в режиме скорости вращения ротора 1800 об/мин (30 Гц). При этом размер первичных гранул изначально меньше, чем при вводе всей массы воды за этап. На втором этапе скорость вращения ротора снижается до 900 об/мин (15 Гц) и добавляется 5 % общей массы воды, а на третьем до

420 об/мин (7 Гц) и добавляется остаток воды. Более высокая сферичность гранулы при стадийном вводе воды достигается за счет добавления массы воды на втором и третьем этапе путем поверхностного увлажнения гранулы и наката на нее тонкой фракции гранул и неувлажненного материала.



а)



б)

Рис. 6. Влияние стадийности введения воды на форму и фракционный состав гранул:  
а) введение всей воды за 1 этап; б) введение воды в 3 этапа (90%-5%-5%)

Особую роль в распределении фракционного состава играет метод подачи воды в массу. Разбрызгивание воды крупными каплями формирует крупные первичные гранулы. Подача воды распылением формирует более мелкие и равномерные первичные гранулы.

Как показали текущие исследования введение 1% дизельного топлива в качестве вспучивающего агента (состав № 2) практически не оказывает влияния на форму, прочность гранулы и фракционное распределение (таблица 2) при изученных режимах формования. Следовательно, корректировка ранее подобранных режимов не требуется.

Таблица 2

**Фракционный состав гранул после гранулирования**

Фракция	Массовая доля фракции, %		
	состав 1	состав 2	состав 3
>10 мм	0,23	0	0
10 – 7 мм	2,64	1,22	1,7
7 – 5 мм	9,07	5,92	6,83
5 – 2 мм	67,23	76,33	30
2 – 1 мм	17,75	14,69	51,23
<1 мм	3,1	2,04	10,98

Введение в состав Харлановской глины более пластичной глины Латненского месторождения дает возможность уменьшить размер гранул (Таблица 2, состав № 3). Введение в состав массы высокопластичной (ЧП = 27) глины Латненского месторождения снижает количество фракции 5–2 мм и увеличивает количество более мелкой (2–1 мм) фракции до 50 %. При этом фракция менее 1 мм не является пылевидной, а также представляет собой гранулы. В случае добавления пластичной глины Латненского месторождения видна более высокая сферичность гранул.

Анализ данных (табл. 2) позволяет сделать вывод, что отрабатываемая технология формования гранул позволяет получать достаточное количество мелкой фракции полуфабриката (5–2 мм) при получения пористого заполнителя для производства высокопрочных легких конструктивных бетонов.

При добавлении воды на последних стадиях формования может возникнуть ситуация, при которой уже сформованные гранулы слипаются в агломераты (рис. 8.). Избежать данной ситуации позволяет опудривание мелом. Рассыпчатость сформованной массы существенно повышается. Это существенно облегчит ее выгрузку и транспортировку.





Рис. 7. Внешний вид фракции гранул размером менее 1 мм: а) состав №1; б) состав №3

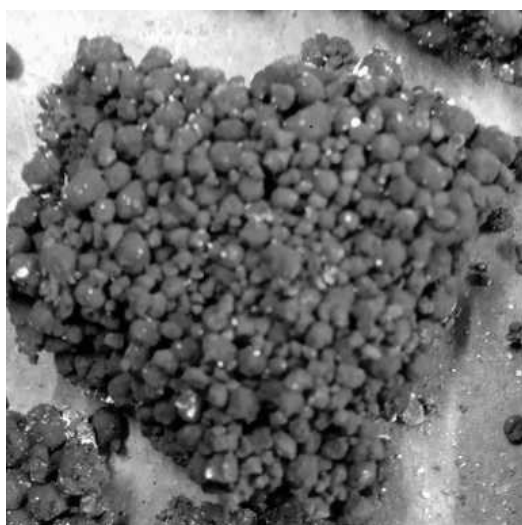


Рис. 8. Слипание уже сформированных гранул без опудривания

**Выводы:** Разработанные составы исследовали на получение порошково-пластическим методом формования, когда все операции приготовления полуфабрикатов происходят в одном агрегате – смеситель интенсивного действия.

Разработан способ постадийного гранулирования порошковой глиняной массы. Сущность данного способа заключается в поэтапном ведении воды в керамическую массу при переменной скорости вращения ротора на каждом этапе увлажнения. Произведен подбор оптимальных параметров увлажнения и скорости ротора на стадиях гранулирования для глин местного региона.

Способ позволяет получать мелкие фракции на начальном этапе производства керамзита. Это дает возможность использовать технологию получения мелкофракционного керамзита (размер гранул 5 – 2 мм и 2 – 1 мм) в производстве без дробления крупных гранул, полученных по классическому пластическому методу формования. Изменение скорости вращения ротора гранулятора, позволяет формировать сферические гранулы различного размера. Применение опудривания гранул не дает возможности полуфабрикату

склеиваться между собой. Разрабатываемая технология формования гранул позволяет получать керамзит с выходом заданных мелких фракций в количестве – до 65 – 75 %.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rashad A.M. Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 170. Pp. 757-775. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.009
2. Mesrar H., Mesrar L., Touache A., Jabrane R. Manufacture of Clay Aggregate Doped with Pozzolan Destined for Lightweight Concrete // *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24(1). Pp. 349–359. DOI: 10.12911/22998993/156183
3. Rodrigues A.V., Bragança S.R. An evaluation of the increased expansion of clay aggregates fired at 1300 °C to maximize lightness for non-structural concrete // *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 2023. Vol. 62(1). Pp. 56–65. DOI: 10.1016/j.bsecv.2021.11.003
4. Онацкий С.П. Производство керамзита. М.: Стройиздат, 1987. 333 с.
5. Ayati B., Ferrandiz-Mas V., Newport D., Cheeseman C. Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 162. Pp. 124-131. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.018
6. Cáceres J.R., Rojas J.P., Sánchez J. A review about the use of industrial by-products in the lightweight aggregates production of expanded clay // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1388 012011. DOI 10.1088/1742-6596/1388/1/012011
7. Vaickelionis G., Kantautas A., Vaičiukynienė D. Production of Expanded Clay Pellets by Using Non-selfbloating Clay, Lakes Sapropel and Glycerol // *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2011. Vol. 17(3). Pp. 314–321. DOI: 10.5755/j01.ms.17.3.600
8. Роговой М.И. Технология искусственных пористых заполнителей и керамики. М.: Стройиздат, 1974. 320 с.

9. Чумаченко Н.Г. Влияние состава расплава и не растворившегося остатка на свойства керамзитового гравия // Строительные материалы. 2013. № 1. С. 56–60.

10. Ozguven A., Gunduz L. Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate // Cement and Concrete Composites. 2012. Vol. 34(6). Pp. 781–787. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.007

11. Каленов Е.М. Повышение качества керамзита. К.: Будівельник, 1984. 61 с.

12. Трепалин Д.В., Мишин Д.А., Трепалина Ю.Н., Ковалев С.В. Разработка технологии производства керамзитового гравия полусухим способом с использованием техногенных отходов и

малопластичного сырья // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. №3. С. 117–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-117-124

13. Виноградов Б.Н. Петрография искусственных пористых заполнителей. М.: Стройиздат, 1972. 136 с.

14. Василенко Т.А., Али Салех-Жафер Применение кальцийсодержащих техногенных материалов в производстве керамзитового гравия // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2015. № 2. С. 106–113.

15. Круглицкий Н.Н. Основы физико-химической механики. Киев: Высшая школа. 1976. Т.3. 208 с.

#### Информация об авторах

**Трепалин Дмитрий Викторович**, аспирант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: extrepalin@inbox.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Мишин Дмитрий Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: mishinda.xtsm@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Трепалина Юлия Николаевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: yliaalin@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Ковалев Сергей Викторович**, старший преподаватель кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: k-ws@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Смагина Анна Романовна**, магистр кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: smaginaa9@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 26.05.2024 г.

© Трепалин Д.В., Мишин Д.А., Трепалина Ю.Н., Ковалев С.В., Смагина А.Р., 2025

**Trepalin D.V., Mishin D.A., Trepalina Yu.N., Kovalev S.V., Smagina A.R.**

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

*\*E-mail: smaginaa9@mail.ru*

## OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF FORMING FINE-FRACTION EXPANDED CLAY FROM LOW-PLASTIC RAW MATERIALS

**Abstract.** The current state of the economy poses the challenge for manufacturers to replace imported composite materials, as in the case of fine-grained expanded clay. The end of cooperation with Laterlite (Italy) and Liapor (Germany) to create a joint venture to produce modern wall materials and dry construction mixes based on their own production has launched research in this area. The compositions being developed from local clay deposits make it possible to obtain expanded clay gravel from low-plasticity raw materials and man-made waste. The development of granulation methods makes it possible to obtain small fractions from ceramic compositions at the initial stage of expanded clay production. This makes it possible to use the technology for obtaining fine-grained expanded clay (granule size less than 5 mm) without crushing large granules, as is done using the classic plastic molding method. Changing the rotation speed of the granulator rotor makes it possible to mold spherical granules of various sizes. The use of powdered granules prevents the semi-finished product from sticking together. The developed granule molding technology allows obtaining expanded clay of specified small fractions (1–2 mm and 2–5 mm) in a fairly large quantity – up to 60–70%.

**Keywords:** expanded clay gravel, molding methods, clay, chalk, rotor speed, mass moisture, powdering, fractional composition.

## REFERENCES

1. Rashad A.M. Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 170. Pp. 757–775. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.009
2. Mesrar H., Mesrar L., Touache A., Jabrane R. Manufacture of Clay Aggregate Doped with Pozzolan Destined for Lightweight Concrete. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24(1). Pp. 349–359. DOI: 10.12911/22998993/156183
3. Rodrigues A.V., Bragança S.R. An evaluation of the increased expansion of clay aggregates fired at 1300 °C to maximize lightness for non-structural concrete. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 2023. Vol. 62(1). Pp. 56–65. DOI: 10.1016/j.bsecv.2021.11.003
4. Onatsky S.P. Production of expanded clay [Proizvodstvo keramzita]. Moscow: Stroyizdat, 1987. 333 p. (rus)
5. Ayati B., Ferrandiz-Mas V., Newport D., Cheeseman C. Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 162. Pp. 124–131. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.018
6. Cáceres J.R., Rojas J.P., Sánchez J. A review about the use of industrial by-products in the lightweight aggregates production of expanded clay. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1388. DOI 10.1088/1742-6596/1388/1/012011
7. Vaickelionis G., Kantautas A., Vaičiukynienė D. Production of Expanded Clay Pellets by Using Non-selfbloating Clay, Lakes Saproel and Glycerol. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2011. Vol. 17(3). Pp. 314–321. DOI: 10.5755/j01.ms.17.3.600
8. Rogovoy M.I. Technology of Artificial Porous Fillers and Ceramics [Tekhnologiya iskusstvennykh poristyykh zapolniteley i keramiki]. Moscow: Stroyizdat, 1974. 320 p. (rus)
9. Chumachenko N.G. Effect of Melt Composition and Undissolved Residue on the Properties of Expanded Clay Gravel [Vliyaniye sostava rasplava i ne rastvorivshegosya ostatka na svoystva keramzitovogo graviya]. *Construction Materials*. 2013. No. 1. Pp. 56–60. (rus)
10. Ozguven A., Gunduz L. Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate. *Cement and Concrete Composites*. 2012. Vol. 34(6). Pp. 781–787. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.007
11. Kalenov E.M. Improving the quality of expanded clay [Povysheniye kachestva keramzita]. K.: Budivelnik, 1984. 61 p. (rus)
12. Trepalin D.V., Mishin D.A., Trepalina Yu.N., Kovalev S.V. Development of technology for the production of expanded clay gravel by a semi-dry method using man-made waste and low-plasticity raw materials [Razrabotka tekhnologii proizvodstva keramzitovogo graviya polusuxim sposobom s ispolzovaniem texnogennykh otkodov i maloplastihnogo seryu] *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 3. Pp. 117–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-117-124 (rus)
13. Vinogradov B.N. Petrography of Artificial Porous Fillers [Petrografiya iskusstvennykh poristyykh zapolniteley]. Moscow: Stroyizdat, 1972. 136 p.
14. Vasilenko T.A., Ali Saleh-Zhafer Application of Calcium-Containing Man-Made Materials in the Production of Expanded Clay Gravel [Primeniye kaltsiysoderzhashchikh tekhnogennykh materialov v proizvodstve keramzitovogo graviya]. *Bulletin of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2015. No. 2. Pp. 106–113. (rus)
15. Kruglickiy N. N. Fundamentals of Physical and Chemical Mechanics [Osnovy fiziko-khimicheskoy mexaniki]. Kyiv: Higher School. 1976. Vol. 3. 208 p. (rus)

*Information about the authors*

**Trepalin, Dmitry V.** Postgraduate student of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: extrepalin@inbox.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

**Mishin, Dmitry A.** PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Cement and Composite Materials Technology. E-mail: mishinda.xtms@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

**Trepalina, Julia N.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: ylialin@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Kovalev, Sergey V.** Senior Lecturer, Department of Cement and Composite Materials Technology. E-mail: k-ws@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

**Smagina, Ann R.** Master of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: smaginaa9@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 26.05.2024*

**Для цитирования:**

Трепалин Д.В., Мишин Д.А., Трепалина Ю.Н., Ковалев С.В., Смагина А.Р. Оптимизация технологических параметров формования мелкофракционного керамзита из малопластичного сырья // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 9. С. 62–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-62-70

**For citation:**

Trepalin D.V., Mishin D.A., Trepalina Yu.N., Kovalev S.V., Smagina A.R. Optimization of technological parameters of forming fine-fraction expanded clay from low-plastic raw materials. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 9. Pp. 62–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-62-70

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-71-80

**Загородний Н.А., \*Головкин М.В.***Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**\*E-mail: mixail.golovkin.1997@mail.ru*

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОНУСНОЙ ДРОБИЛКИ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ ЭКСЦЕНТРИКОВОГО УЗЛА

**Аннотация.** В данной статье проводится исследование влияния конструктивных особенностей эксцентрикового узла на производительность конусной дробилки, цель которого – повышение производительности конусной дробилки за счет изменения конструкции эксцентрикового узла конусной дробилки. Объектом изучения в данной статье выступают существующие конструкции эксцентрикового узла, ограничение их функциональных возможностей. В статье представлен анализ конструктивных особенностей эксцентрикового узла конусной дробилки с консольным валом и ее недостатки. На основе анализа был разработан прототип усовершенствованной конструкции эксцентрикового узла, позволяющий обеспечить повышение производительности и снижение энергопотребления конусной дробилки за счет использования опорных и регулировочных дисков. Регулировка частоты вращения дробящего конуса осуществляется за счет поворота регулировочного диска на определенный угол. Представлены основные схемы конструкции разработанного эксцентрикового узла, ее модель, принцип работы и преимущества. В ходе теоретических исследований установлена зависимость влияния частоты вращения конуса на производительность конусной дробилки. Для обеспечения эффективной работы конусной дробилки с усовершенствованной конструкции эксцентрикового узла необходимо повернуть регулировочный диск на 90 градусов и обеспечить максимальную пропускную способность выпускного отверстия. Применение данного изобретения позволит увеличить объемы производства и сократить расходы на электроэнергию за счет снижения частоты вращения конуса. Результаты данного исследования позволяют сделать вывод о необходимости применения разработанной конструкции эксцентрикового узла в производстве промышленных материалов.

**Ключевые слова:** конусная дробилка, производительность, эксцентриковый узел, эксцентриситет, опорный диск, регулировочный диск.

**Введение.** Конусные дробилки различных типов используются на промышленных предприятиях. На горнодобывающих предприятиях конусные дробилки измельчают огромные куски горных пород различных видов до определенных размеров. На таких предприятиях чаще всего используются конусные дробилки крупного дробления. На предприятиях по производству строительных материалов в основном используются конусные дробилки среднего и мелкого дробления, так как требуется получить не только необходимый размер материала, но и сделать его качественной формы. Например, при строительстве дорожного полотна требуется получить кубовидный щебень, размер фракции которого будет от 5 до 120 мм. В условиях производства конусные дробилки работают в сложных условиях, особенно на горнодобывающих предприятиях, где присутствует высокая концентрации пылевых частиц. Конструкция конусной дробилки должна обеспечивать непрерывный процесс работы с максимальной эффективностью [1, 2].

Целью данного исследования является повышение производительности конусной дробилки

за счет применения новой конструкции эксцентрика в виде пары опорных и регулировочных дисков.

Проблема исследования заключается в низкой производительности конусных дробилок из-за несовершенства ее конструкции. Существующая конструкция эксцентрикового узла (консольный вал) имеет жесткое соединение с дробящим конусом, что ограничивает амплитуду его вращения, создает дополнительные вибрации и высокий уровень шума, что приводит к снижению надежности конструкции, а также быстрому износу трущихся деталей. Повышается расход электроэнергии конусной дробилки с консольным валом по причине лишних потерь на вибрацию. С целью повышения эффективности работы конусной дробилки требуется разработать конструкцию эксцентрикового узла, позволяющую обеспечить высокую производительность при сниженном энергопотреблении за счет неограниченной амплитуды и пониженной частоты вращения дробящего конуса [3].

Необходимо проанализировать существующую конструкцию эксцентрикового узла конусной дробилки с консольным валом (рис. 1). Под цифрой 13 обозначен консольный вал. К нему



крепится методом запрессовки подвижный дробящий конус 14. Консольный вал 13 вместе с подвижным дробящим конусом 14 устанавливается во втулку эксцентрикового стакана 9. Электродвигатель приводит в движение с помощью карданной передачи втулку 9, через которую крутящий момент передается на консольный вал 13 и подвижный дробящий конус 14. Материал в конусную дробилку засыпается через загрузочное

отверстие 1 и равномерно распределяется по окружности камеры дробления. Внешний конус 3 вкручивается при помощи резьбового соединения к кольцу 4. Также установлены пружины 12 для снижения вероятности поломки конусной дробилки из-за попадания в камеру дробления недробимых частиц материала.

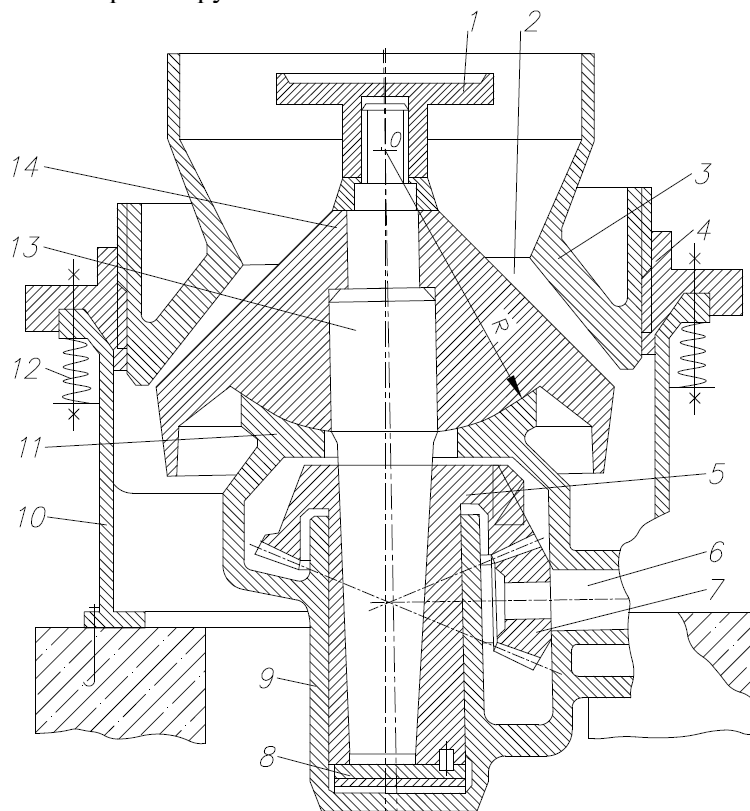


Рис. 1. Конусная дробилка с консольным валом

1 – загрузочное отверстие; 2 – камера дробления; 3 – внешний конус; 4 – кольцо;  
5 – эксцентриковый стакан; 6 – приводной вал; 7 – шестерни; 8 – подпятник; 9 – втулка; 10 – корпус дробилки;  
11 – подшипник; 12 – пружины; 13 – консольный вал; 14 – дробящий конус

Конструкция конусной дробилки с консольным валом (рис. 1) ограничивает ее функциональные возможности. Во-первых, конструкция эксцентрикового узла с консольным валом ограничивает амплитуду вращения дробящего конуса, так как дробящий конус и консольный вал жестко соединены друг с другом. Вследствие этого производительность данной конусной дробилки ограничена. Во-вторых, конструкция дробилки с консольным валом создает лишние вибрации и шум, вследствие чего снижается надежность и долговечность, происходит быстрый износ трущихся деталей. Также повышается расход электроэнергии из-за лишних потерь на вибрацию. В-третьих, из-за ограничений по регулировке выпускной щели снижается качество готового продукта. Также в конусной дробилке с консольным валом частота вращения конуса зависит от оборотов электродвигателя, что приводит к

высокому энергопотреблению, так как нормальный процесс дробления осуществляется на максимальных оборотах. Еще одним недостатком конусной дробилки с консольным валом является невозможность запуска дробилки в загруженном состоянии. При попытке запустить дробилку с загруженной камерой дробления произойдет поломка приводного механизма, так как привод и дробящий конус жестко связаны между собой. Вследствие этого повышается время простоя конусной дробилки на производстве при техническом обслуживании, так как после отключения питания требуются работы по очистке камеры дробления от старых кусков материала [4, 5].

Все вышеперечисленные недостатки были устранены в разработанной конусной дробилке с усовершенствованной конструкцией эксцентрикового узла. Основной принцип работы заключается в использовании двух опорных и регулиро-

вочных дисков, которые расположены на вертикальной стойке. Регулировочные диски установлены внутри опорных дисков с эксцентриситетом. С помощью поворота регулировочного диска на определенный угол осуществляется

процесс отклонения дробящего конуса от центральной оси, за счет чего расстояние между дробящим конусом и неподвижным уменьшается и происходит процесс дробления материала (рис. 2) [6].

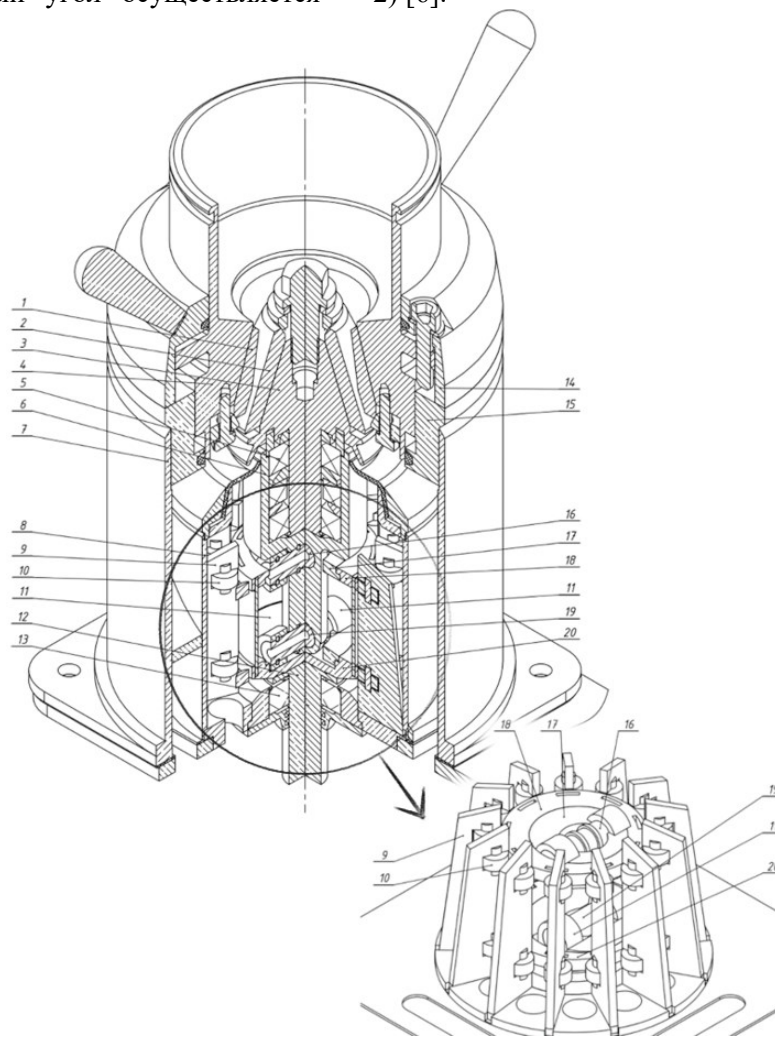


Рис. 2. Общий вид разработанной конструкции конусной дробилки

- 1 – футеровка внешнего конуса; 2 – футеровка дробящего конуса; 3 – дробящий конус; 4 – внешний конус; 5 – подшипники; 6 – стойка конуса; 7 – внешний корпус; 8 – внутренний корпус; 9 – ребра жесткости; 10 – опорные ролики; 11 – нижний регулировочный диск; 12 – ведомый вал; 13 – основание стойки; 14 – зажим; 15 – направляющая; 16 – верхний палец; 17 – верхний регулировочный диск; 18 – верхний опорный диск; 19 – нижний палец; 20 – нижний опорный диск

**Материал и методы.** В рамках исследовательской работы был разработан эксцентриковый узел конусной дробилки (рис. 2) [7].

Конусная дробилка состоит из корпуса 7. Неподвижный внешний конус 4 ввинчивается в направляющую деталь 15 до упора, регулируемого зажимом 14 внешнего конуса посредством затяжки регулировочных болтов. Неподвижная рабочая поверхность камеры дробления находится на футеровке внешнего конуса 1, закрепленной снизу зажимным кольцом, прижимающим футеровку к внешнему конусу.

Эксцентриковый узел опирается на станину дробилки и закрыт от попадания дробимого материала сбоку внутренним корпусом 8 и сверху

кольцеобразными деталями с упругой мембраной. Внутри корпуса установлены жесткие опорные ребра 9 с опорными роликами 10. Крутящий момент подводится снизу ведомым валом 12 и передается на нижний опорный диск 20 через зубчатые элементы обеих деталей. Нижний опорный диск 20 и верхний опорный диск 18 для обеспечения равного угла поворота соединены между собой синхронизатором, который устанавливается в радиальные пазы по периметру обоих дисков. При этом верхний опорный диск 18 имеет степень свободы в вертикальной плоскости для компенсации перемещения при осуществлении регулировки. Верхний опорный диск 18 и нижний опорный диск 20 устанавливаются в опорные

ролики 10. В опорных дисках присутствуют отверстия, расположенные со смещением относительно центральной оси дисков, в которые устанавливаются регулировочные диски 11 и 17. В регулировочных дисках есть центральное отверстие для установки вертикальной стойки конуса 6 и боковые отверстия в бобышках для установки верхнего 16 и нижнего 19 пальцев. На пальцах 16 и 19 закреплена стойка конуса 6, при чем соединение с верхним пальцем 16 фиксируется стопорными кольцами, а соединение с нижним пальцем 19 выполнено скользящим для компенсации бокового смещения стойки 6 при осуществлении регулировки. Максимальное отклонение стойки 6 наблюдается при повороте регулировочных дисков 11, 17 на  $90^\circ$  относительно опорных дисков 18, 20. Боковое смещение стойки 6 по величине равно разнице между суммарными эксцентриситетами нижней и верхней пар дисков.

В отличие от конусной дробилки с консольным валом в разработанной конструкции используются опорные и регулировочные диски. Угол поворота регулировочного диска внутри опорного задает амплитуду вращения дробящего конуса и регулирует степень дробления. Такая кинетическая схема достигается путем расположения регулировочных дисков в гнезде опорных и шарнирное соединение стойки конуса с регулировочными дисками с эксцентриситетом, равным половине необходимого отклонения стойки на уровне соответствующей пары дисков. Таким образом величина итогового отклонения равна векторной сумме векторов эксцентриситетов, которая меняется в зависимости от угла между векторами. Опорные диски зажаты со всех сторон опорными роликами, через которые нагрузка передается на радиальные ребра жесткости. Регулировочные диски установлены с эксцентриситетом относительно осей опорных дисков  $-e_{оп.}$ , а центральные отверстия регулировочных дисков выполнены с эксцентриситетом  $-e_{рег.}$ .

На рис. 3а представлены положения элементов эксцентрикового узла при повороте регулировочных дисков 11, 17 на  $0^\circ$  относительно опорных дисков 18, 20. Стойка подвижного конуса 7 расположена ровно вертикально с нулевым эксцентриситетом.

На рис. 3б представлено положение элементов эксцентрикового узла при повороте регулировочных дисков 11, 17 на  $90^\circ$  относительно опорных дисков 18, 20. Стойка подвижного конуса 7 расположена с максимальным смещением вдоль осей пальцев 16, 19 в сторону эксцентриситета опорных дисков 18, 20, и имеет небольшой наклон перпендикулярно оси пальцев в сторону, обратную эксцентриситету регулировочных дисков 11, 17.

На рис. 3в представлено положение элементов эксцентрикового узла при повороте регулировочных дисков 11, 17 на  $180^\circ$  относительно опорных дисков 18, 20. Стойка подвижного конуса расположена под углом, обеспечивающим расчетное положение точки гирации подвижного конуса в соответствии с оригинальной моделью конусной дробилки ВКМД-6. При этом стойка конуса 6 расположена без бокового смещения.

Изготовление предлагаемой модели предполагается путем замены соответствующих деталей дробилки ВКМД-6 на модернизированные детали эксцентрикового узла. Изготовление модернизированных деталей осуществляется из инструментальной стали марки «110Г13Л». Ребра жесткости 9 устанавливаются в пазы опорной детали и фиксируются сварным соединением.

В текущей конструкции конусной дробилки сила дробления не зависит от частоты вращения привода, что позволяет осуществлять процесс дробления на небольших оборотах с использованием ряда повышающих передач. Необходимо теоретическим путем установить зависимость между частотой вращения дробящего конуса, шириной выпускной щели и производительностью конусной дробилки.

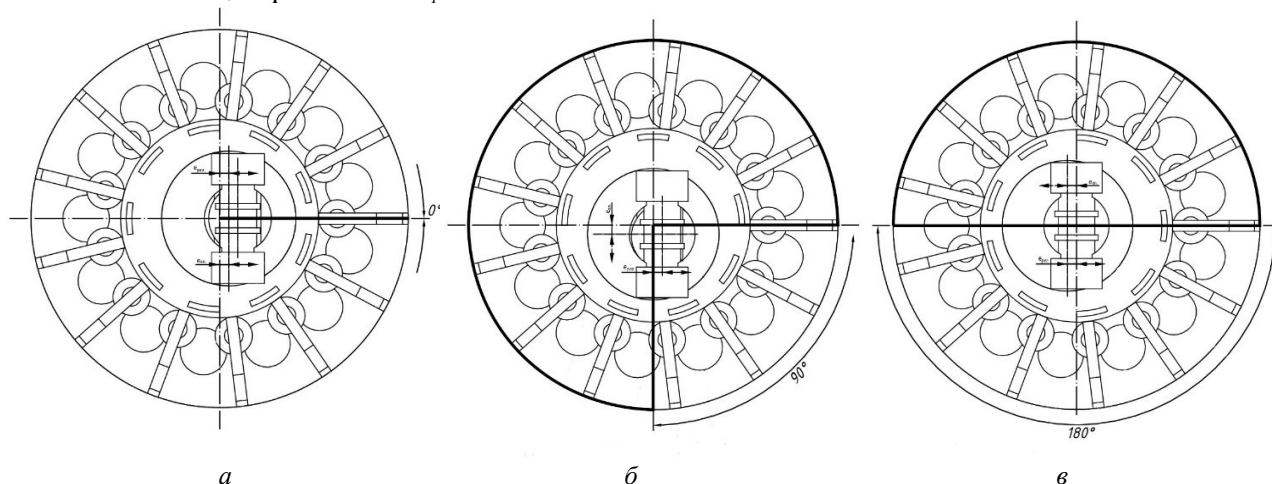


Рис. 3. Положение верхней пары дисков при повороте регулировочного диска: а) на  $0^\circ$ ; б) на  $90^\circ$ ; в) на  $180^\circ$

**Основная часть.** Для того, чтобы установить зависимость между частотой вращения дробящего конуса, шириной выпускной щели и производительностью конусной дробилки необходимо рассмотреть движение материала в камере дробления [8].

Представим движущийся поток материала, проходящий через сечение камеры дробления, как сплошную среду. Тогда количество готового материала, прошедшего через камеру дробления за единицу времени можно считать производительностью.

Проанализируем воздействие сил на кусок материала в конусной дробилке [9].

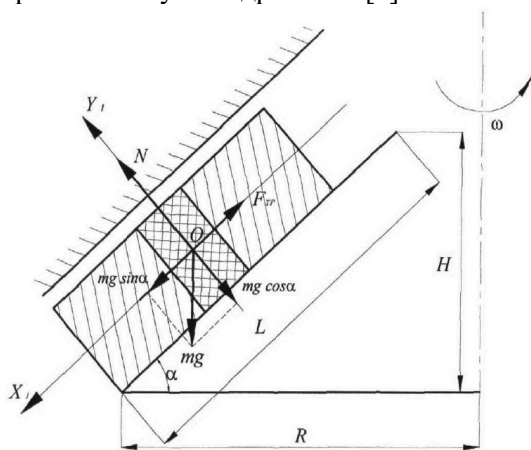


Рис. 4. Действие сил на материал в конусной дробилке

На рис. 4 на материал действует нормальная сила  $N$ , сила тяжести  $mg$ , сила трения  $F_{тр}$ . Центр масс обозначен буквой  $O$ . Исходя из схемы действия сил составим уравнение движения:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 = mg \sin \alpha - F_{тр}, \\ m\ddot{y}_1 = -mg \cos \alpha + mA\omega^2 \sin \omega t + N \end{cases} \quad (1)$$

где  $A$  – амплитуда вращения дробящего конуса,  $\omega$  – частота вращения дробящего конуса,  $m$  – масса.

Сила трения находится как:

$$F_{тр} = \mu N, \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения.

Так как ускорение материала по оси  $OY_1$  равно 0 ( $\ddot{y}_1 = 0$ ), то:

$$N = mg \cos \alpha - mA\omega^2 \sin \omega t, \quad (3)$$

Формулу 3 подставим в уравнение движения 1:

$$\ddot{x}_1 = g \sin \alpha - \mu(g \cos \alpha - A\omega^2 \sin \omega t) \quad (4)$$

$$V = \left( \frac{1}{3} \pi H [(R+b)^2 + (R+b)(R_1+b) + (R_1+b)^2] \right) - \left( \frac{1}{3} \pi H [R^2 + RR_1 + R_1^2] \right), \quad (8)$$

$$V = \pi H R b \left[ 2 + \frac{b}{R} + \frac{x_1}{R} \cos \alpha \right], \quad (9)$$

где  $x_1$  – длина стороны дробящего конуса, м;  $\alpha$  – угол наклона образующей дробящего конуса, град.

Для определения производительности конусной дробилки рассмотрим схему движения кусков материала между дробящим и внешним конусом [10,11].

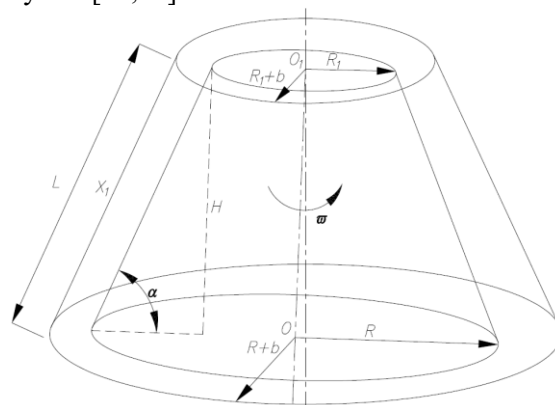


Рис. 5. Схематичное изображение дробящего и внешнего конуса

$R$  – радиус нижнего основания дробящего конуса, м,  $R+b$  – радиус нижнего основания внешнего неподвижного конуса, м,  $R_1$  – радиус верхнего основания дробящего конуса, м,  $R_1+b$  – радиус верхнего основания внешнего неподвижного конуса, м,  $H$  – высота дробящего конуса, м

Количество материала, проходящее через пространство между двумя конусами на рис. 5 является объемной величиной производительности. Для вычисления объема пространства, находящегося между дробящим и внешним конусом необходимо из объема внешнего конуса  $V_2$  вычесть объем дробящего конуса  $V_1$  [12, 13].

$$V = V_2 - V_1, \quad (5)$$

Объем внешнего конуса  $V_2$  исходя из рис. 5 будет равен:

$$V_2 = \frac{1}{3} \pi H [(R+b)^2 + (R+b)(R_1+b) + (R_1+b)^2], \quad (6)$$

где  $R$  – радиус нижнего основания дробящего конуса, м;  $R+b$  – радиус нижнего основания внешнего неподвижного конуса, м;  $R_1$  – радиус верхнего основания дробящего конуса, м;  $R_1+b$  – радиус верхнего основания внешнего неподвижного конуса, м;  $H$  – высота дробящего конуса, м.

Объем дробящего конуса  $V_1$  исходя из рис. 7 будет равен:

$$V_1 = \frac{1}{3} \pi H [R^2 + RR_1 + R_1^2], \quad (7)$$

где  $R$  – радиус нижнего основания дробящего конуса, м;  $R_1$  – радиус верхнего основания дробящего конуса, м.

Объем пространства, находящегося между дробящим и внешним конусом будет равен:

$$V = \left( \frac{1}{3} \pi H [(R+b)^2 + (R+b)(R_1+b) + (R_1+b)^2] \right) - \left( \frac{1}{3} \pi H [R^2 + RR_1 + R_1^2] \right), \quad (8)$$

$$V = \pi H R b \left[ 2 + \frac{b}{R} + \frac{x_1}{R} \cos \alpha \right], \quad (9)$$

Производительность конусной дробилки определяется как количество материала, пройденное через камеру дробления, находящуюся

между дробящим и внешним конусом, за единицу времени. Тогда:

$$Q = \frac{V}{t} = \pi \cdot H \cdot R \cdot b \cdot \omega \cdot \cos \alpha \frac{dx}{dt}, \quad (10)$$

После дифференцирования выражений и преобразований получим формулу для определения производительности конусной дробилки:

$$Q = 2\pi^2 \frac{g}{\omega} H b \cos(\alpha) (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) \rho, \quad (11)$$

где  $\rho$  – плотность материала, подаваемого в камеру дробления, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega$  – частота вращения, об/мин;  $b$  – ширина выпускной щели, м.

В среде Maple были построены трехмерные графики, отображающие зависимость изменения производительности конусной дробилки от частоты вращения конуса и ширины выпускной щели в конусной дробилке с консольным валом и конусной дробилке с разработанным эксцентриковым узлом. На рисунке 6 представлен график изменения производительности в конусной дробилке с консольным валом.

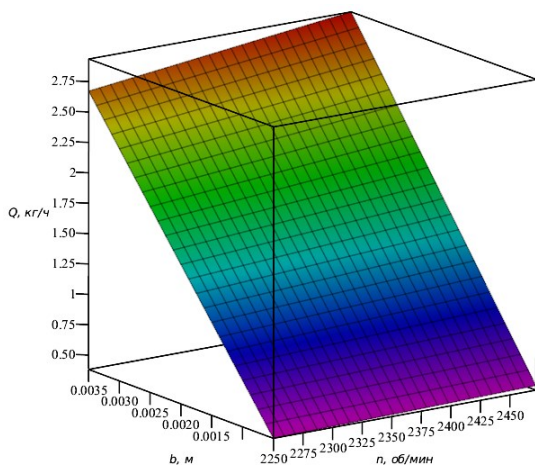


Рис. 6. График изменения производительности конусной дробилки от ширины выпускной щели и частоты вращения конуса в конусной дробилке с консольным валом

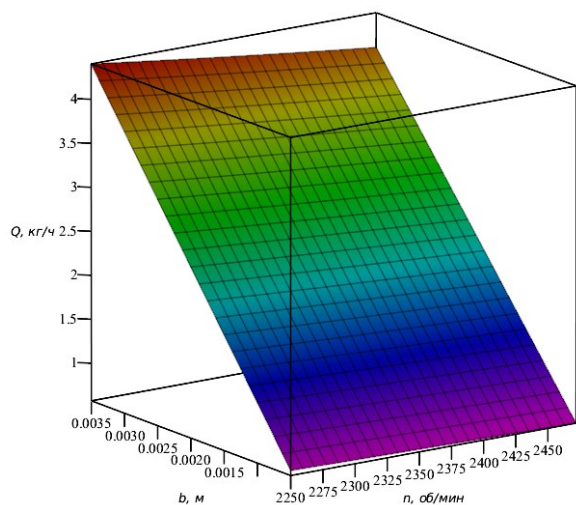


Рис. 7. График изменения производительности конусной дробилки от ширины выпускной щели и частоты вращения конуса в конусной дробилке с усовершенствованной конструкцией эксцентрикового узла

На рисунке 7 представлен график изменения производительности в конусной дробилке с усовершенствованной конструкцией эксцентрикового узла.

По рисунку 6 и 7 видно, что при минимальной частоте вращения 2250 об/мин, а также при максимальной ширине выпускной щели, равной 3,5 мм производительность конусной дробилки с усовершенствованной конструкцией эксцентрикового узла составляет 4,3 кг/ч, что в 1,7 раза больше при тех же значениях частоты вращения и ширины выпускной щели, что в конусной дробилке с консольным валом. За счет возможности конусной дробилки работать при сниженных оборотах снижается энергопотребление, шум и вибрации при работе, а также появляется возможность запуска конусной дробилки в загруженном состоянии, что значительно сокращает время простоя оборудования на производстве [14,15].

### Выводы

В ходе проведения исследования зависимости эффективности работы конусной дробилки от конструкции эксцентрикового узла было доказано, что разработанная конструкция с двумя опорными и двумя регулировочными дисками, которые расположены на вертикальной стойке и соединены с помощью цилиндрического синхронизатора, позволяет обеспечить процесс дробления на сниженных оборотах вращения приводного вала. По графику 6 и 7 было установлено, что при минимальной частоте вращения 2250 об/мин и максимальном открытии ширины выпускной щели на 3,5 мм производительность конусной дробилки составляет 4,3 кг/ч, т.е. в 1,7 раз больше, чем в конусной дробилке с консольным валом. Текущие результаты показывают эффективность работы конусной дробилки с усовершенствованной конструкцией эксцентрикового узла.

В ходе данного исследования была рассмотрена существующая конструкция конусной дробилки с консольным валом. Основными ее недостатками являются: высокое энергопотребление, низкая производительность, невозможность запуска в загруженном состоянии, низкая надежность конструкции вследствие износа трущихся механизмов, а также высокий уровень шума. В разработанной конструкции эксцентрикового узла все текущие недостатки были исключены за счет применения опорных и регулировочных дисков, расположенных с эксцентриситетом относительно центральной оси данных дисков. В основной части работы представлены схемы усовершенствованной конструкции эксцентрикового узла, а также три основных положения регулировочного диска относительно опорного. В



теоретическом исследовании представлен математический аппарат по расчету производительности с учетом применения разработанной конструкции эксцентрика. По результатам исследования представлены графические зависимости основных параметров, влияющих на производительность. Цель исследования, которая заключалась в повышении производительности работы конусной дробилки за счет применения новой конструкции эксцентрика, достигнута. Использование разработанной и запатентованной конструкции эксцентрикового узла на промышленных предприятиях позволит увеличить объем производства, сократить финансовые затраты на электроэнергию, снизить время простоя оборудования на производстве, а также снизить уровень шума и вибраций, возникающих при работе конусной дробилки.

**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. Хопунов Э.А. Рудоподготовка и развитие процессов переработки минерального сырья // Современные научные исследования и инновации. 2019. № 9 (101). С. 4.
2. Устинов И.Д., Шулюяков А.Д. Производство кубовидного щебня - инновационный этап развития промышленности строительных материалов // Строительные материалы. 2017. № 5. С. 66–68.
3. Калянов А.Е., Чернухин С.А., Великанов В.С. К вопросу повышения эффективности работы конусной дробилки за счет применения объемного гидропривода // Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. № 2. С. 127–136. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-127-136.
4. Нефедов А.В., Самылин Р.А., Чиченев Н.А. Повышение производительности конусной дробилки КМД-2200 ПАО «Гайский ГОК» // Сталь. 2023. № 4. С. 28–31.
5. Лагунова Ю.А., Калянов А.Е., Жилинков А.А., Разбитнов С.Л., Буялич Г.Д. Предложения по повышению эффективности эксплуатации конусных дробилок на щебеночных карьерах // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 6 (176). С. 54–64. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-6-54-64.
6. Загородний Н.А., Головкин М.В. Исследование основных факторов, влияющих на технико-эксплуатационные характеристики конусной дробилки // Сборник трудов третьей международной научно-практической конференции «Инженерно-техническое образование и наука». Новороссийск: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. С. 11–12.
7. Пат. № RU 220 142 U1 Российская Федерация, МПК В02С 2/00, В02С 19/16. Конусная дробилка / Головкин М.В., Бондарь А.С., Загородний Н.А., Савенкова А.Ю.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» № 2023116839; заявл. 27.06.2023; опубл. 29.08.2023, Бюл. №25. 14 с.
8. Загородний Н.А., Головкин М.В. Исследование воздействия технологических параметров конусной дробилки на процесс дробления щебня // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 4-1 (87). С. 65–72. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-4-1(87)-65-72.
9. Смирнов В.А., Захаров М.Ю., Бочков В.С. Анализ методов увеличения износостойкости футеровок конусных дробилок и автоматизированный контроль их состояния // Сборник трудов второй всероссийской научно-практической конференции «Цифровая трансформация в горной промышленности и машиностроении». Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2023. С. 37–42.
10. Белов Н.В., Бородин М.Б., Зотов В.В., Лагунова Ю.А. Исследование динамики работы гидромеханического предохранительного устройства в приводе конусной дробилки // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 6 (176). С. 3–14. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-6-3-14.
11. Смирнов В.А., Захаров М.Ю., Бочков В.С. Технология автоматизированного управления конусной дробилкой // Сборник трудов научно-практической конференции «Уральская горная школа-регионам». Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2023. С. 710–711.
12. Сергеев Ю.С., Платов С.И., Гузев В.И., Сергеев С.В. Применение виброприводов с модулирующими свойствами в дробилках хрупких материалов для управления фракционным составом дисперсной фазы // Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. № 4. С. 164–175. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-164-175.
13. Чуйков В.Е., Коновалов В.В., Донцова М.В., Петрова С.С. Обоснование направления совершенствования конструкций дробилок зерна // Известия самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 3. С. 45–55. DOI: 10.55471/19973225\_2023\_8\_3\_45.

14. Бойко П.Ф., Титиевский Е.М., Тимирязев В.А., Мнацаканян В.У., Хостикоев М.З. Обеспечение долговечности броней дробилок путем применения новых технологий их изготовления и диагностирования износа // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2019. № 5 (113). С. 42–47. DOI: 10.33285/1999-6934-2019-5(113)-42-47.

15. Журавлев А.Г., Черепанов В.А., Чендырев М.А., Глебов И.А., Семенкин А.В. Научно-техническое сопровождение при разработке регламентов на техническое обслуживание и ремонт дробилок // Проблемы недропользования. 2020. № 2(25). С. 50–59. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.050.

#### Информация об авторах

**Загородний Николай Александрович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой эксплуатации и организации движения автотранспорта. E-mail: n.zagorodnij@yandex.ru. Белгородский Государственный Технологический Университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Россия, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

**Головкин Михаил Валерьевич**, аспирант кафедры механического оборудования. E-mail: mixail.golovkin.1997@mail.ru. Белгородский Государственный Технологический Университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Россия, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

Поступила 04.04.2025 г.

© Загородний Н.А., Головкин М.В., 2025

**Zagorodniy N.A., \*Golovkin M.V.**

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

*\*E-mail: mixail.golovkin.1997@mail.ru*

## INCREASING THE EFFICIENCY OF A CONE CRUSHER BY OPTIMIZING THE DESIGN OF THE ECCENTRIC UNIT

**Abstract.** This article studies the influence of the design features of the eccentric unit on the performance of a cone crusher, the purpose of which is to increase the productivity of the cone crusher by changing the design of the eccentric unit of the cone crusher. The object of study in this article is the existing designs of the eccentric unit, the limitations of their functionality. The article presents an analysis of the design features of the eccentric unit of a cone crusher with a cantilever shaft and its disadvantages. Based on the analysis, a prototype of an improved design of the eccentric unit was developed, which allows for increased productivity and reduced energy consumption of the cone crusher due to the use of support and adjusting disks. The rotation speed of the crushing cone is adjusted by turning the adjusting disk at a certain angle. The main design schemes of the developed eccentric unit, its model, operating principle and advantages are presented. In the course of theoretical studies, the dependence of the influence of the cone rotation speed on the performance of the cone crusher was established. To ensure efficient operation of the cone crusher with the improved design of the eccentric unit, it is necessary to rotate the adjustment disk by 90 degrees and ensure maximum throughput of the outlet. The use of this invention will increase production volumes and reduce energy costs by reducing the rotation frequency of the cone. The results of this study allow us to conclude that it is necessary to use the developed design of the eccentric unit in the production of industrial materials.

**Keywords:** cone crusher, productivity, eccentric unit, eccentricity, support disk, adjusting disk.

### REFERENCES

1. Hopunov E.A. Ore preparation and development of mineral raw material processing processes [Rudopodgotovka i razvitie processov pererabotki mineral'nogo syr'ya]. Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii. 2019. No. 9 (101). Pp. 4–14. (rus)

2. Ustinov I.D., Shuloyakov A.D. Production of Cubiform Crushed Stone is an Innovative Stage of Development of Building Materials Industry [Proizvodstvo kubovidnogo shchebnya - innovacionnyj

etap razvitiya promyshlennosti stroitel'nyh materialov]. Stroitel'nye Materialy. 2017. No. 5. Pp. 66–68. (rus)

3. Kalyanov A.E., Chernukhin S.A., Velikanov V.S. Increasing Performance Efficiency of a Cone Crusher by Using a Fluid Power Drive. Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2023. vol. 21. No. 2, Pp. 127–136. DOI: 10.18503/19952732-2023-21-2-127-136 (rus)

4. Nefedov A.V., Samylin R.A., Chechenov N.A. Increasing the productivity of the KMD-2200 cone crusher at «Gaisky GOK» [Povyshenie proizvoditel'nosti konusnoj drobilki KMD-2200 PAO «Gajskij GOK»]. Stal'. 2023. No. 4. Pp. 28–31. (rus)

5. Lagunova Yu. A., Kalyanov A. E., Zhilinkov A. A., Razbitnov S.L., Buyalich G.D. Suggestions to improve the efficiency of operation of cone crushers in crushed stone quarries [Predlozheniya po povysheniyu effektivnosti ekspluatatsii konusnyh drobilok na shchebenochnykh kar'erah]. Mining Equipment and Electromechanics. 2024. No. 6(176). Pp. 54–64. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-654-64 (rus)
6. Zagorodniy N.A., Golovkin M.V. Study of the main factors influencing the technical and operational characteristics of a cone crusher [Issledovanie osnovnykh faktorov, vliyayushchih na tekhniko-ekspluatatsionnye harakteristiki konusnoj drobilki]. Sbornik trudov tret'ej mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Inzhenerno-tekhnicheskoe obrazovanie i nauka». Novorossiysk. BG TU named after V.G. Shukhov. 2023. Pp. 11–12. (rus)
7. Golovkin M.V., Bondar A.S., Zagorodniy N.A., Savenkova A.Yu. Cone crusher. Patent RF, no. RU 220 142 U1, 2023.
8. Zagorodniy N.A., Golovkin M.V. Research of the influence of technological parameters of a cone crusher on the process of crushed stone [Issledovanie vozdeystviya tekhnologicheskikh parametrov konusnoj drobilki na process drobleniya shchebnya]. Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2024. No. 4-1 (87). Pp. 65–72. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-4-1(87)-65-72 (rus)
9. Smirnov V.A., Zakharov M.Yu., Bochkov V.S. Analysis of methods for increasing wear resistance of cone crusher linings and automated monitoring of their condition [Analiz metodov uvelicheniya iznosostoykosti futerovok konusnyh drobilok i avtomatizirovannyj kontrol' ih sostoyaniya]. Sbornik trudov vtoroj vsrossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Cifrovaya transformatsiya v gornoj promyshlennosti i mashinostroenii». Yekaterinburg. UGGU. 2023. Pp. 37–42. (rus)
10. Belov N.V., Borodina M.B., Zotov V.V., Lagunova Yu.A. Study of the dynamics of the hydro-mechanical safety device in the drive of a cone crusher [Issledovanie dinamiki raboty gidromekhanicheskogo predokhranitel'nogo ustrojstva v privode konusnoj drobilki]. Mining Equipment and Electromechanics. 2024. No. 6(176). Pp. 3–14. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-6-3-14 (rus)
11. Smirnov V.A., Zakharov M.Yu., Bochkov V.S. Cone Crusher Automated Control Technology [Tekhnologiya avtomatizirovannogo upravleniya konusnoj drobilkoj]. Sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferencii «Ural'skaya gornaya shkola-regionam». Ekaterinburg. UGGU. 2023. Pp. 710–711. (rus)
12. Sergeev Yu.S., Platov S.I., Guzeev V.I., Sergeev S.V. Application of Vibration Drives with Modulating Properties in Crushers of Brittle Materials to Control the Fractional Composition of the Dispersed Phase [Primenenie vibroprivodov s moduliruyushchimi svojstvami v drobilkah hrupkikh materialov dlya upravleniya frakcionnym sostavom dispersnoj fazy]. Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova. 2023. Vol. 21, No. 4, Pp. 164–175. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-164-175 (rus)
13. Chuikov, V.E., Kononov, V.V., Dontsova, M.V., Petrova, S.S. Justification of the improving direction design of grain crushers [Obosnovanie napravleniya sovershenstvovaniya konstrukcij drobilok zerna]. Bulletin Samara State Agricultural Academy. 2023. No. 3. Pp. 45–55. DOI: 10.55170/19973225\_2023\_8\_3\_45 (rus)
14. Boyko P.F., Titievsky E.M., Timiryazev V.A., Mnatsakanyan V.U., Khostikoev M.Z. Ensuring the durability of crusher armor by using new technologies for their manufacture and wear diagnostics [Obespechenie dolgovechnosti bronej drobilok putem primeneniya novykh tekhnologij ih izgotovleniya i diagnostirovaniya iznosa]. Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa. 2019. No. 5 (113). Pp. 42–47. DOI: 10.33285/1999-6934-2019-5(113)-42-47 (rus)
15. Zhuravlev A.G., Cherepanov V.A., Chendyrev M.A., Glebov I.A., Seminkin A.V. Scientific and technical support in the development of regulations for the maintenance and repair of crushers [Nauchno-tekhnicheskoe soprovozhdenie pri razrabotke reglamentov na tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont drobilok]. Problemy nedropol'zovaniya. 2020. No. 2 (25). Pp. 50–59. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.050 (rus)

#### Information about the authors

**Zagorodniy, Nikolay A.** PhD, Assistant professor, Head of the Department of Operation and Organization of Motor Transport Traffic. E-mail: n.zagorodnij@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Golovkin, Mikhail V.** Postgraduate student of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: mixail.golovkin.1997@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

*Information about the authors*

**Shbani, Ali** Postgraduate student. E-mail: ali.shbani951@gmail.com. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint Petersburg, Politekhnikeskaya st., 29, building B.

**Alwan, Hassan M.** PhD, Assistant professor. и. E-mail: hassan.m.alwan@uotechnology.edu.iq. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint Petersburg, Politekhnikeskaya st., 29, building B.

---

*Received 04.04.2025*

**Для цитирования:**

Загородний Н.А., Головкин М.В. Повышение эффективности работы конусной дробилки за счет оптимизации конструкции эксцентрикового узла // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 9. С. 71–80. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-71-80

**For citation:**

Zagorodniy N.A., Golovkin M.V. Increasing the efficiency of a cone crusher by optimizing the design of the eccentric unit. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 9. Pp. 71–80. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-71-80

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-81-88

**Косогова Ю.П.**

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ

E-mail: ypkosogova@mephi.ru

## ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ РЕЗАНИЯ И МАТЕРИАЛА ПОКРЫТИЯ ФРЕЗЫ НА ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ВНУТРИКОРПУСНОГО УСТРОЙСТВА ВВЭР

**Аннотация.** Значительная часть деталей внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР изготавливаются из аустенитных нержавеющей сталей, обладающих плохой обрабатываемостью резанием, что увеличивает не только трудоемкость изготовления и расход дорогостоящего металлорежущего инструмента, но в отдельных случаях требует последующей доработки деталей. Повышение температуры обрабатываемого материала в зоне резания повышает его обрабатываемость, а одновременное снижение температуры режущего инструмента снижает его износ, повышает качество обработанной поверхности, снижает количество и величину дефектов (заусенцев) на обработанных поверхностях, зачищаемых в ручную, что снижает вероятность попадания их на сборку. Предложено повысить обрабатываемость деталей внутрикорпусного устройства ВВЭР и качество его изготовления посредством новой траектории перемещения детали при резании, при которой реализуется попутное фрезерование, изменяется условие вхождения фрезы в металл, что сопровождается снижением количества тепла, поглощаемого фрезой, и способствует уменьшению износа инструмента и снижает количество и размеры заусенцев.

Предварительные результаты показывают, что обеспечено снижение расхода металлорежущего инструмента, увеличение производительности труда и качества изготовления деталей, поступающих на сборку внутрикорпусных устройств реактора, а значит и повышение эксплуатационной надежности и безопасности ядерной энергетической установки.

**Ключевые слова:** обработка резанием, износ инструмента, нержавеющей аустенитные стали, фреза, дефекты поверхности (заусенцы).

**Введение.** Обеспечение высокого качества производства изделий атомного машиностроения повышает безопасность ядерных энергетических установок. Значительная часть деталей внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР изготавливаются из аустенитных нержавеющей сталей, обладающих плохой обрабатываемостью резанием, что увеличивает не только трудоемкость изготовления и расход дорогостоящего металлорежущего инструмента, но в отдельных случаях требует ручной доработки деталей до заданного качества, повышая в этом случае влияние «человеческого фактора» на работоспособность и безопасность реактора.

В различных условиях резания изнашивание инструмента может быть вызвано различными причинами и иметь различные механизмы. В зоне контакта режущего инструмента с аустенитным сплавом происходят процессы, включающие пластические деформации инструментального материала при высокой температуре, абразивное истирание, адгезионное изнашивание, диффузионное растворение, образование усталостных трещин и окисление поверхности инструментального материала. Пластические деформации инструментального материала при высоких температурах приводят к изменению

формы режущего лезвия и в конечном счёте могут отразиться на работоспособности инструмента. Большие пластические деформации приводят к потере формоустойчивости режущего лезвия [1, 2]. Причины пластических деформаций режущего инструмента связаны со значительным упрочнением обрабатываемого материала в результате влияния скорости деформации и разупрочнением инструментального материала в окрестности режущей кромки [1-3]. Абразивный износ является причиной непродолжительного срока службы инструментов из быстрорежущих и инструментальных сталей. Установлено, что чем большую упругую деформацию может выдержать поверхность, тем она лучше сопротивляется абразивному износу. Экспериментально доказано, что сопротивление абразивному износу некоторых металлов пропорционально их модулю упругости [2-5]. При фрезеровании используют высокие скорости резания, в результате из-за трения поверхности заготовки и инструмента нагреваются и могут наблюдаться структурные изменения. Известно, что коэффициент трения между чистыми поверхностями металлов очень велик и может достигать 50, это связано со способностью к прочной адгезии, что обеспечивает



соединение типа сварки плавлением [4–6]. Прочность таких адгезионных слоев зависит от природы контактирующих металлов. Контакт свежих поверхностей приводит к прочной трибоадгезии. Образование фазы сплава при трибомеханической обработке обнаружено в системе цинк-медь. При высоких контактных давлениях и высоких температурах между поверхностями возникают участки схватывания как результат межмолекулярного взаимодействия. При относительном перемещении поверхностей эти мостики разрушаются с вырыванием частиц в том числе с поверхности инструмента. Чтобы эффективно подавить сваривание трущихся поверхностей, на них следует образовать адгезионные пленки, с этой целью применяют смазочно-охлаждающие среды, уменьшающие силы сцепления. Длительность эксплуатации режущего инструмента можно увеличить, подбирая состав активной смазочной среды [6–8]. Диффузия компонентов обрабатываемого материала приводит к изменению физических свойств поверхностного слоя инструмента. Например, диффузия углерода вызывает размягчение и последующую пластическую деформацию инструментального материала [9–11]. Эта деформация может увеличить силы резания или разрушить инструмент. Механизм окислительного изнашивания твердосплавного инструмента включает образование и истирание

окисных пленок, накопление окислов в порах поверхностного слоя и его разрушение. Однако, существует мнение, что поверхности, о которые трётся режущий инструмент, являются свежесформованными, и для возникновения на них окисных или других каких-либо пленок недостаточно времени [12, 13].

**Материалы и методы.** В качестве объекта исследований выбрана наиболее проблемная деталь внутрикорпусного устройства реактора ВВЭР, изготовленная из аустенитной нержавеющей стали 08X18H10T – труба упорных стаканов, которые служат в качестве направляющих и опорных частей тепловыделяющих сборок (ТВС). Труба диаметром 194 мм, длиной 480 мм и толщиной стенок 12 мм, изготовленная из аустенитной нержавеющей стали 08X18H10T, перфорирована в виде узких пазов (ширина паза 3 мм, длина – 30 мм), что способствует задержанию из потока теплоносителя твердых частиц и защите твэлов от механических повреждений. В каждой из этих труб необходимо прорезать 390 пазов шириной 3 мм (рис.1), общее количество таких пазов в комплекте труб для одного реактора составляет 63000, все из них должны быть изготовлены в соответствии и высокими требованиями к качеству поверхностного слоя.

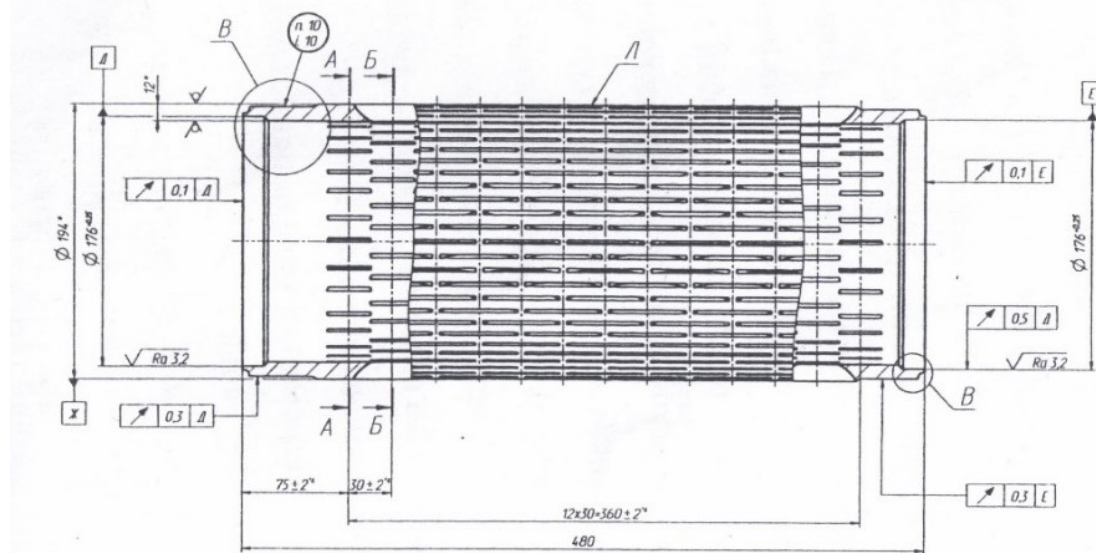


Рис. 1. Чертеж детали

Обработка проводится на вертикально-фрезерном станке 6Р13, где обрабатываются 390 пазов дисковой фрезой шириной 3,2 мм. Марка применяемого материала инструмента Р6М5. Стоит отметить некоторые трудности, возникающие на этапе фрезерования пазов:

- быстрый износ инструмента;
- образование после обработки больших заусенцев;

– малая скорость резания и, как следствие, низкая производительность.

В результате вязкости и способности к значительному наклепу нержавеющей стали при фрезеровании каждого из 63000 пазов образуются большие заусенцы (дефекты), которые приходится зачищать, в том числе и вручную. После обработки резанием каждый такой дефект (заусенец) необходимо удалить вручную. Учитывая

большое количество пазов, возникает вероятность пропуска дефекта на детали, допущенной на сборку ВКУ реактора, что снижает уровень безопасности его эксплуатации. Таким образом снижение размера и количества заусенцев при обработке резанием снижает вероятность наличия дефекта на деталях ВКУ и тем самым повышает уровень безопасности эксплуатации реактора.

Одной из основных причин возникновения заусенцев является износ (притупление) фрезы при резании [13]. Поэтому снижение износа фрез позволит не только снизить расход дорогостоящего инструмента, увеличить скорость резания (повысить производительность обработки), но и улучшить качество изготавливаемых деталей и их эксплуатационную надежность. Износ фрез снижается при снижении температуры их нагрева в процессе резания и применения более износостойкого инструментального материала. Снижение температуры нагрева инструмента можно обеспечить за счет уменьшения количества тепла, поступающего в инструмент и за счет увеличения количества тепла, уводимого от инструмента. Этого можно добиться изменением схемы резания. Известно, что лучшими инструментальными материалами из твердых сплавов по характеристикам теплопроводности, теплоустойчивости и циклической термоустойчивости яв-

ляются ВК4, ВК6, ВК8, ВК10, ВК15, а из быстрорежущих инструментальных материалов, лучшим выбором будут Р6М5, Р9К5, Р9К10, Р6М5К5.

**Основная часть.** Контактирование инструмента со стружкой и обрабатываемой заготовкой происходит в условиях очень высоких давлений и температур. Условия работы инструмента ещё больше усложняются в связи с наличием высоких градиентов давления и температуры в зоне резания. Режущие инструменты выходят из строя как в результате истирания по передней и задней поверхностям, так и в результате выкрашивания режущей кромки [14, 15]. Известно, что стали при резании упрочняются примерно вдвое. При высокоскоростном резании следует ожидать ещё большего упрочнения обрабатываемого материала. Кроме того, при обработке нержавеющей стали образуется сливная стружка, которую трудно удалять из зоны резания.

Указанные проблемы объясняются достаточной вязкостью нержавеющей аустенитных сталей, которые являются пластичными. Образующаяся при резании таких сталей стружка завивается длинной спиралью, образуется сливная стружка. Аустенитные сплавы характеризуются низким пределом текучести при том же временном сопротивлении, что и углеродистые конструкционные стали, т. е. они весьма пластичны (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение механических свойств нержавеющей и углеродистой сталей [4]

Материал	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Нержавеющая сталь 08X18H10T	615	300	52,8	71,3
Сталь 45	600	255	15	40

В результате низкой теплопроводности аустенитных сталей, выделяющееся при резании тепло плохо отводится из зоны резания стружкой и деталью и, в основном, концентрируется в инструменте, повышая его температуру. Известно, что теплопроводность стали 08X18H10T равна 0,0027 Вт/м·°С, в то время как теплопроводность стали 45 равна 0,0040 Вт/м·°С. Весьма слабое разупрочнение нержавеющей сталей происходит только в тонких контактных слоях стружки. В результате разница между твёрдостью инструментального и обрабатываемого материала с увеличением скорости и температуры резания уменьшается и может исчезнуть совершенно. Это создаёт условия для периодического среза деформированных слоёв инструментального материала и резкого увеличения интенсивности изнашивания инструмента [10–13].

При фрезеровании износ режущего инструмента происходит интенсивнее, чем при точении, из-за неблагоприятных условий работы инструмента, многократно врезающегося в обрабатываемую заготовку, что вызывает ударные нагрузки, а также резкие перепады температур на рабочих поверхностях инструмента (тепловой удар). Помимо этого, боковые поверхности инструмента находятся в постоянном контакте с заготовкой, что приводит к повышению температуры в зоне резания [16]. Такие условия приводят к нагреву инструмента, а вследствие разности коэффициентов линейного расширения стали 08X18H10T и материала инструмента Р6М5, увеличивается контактная площадь соприкосновения поверхностей, что ведет к быстрому истиранию боковых поверхностей.

Выявлено, что начальный размер ширины инструмента уменьшается с 3,0-3,2 мм до 2,8 мм и ниже. В ходе обработки также уменьшается высота зуба, которую корректируют правкой инструмента, в следствии этого диаметр фрезы уменьшается с 63,0 мм до 58,0 мм. На рисунках 2, 3 представлены фотографии изношенных инструментов, наглядно показывающих в каких местах происходит износ.

Метод прорезания пазов, применяемый на предприятии Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск состоит в следующем: заготовку устанавливают в трехкулачковый самоцентрирующийся патрон на стол станка, перпендикулярно оси шпинделя станка. Затем прижимают жестким центром с противоположного торца с использованием фланца. Далее фрезеруют 390 пазов дисковой фрезой диаметром 63 мм с поворотом заготовки в делительном приспособлении и перемещением стола станка.



Рис. 2. Износ фрезы общий вид



Рис. 3. Износ режущего зуба фрезы

Обработка резанием нержавеющей стали 08X18H10T ведется со следующими параметрами резания:  $t = 12$  мм,  $b = 3$  мм,  $S = 0,12$  мм/мин,  $V_c = 12$  м/мин, стойкость инструмента при этом около 45 минут. Приблизительное количество обработанных пазов между переточками составляет 20 штук, а количество переточек не превышает четырех, таким образом на изготовление одной детали расходуется около 50 фрез. Одна фреза между переточками обеспечивает фрезерование 15-20 пазов. На изготовление одной трубы с учетом переточек расходуется 5-6 фрез, а на комплект труб для одного реактора 800-900 фрез.

В действующем технологическом процессе применяется прямолинейное вертикальное перемещение детали, обеспечивающее встречное фрезерование. Формирование стружки при существующей схеме резания осуществляется от минимальных толщин до максимальных, что вызывает самоупрочнение материала, увеличение температуры в зоне резания. В этом случае наблюдается значительный наклеп и быстрый износ режущей кромки фрезы, что приводит к образованию больших заусенцев и перерасходу фрез. На практике такие выступы зачищают вручную

шлифовальными машинами. Сначала зачищаются большие заусенцы, далее зачищают каждый паз по отдельности в соответствии с предъявляемыми требованиями. Использование такого метода обработки поверхности после механического обработки существенно увеличивает трудоемкость процесса. Кроме этого, поверхность заготовки может иметь механические повреждения, в результате вдавливания абразивных зерен в поверхность заготовки. На рисунках 4, 5 видны дефекты (заусенцы), которые появляются в процессе фрезерования каждого из 63000 пазов.

Было предложено изменить траекторию движения рабочего инструмента, перейти от встречного фрезерования на попутное. Предложенное попутное фрезерование изменяет условия вхождения фрезы в металл, снижает упрочнение поверхностного слоя обрабатываемого металла, за счет чего снижается количество тепла, поступающего в инструмент, что снижает его износ, уменьшаются количество и размеры заусенцев. Для повышения эффективности технологического процесса предложена конструкция более износостойкой прорезной фрезы толщиной 3 мм с твердосплавными сменными пластинами.





Рис. 4. Дефекты в виде заусенцев внутри детали



Рис. 5. Выступы в виде заусенцев снаружи детали

Карбонитрид титана обеспечивает высокую твердость. Для TiCN характерен очень низкий коэффициент трения, за счёт чего снижается налипание нержавеющей стали на инструмент. Нитрид титана выступает в качестве механического, термического и химического барьера между режущей кромкой и обрабатываемой деталью. Алюминий-титан нитрид (AlTiN) - покрытие с уникальной нанокомпозитной структурой, которая существенно увеличивает твёрдость, термостойкость (до 900°C) и сопротивление ударным нагрузкам, повышая виброустойчивость. Если два первых покрытия рекомендованы для резцов, то третье покрытие будет предпочтительно для фрез [16]. Из серийно выпускаемых промышленностью сменных пластин рекомендовано износостойкое покрытие TiN (3 мкм) + TiC (3 мкм) + AlTiN (3 мкм).

В технологическом процессе подрезку торцов, точение и растачивание выполняют на токарно-винторезном станке модели 16K20, используя приспособление - трёхлачковый самоцентрирующий патрон, люнет неподвижный роликовый ЛН16K20-270Р. Пазы обрабатывают на вертикальном фрезерном центре модели MILLSTAR LV1400, применяя патрон DIN2080 50 EM25X80, приводной хвостовик SW 25-32-1.

**Выводы.** Износ режущего инструмента зависит от многих факторов, включающих режимы резания материал режущей части инструмента, природу обрабатываемого материала, свойства смазочно-охлаждающей жидкости. Условия формоустойчивости необходимо учитывать в качестве одного из ограничений при расчёте допускаемой скорости резания. Рассмотрены проблемы при обработке детали, изготовленной из аусте-

нитной нержавеющей стали 08X18H10T. Разработана новая технология механической обработки трубы упорных стаканов, которые служат в качестве направляющих и опорных частей тепловыделяющих сборок (ТВС), позволяющая оптимизировать теплофизический процесс в зоне резания. Предложенная схема резания позволяет устранить значительную часть негативных факторов существующего процесса резания и значительно снизить количество дефектов (прежде всего в виде заусенцев). На основании анализа существующих износостойких покрытий предложено применять титано-карбон-алюминиевое покрытие режущей части фрезы, так как оно в наибольшей степени обеспечивает решение поставленных задач.

В результате проведенной модернизации существующей технологии отмечено снижение износа инструмента, повышение за счет этого скорости резания, производительности обработки, качества изготовления изделия и сокращение расхода фрез. Все это вместе с новым методом охлаждения инструмента позволит увеличить производительность технологического процесса в 1,5 раза и снизить себестоимость обработки 2 раза (в том числе за счет снижения расхода инструмента).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мокрицкий Б.Я. Инструментальные материалы для токарной обработки специализированных нержавеющей сталей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 2(731). С. 3–8.
2. Болдырев И. С. Расчет жесткости и прочности технологической оснастки и режущего инструмента. Челябинск: Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 2022. 50 с.
3. Анцев А.В. Учет влияния износа режущего инструмента на разрушение режущей кромки в обобщенной модели отказов режущего инструмента // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 6. С. 273–279.
4. Патерюхин И. С. Выбор материала и конструкции твердосплавного режущего инструмента для чистовой обработки без вибраций // Научному прогрессу – творчество молодых. 2019. № 2. С. 56–57.
5. Мигранов А.М. Исследование теплофизики резания металлов режущим инструментом с покрытием // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2021. № 5. С. 208–212.
6. Egorov S.A. Influence of steam delivery of the working fluid on tool wear // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38, No. 4. Pp. 285–287.
7. Postnov V.V. Influence of machine-tool dynamics on the tool wear // Russian Engineering Research. 2015. Vol. 35, No. 12. Pp. 936–940.
8. Trung P.H. Analyzing the mechanisms of cutting tool wear during the machining of corrosion-resistant steels // Materials Science Forum. 2019. Vol. 973. Pp. 120–124.
9. Юдин А.Г. Общие способы обработки поверхностей режущими инструментами // Вестник машиностроения. 2022. № 1. С. 78–82. DOI: 10.36652/0042-4633-2022-1-78-82
10. Мигранов М.Ш. Повышение износостойкости режущего инструмента // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. № 4(8). С. 5–12. DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-5-12
11. Jain V., Patel S., Patel P., Patel K., Shah D. Study of molybdenum trioxide thin film deposited using dip coating method // Materials today: Proceedings. 2019 recent trends in environment and sustainable development. RTESD. 2019. Pp. 1700–1703. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.09.209
12. Hongjun Zh. Wear Mechanism of Cemented Carbide Tool and Modeling Tool Wear in Machining Inconel 718 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 780, No. 5. Pp. 052024. DOI: 10.1088/1757-899x/780/5/052024
13. Реченко Д.С., Каменов Р.У., Балова Д.Г. Влияние остроты режущего инструмента на обработку стали 07X16H4Б // Омский научный вестник. 2019. № 6(168). С. 10–14.
14. Рыжкин А.А. Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке: монография. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2019. 289 с.
15. Мышкин Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. Москва: Физматлит, 2007. 368 с.
16. Григорьев С.Н., Волосова М.А., Исаев Е.В. Исследования современных износостойких покрытий на режущем инструменте для фрезерования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2022. Т. 18, № 10(214). С. 465–469.

Информация об авторах

**Косогова Юлия Павловна**, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения и прикладной механики. E-mail: urkosogova@merphi.ru. Волгодонский инженерно-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ. Россия, 347360 г. Волгодонск, ул. Ленина, д. 73/94.

Поступила 28.02.2025 г.



© Косогова Ю.П., 2025

**Kosogova Yu.P.**

Volgodonsk Engineering and Technical Institute - branch of National Research Nuclear University MEPhI

E-mail: ypkosogova@mephi.ru

## IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF MECHANICAL PROCESSING OF PARTS OF WWER INTERCELL

**Abstract.** A significant part of the internal parts of WWER reactors are made of austenitic stainless steels, which have poor cutting machinability, which not only increases the labor intensity of manufacturing and the consumption of expensive metal-cutting tools, but in some cases requires subsequent modification of the parts. Increasing the temperature of the processed material in the cutting zone increases its machinability, and a simultaneous decrease in the temperature of the cutting tool reduces its wear, improves the quality of the machined surface, reduces the number and size of defects (burrs) on the machined surfaces, which are cleaned manually, which reduces the likelihood of them getting into the assembly. It is proposed to increase the machinability of parts of the VVER internal device and the quality of its manufacture by regulating thermophysical processes in the cutting zone.

A new milling scheme has been developed that reduces the amount of heat absorbed by the cutter; a new method of cooling a cutter and a device for its implementation, which significantly reduces the temperature of the tool without cooling the material of the part in the cutting zone.

Preliminary results show that there has been a reduction in the consumption of metal-cutting tools, an increase in labor productivity and the quality of manufacturing of parts supplied for the assembly of reactor internals, and therefore an increase in the operational reliability and safety of the nuclear power plant.

**Keywords:** cutting processing, tool wear, stainless austenitic steels, milling cutter, surface defects (burrs).

### REFERENCES

1. Mokritsky B.Ya. Tool materials for turning specialized stainless steels. [Instrumental'nye materialy dlya tokarnoj obrabotki specializirovannyh nerzhavayushchih stalej]. News of higher educational institutions. Mechanical engineering. 2021. No. 2(731). Pp. 3–8. (rus)
2. Boldyrev I.S. Calculation of rigidity and strength of technological equipment and cutting tools. [Raschet zhestkosti i prochnosti tekhnologicheskoy osnastki i rezhushchego instrumenta]. Chelyabinsk: South Ural State University (National Research University). 2022. 50 p. (rus)
3. Antsev A.V. Taking into account the influence of cutting tool wear on the destruction of the cutting edge in a generalized model of cutting tool failures. [Uchet vliyaniya iznosa rezhushchego instrumenta na razrushenie rezhushchej kromki v obobshchennoj modeli otkazov rezhushchego instrumenta]. News of Tula State University. Technical Sciences. 2019. No. 6. Pp. 273–279. (rus)
4. Pateryukhin I.S. Selection of material and design of carbide cutting tools for finishing machining without vibrations. [Vybor materiala i konstrukcii tverdospлавного rezhushchego instrumenta dlya chistovoj obrabotki bez vibracij]. Scientific progress - creativity of the young. 2019. No. 2. Pp. 56–57. (rus)
5. Migranov A.M. Study of the thermophysics of cutting metals with coated cutting tools. [Issledovanie teplofiziki rezaniya metallov rezhushchim instrumentom s pokrytiem]. Assembly in mechanical engineering, instrument making. 2021. No. 5. Pp. 208–212. (rus)
6. Egorov S.A. Influence of steam delivery of the working fluid on tool wear. Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38, No. 4. Pp. 285–287.
7. Postnov V.V. Influence of machine-tool dynamics on the tool wear. Russian Engineering Research. 2015. Vol. 35, No. 12. Pp. 936–940.
8. Trung P.H. Analyzing the mechanisms of cutting tool wear during the machining of corrosion-resistant steels. Materials Science Forum. 2019. Vol. 973. Pp. 120–124.
9. Yudin A.G. General methods of processing surfaces with cutting tools. [Obshchie sposoby obrabotki poverhnostej rezhushchimi instrumentami]. Bulletin of mechanical engineering. 2022. No. 1. Pp. 78–82. DOI: 10.36652/0042-4633-2022-1-78-82 (rus)
10. Migranov M.Sh. Increasing the wear resistance of cutting tools. [Povyshenie iznosostojkosti rezhushchego instrumenta]. Bulletin of the Tver State Technical University. Series: Technical Sciences. 2020. No. 4(8). Pp. 5–12. DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-5-12 (rus)
11. Jain V., Patel S., Patel P., Patel K., Shah D. Study of molybdenum trioxide thin film deposited using dip coating method. Materials today: Proceedings. 2019 recent trends in environment and sustainable development. RTESD. 2019. Pp. 1700–1703. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.09.209
12. Hongjun Zh. Wear Mechanism of Cemented Carbide Tool and Modeling Tool Wear in Machining

Inconel 718. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 780, No. 5. Pp. 052024. DOI: 10.1088/1757-899x/780/5/052024

13. Rechenko D.S., Kamenov R.U., Balova D.G. The influence of the sharpness of the cutting tool on the processing of steel 07X16H4Б. [Vliyanie ostroty rezhushchego instrumenta na obrabotku stali 07H16N4B]. Omsk Scientific Bulletin. 2019. No. 6(168). Pp. 1–14. (rus)

14. Ryzhkin A.A. Synergetics of wear of tool materials during blade processing: a monograph. [Sinergetika iznashivaniya instrumental'nykh materialov pri lezviynoj obrabotke: monografiya]. Rostov-

on-Don: Don State Technical University. 2019. 289 p. (rus)

15. Myshkin N.K. Friction, lubrication, wear. Physical foundations and technical applications of tribology. [Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tekhnicheskie prilozheniya tribologii]. Moscow: Fizmatlit. 2007. 368 p. (rus)

16. Grigoriev S.N., Volosova M.A., Isaev E.V. Research of modern wear-resistant coatings on cutting tools for milling. [Issledovaniya sovremennykh iznosoustojchivyykh pokrytij na rezhushchem instrumente dlya frezerovaniya]. Hardening technologies and coatings. 2022. Vol. 18, No. 10(214). Pp. 465–469. (rus)

#### *Information about the authors*

**Kosogova, Yulia P.** PhD. Assistant professor. E-mail: ypkosogova@mephi.ru. Volgodonsk Engineering Technical Institute, the Branch of the National Research Nuclear University “MEPhI”, Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360.

---

*Received 28.02.2025*

#### **Для цитирования:**

Косогова Ю.П. Влияние схемы резания и материала покрытия фрезы на повышение производительности технологического процесса механической обработки деталей внутрикорпусного устройства ВВЭР // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 9. С. 81–88. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-81-88

#### **For citation:**

Kosogova Yu.P. Improvement of the technological process of mechanical processing of parts of wwer inter-cell. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 9. Pp. 81–88. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-81-88

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-89-103

*\*Шбани А., Алван Х.М.**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**\*E-mail: ali.shbani951@gmail.com*

## РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ШЕСТЬЮ КОЛЕСАМИ ИЛОНА

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию мобильного робота с шестью колёсами Илона. Среди всех наземных транспортных средств робот с колёсами Илона обладает наибольшими маневренными возможностями и эффективно функционирует в условиях складских помещений, где требуется точное управление и высокая мобильность. Именно этот тип робота был выбран в качестве объекта исследования, поскольку он сочетает в себе универсальность и простоту реализации.

Целью работы является создание динамической модели мобильного робота с шестью колёсами Илона, обеспечивающей возможность анализа и управления его движением. Для достижения данной цели были решены следующие задачи: проведён критический анализ существующих научных и технических источников, разработана динамическая модель робота, а также выполнено её компьютерное моделирование. Динамические уравнения были выведены с использованием уравнений Лагранжа второго рода, что позволило учесть все основные параметры движения.

Мобильный робот рассматривается как планарный механизм, способный осуществлять линейное и угловое движение в горизонтальной плоскости. Предполагается, что движение происходит при условии чистого качения колёс без проскальзывания. Проверка динамической модели проводилась методом моделирования движения по двум траекториям: прямолинейной и криволинейной. Результаты моделирования продемонстрировали высокую точность предлагаемой модели, что подтверждается малыми значениями ошибки скорости.

**Ключевые слова:** Динамическое моделирование роботов, Мобильный робот, Колесо Илона, Навигация мобильных систем, Анализ движений роботов.

**Введение.** В последние годы автономные мобильные роботы значительно усовершенствовались, и особое внимание уделяется автоматизированным управляемым транспортным средствам (АУТС) [1–5]. Одной из главных проблем, с которыми сталкиваются такие системы, является улучшение маневренности. Одним из эффективных решений этой проблемы является использование колес Илона – конструктивного элемента, представляющего собой ступицу с роликами, расположенными под углом на окружности [6, 7].

Колеса Илона значительно расширяют возможности движения мобильных роботов, позволяя выполнять сложные траектории и адаптироваться к различным условиям окружающей среды [8–12]. Кинематические и динамические модели роботов с такими колесами подробно исследовались в работах, где анализировалось влияние параметров робота на его поведение [6, 8, 9]. Применение этих колес позволяет реализовать высокоточные алгоритмы управления движением, включая избегание препятствий в динамической среде [10] и эффективное передвижение по сложным поверхностям, таким как лестницы и пересеченная местность [12].

Несмотря на обширное количество публикаций, посвященных мобильным роботам с тремя или четырьмя колесами Илона, работы, исследующие модели с шестью колесами, остаются

крайне редкими [13–16]. Этот аспект открывает перспективы для разработки новых моделей и анализа их поведения в различных условиях.

В большинстве исследований применяются платформы прямоугольной формы, которые обеспечивают равномерное распределение нагрузки и обладают преимуществами в плане грузоподъемности. Однако в некоторых сценариях, таких как сложные маневры или управление на высоких скоростях, круглая платформа может демонстрировать лучшие характеристики. Одним из ключевых преимуществ круглой платформы является её способность обеспечивать более стабильное распределение центробежных сил при выполнении резких поворотов. В прямоугольных конструкциях возможны неравномерные нагрузки на отдельные колёса во время маневров, что может привести к увеличенному износу или ухудшению динамических характеристик. В случае круглой платформы распределение нагрузки остаётся более симметричным, что способствует улучшенной устойчивости при вращении. Кроме того, круглая форма платформы может упростить алгоритмы навигации и управления, особенно в условиях, когда требуется равномерное поведение робота при смене направления. Такая конструкция снижает влияние ориентации корпуса на траекторию движения, что может быть полезным в задачах, требующих высокой точности позиционирования.

Целью данной работы является создание динамической модели мобильного робота с шестью колесами Илона. Кроме того, работа направлена на проверку модели через моделирование движения по прямолинейной и криволинейной траекториям.

Остальная часть исследования включает вывод уравнений динамической модели, моделирование управления движением, а также обсуждение полученных результатов.

**Методы, оборудование, материалы.** Исследование выполнено с использованием методов теоретической механики и численного моделирования. Для разработки динамической модели мобильного робота применялись уравнения Лагранжа второго рода, что позволило учесть основные параметры движения и взаимодействия робота с окружающей средой.

Моделирование проводилось в программной среде MATLAB с использованием инструмента Simulink и специализированного набора библиотек Robotics Toolbox. Эти инструменты обеспечили возможность анализа движения робота по различным траекториям, включая прямолинейные и криволинейные маршруты.

В процессе разработки модели движение робота рассматривалось на основе предположения о чистом качении колёс без проскальзывания, что упрощает выведение уравнений системы. Особое внимание было уделено точности формулировки кинетической энергии системы и выведению уравнений движения, описывающих поведение робота в горизонтальной плоскости.

**Описание динамики робота.** Графическое изображение рассматриваемого робота представлено на рис. 1.

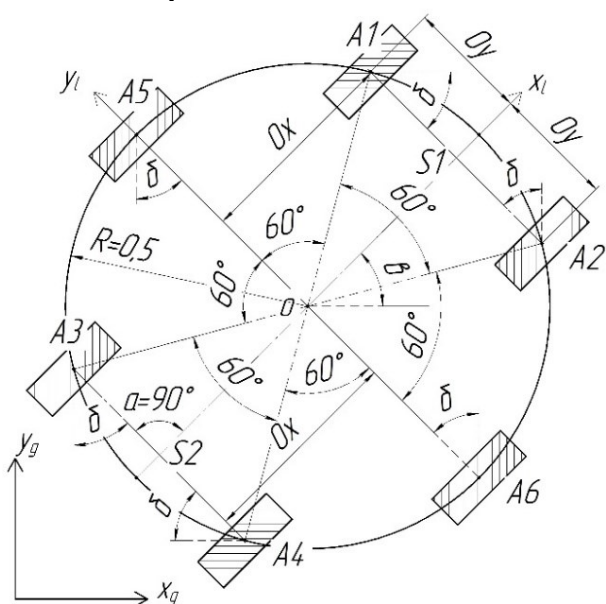


Рис. 1. Аналитическая модель мобильного робота с колесами Илона [15]

В данной работе использованы уравнения Лагранжа второго рода. Для их формулировки предполагается следующий вектор обобщенных координат

$$q = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \\ \varphi_5 \\ \varphi_6 \end{bmatrix} \quad (1)$$

В свою очередь, кинематические уравнения робота выводятся с учетом отсутствия скольжения между землей и колесами Илона.

Для получения динамических уравнений движения характеристической точки робота был использован уравнение Лагранжа. Уравнение Лагранжа второго рода можно записать в следующей матричной форме:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q \quad (2)$$

где  $L = L(q, \dot{q})$  – кинетический потенциал системы;  $q = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6]^T$  – вектор обобщенных координат;  $Q = [Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6]^T$  – вектор обобщенных сил.

Кинетический потенциал  $L$  системы удовлетворяет следующему соотношению:

$$L = E - U \quad (3)$$

где  $E$  – полная кинетическая энергия системы,  $U$  – потенциальная энергия системы.

Предполагается, что робот движется по плоской поверхности, поэтому уравнение (3) упрощается до следующего вида:

$$L = E \quad (4)$$

Затем была определена полная кинетическая энергия системы в предположении, что ролики являются пассивными элементами в анализируемой системе. Следовательно, полная кинетическая энергия системы  $E$  составляет:

$$E = E_p + E_w \quad (5)$$

где  $E_p$  – кинетическая энергия платформы,  $E_w$  – кинетическая энергия колес Илона.

Платформа робота движется в плоскости, поэтому кинетическая энергия платформы  $E_p$  может быть записана в следующем виде:

$$E_p = \frac{1}{2} m_p (v_x^2 + v_y^2) + \frac{1}{2} I_p \dot{\beta}^2 \quad (6)$$

где  $m_p$  – масса платформы,  $I_p$  – массовый момент инерции платформы робота, определенный относительно оси  $z_L$ , проходящей через точку  $O$ .

колеса Илона перемещаются в сложном движении, состоящем из плоского подъемного дви-

жения платформы робота и вращательного движения колес, определяемого вокруг оси соб-

ственного вращения колеса Илона. Следовательно, кинетическая энергия колес  $E_w$  удовлетворяет следующему соотношению:

$$E_w = 6 \left[ \frac{1}{2} m_w (v_x^2 + v_y^2) + \frac{1}{2} I_{wzL} \dot{\beta}^2 \right] + \frac{1}{2} I_w (\dot{\phi}_1^2 + \dot{\phi}_2^2 + \dot{\phi}_3^2 + \dot{\phi}_4^2 + \dot{\phi}_5^2 + \dot{\phi}_6^2) \quad (7)$$

где  $m_w$  – масса колеса Илона,  $I_w$  – массовый момент инерции колеса Илона, определяемый относительно оси, собственное вращение колеса,  $I_{wzL}$

– массовый момент инерции колеса Илона, определяемый относительно оси  $z_L$ , проходящей через точку о.

Кинетический потенциал системы можно записать в следующем виде:

$$L = \left( \frac{1}{2} m_p + 3m_w \right) (v_x^2 + v_y^2) + \left( \frac{1}{2} I_p + 3I_{wzL} \right) \dot{\beta}^2 + \frac{1}{2} I_w (\dot{\phi}_1^2 + \dot{\phi}_2^2 + \dot{\phi}_3^2 + \dot{\phi}_4^2 + \dot{\phi}_5^2 + \dot{\phi}_6^2) \quad (8)$$

Будет предполагаться, что:

$$m_{pc} = (m_p + 6m_w) \quad (9)$$

$$I_{pc} = (I_p + 6I_{wzL}) \quad (10)$$

Подставляя уравнения (9) и (10) в уравнение (8), получаем:

$$L = \frac{1}{2} m_{pc} (v_x^2 + v_y^2) + \frac{1}{2} I_{pc} \dot{\beta}^2 + \frac{1}{2} I_w (\dot{\phi}_1^2 + \dot{\phi}_2^2 + \dot{\phi}_3^2 + \dot{\phi}_4^2 + \dot{\phi}_5^2 + \dot{\phi}_6^2) \quad (11)$$

Подставляя уравнения кинематической модели [15] в уравнение (11), получаем:

$$L = \left( \begin{aligned} & \frac{1}{2} m_{pc} \left[ \left( r \left( \frac{\phi_1}{4} + \frac{\phi_2}{8} + \frac{\phi_3}{8} + \frac{\phi_4}{4} + \frac{\phi_5}{8} + \frac{\phi_6}{8} \right) \right)^2 + \right. \\ & \left. + \left( r \left( -\frac{\phi_1}{4} + \frac{\phi_2}{8} + \frac{\phi_3}{8} - \frac{\phi_4}{4} + \frac{\phi_5}{8} + \frac{\phi_6}{8} \right) \right)^2 \right] + \\ & + \frac{1}{2} I_{pc} \left[ \frac{r}{4R(\sqrt{3}+3)} \left( -(\sqrt{3}+1)\dot{\phi}_1 + (\sqrt{3}+1)\dot{\phi}_2 + \right. \right. \\ & \left. \left. -(\sqrt{3}+1)\dot{\phi}_3 + (\sqrt{3}+1)\dot{\phi}_4 - 2\dot{\phi}_5 + 2\dot{\phi}_6 \right) \right]^2 + \\ & \left. + \frac{1}{2} I_w (\dot{\phi}_1^2 + \dot{\phi}_2^2 + \dot{\phi}_3^2 + \dot{\phi}_4^2 + \dot{\phi}_5^2 + \dot{\phi}_6^2) \right] \end{aligned} \right) \quad (12)$$

Будем считать, что:

$$A = \frac{m_{pc} r^2}{128} \quad (13)$$

$$B = \frac{I_{pc} r^2}{32R^2(3+6\sqrt{3}+9)} = \frac{I_{pc} r^2}{32R^2(12+6\sqrt{3})} = \frac{I_{pc} r^2}{192R^2(2+\sqrt{3})} \quad (14)$$

$$C = \frac{I_w}{2} \quad (15)$$

Подставляя уравнения (13), (14) и (15) в уравнение (12), получаем:

$$L = \left( \begin{aligned} & A[(2\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3 + 2\dot{\phi}_4 + \dot{\phi}_5 + \dot{\phi}_6)^2 + (-2\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3 - 2\dot{\phi}_4 + \dot{\phi}_5 + \dot{\phi}_6)^2] + \\ & + B[-(\sqrt{3}+1)\dot{\phi}_1 + (\sqrt{3}+1)\dot{\phi}_2 - (\sqrt{3}+1)\dot{\phi}_3 + (\sqrt{3}+1)\dot{\phi}_4 - 2\dot{\phi}_5 + 2\dot{\phi}_6]^2 + \\ & + C(\dot{\phi}_1^2 + \dot{\phi}_2^2 + \dot{\phi}_3^2 + \dot{\phi}_4^2 + \dot{\phi}_5^2 + \dot{\phi}_6^2) \end{aligned} \right) \quad (16)$$

$$\Rightarrow L = \left( \begin{aligned} & (8A + (4 + 2\sqrt{3})B + C)\dot{\phi}_1^2 + (2A + (4 + 2\sqrt{3})B + C)\dot{\phi}_2^2 + \\ & + (2A + (4 + 2\sqrt{3})B + C)\dot{\phi}_3^2 + (8A + (4 + 2\sqrt{3})B + C)\dot{\phi}_4^2 + (2A + 4B + C)\dot{\phi}_5^2 + \\ & + (2A + 4B + C)\dot{\phi}_6^2 - 2(4 + 2\sqrt{3})B\dot{\phi}_1\dot{\phi}_2 + 2(4 + 2\sqrt{3})B\dot{\phi}_1\dot{\phi}_3 + \\ & + (16A - 2(4 + 2\sqrt{3})B)\dot{\phi}_1\dot{\phi}_4 + 4(\sqrt{3}+1)B\dot{\phi}_1\dot{\phi}_5 - 4(\sqrt{3}+1)B\dot{\phi}_1\dot{\phi}_6 + \\ & + (4A - 2(4 + 2\sqrt{3})B)\dot{\phi}_2\dot{\phi}_3 + 2(4 + 2\sqrt{3})B\dot{\phi}_2\dot{\phi}_4 + (4A - 4(\sqrt{3}+1)B)\dot{\phi}_2\dot{\phi}_5 + \\ & + (4A + 4(\sqrt{3}+1)B)\dot{\phi}_2\dot{\phi}_6 - 2(4 + 2\sqrt{3})B\dot{\phi}_3\dot{\phi}_4 + (4A + 4(\sqrt{3}+1)B)\dot{\phi}_3\dot{\phi}_5 + \\ & + (4A - 4(\sqrt{3}+1)B)\dot{\phi}_3\dot{\phi}_6 - 4(\sqrt{3}+1)B\dot{\phi}_4\dot{\phi}_5 + 4(\sqrt{3}+1)B\dot{\phi}_4\dot{\phi}_6 + (4A - 8B)\dot{\phi}_5\dot{\phi}_6 \end{aligned} \right) \quad (17)$$



Чтобы установить конкретные обобщенные силы, действующие на отдельные колеса, силы и

моменты сил, действующие на каждое колесо, графически показаны на рисунке 2а и 2б.

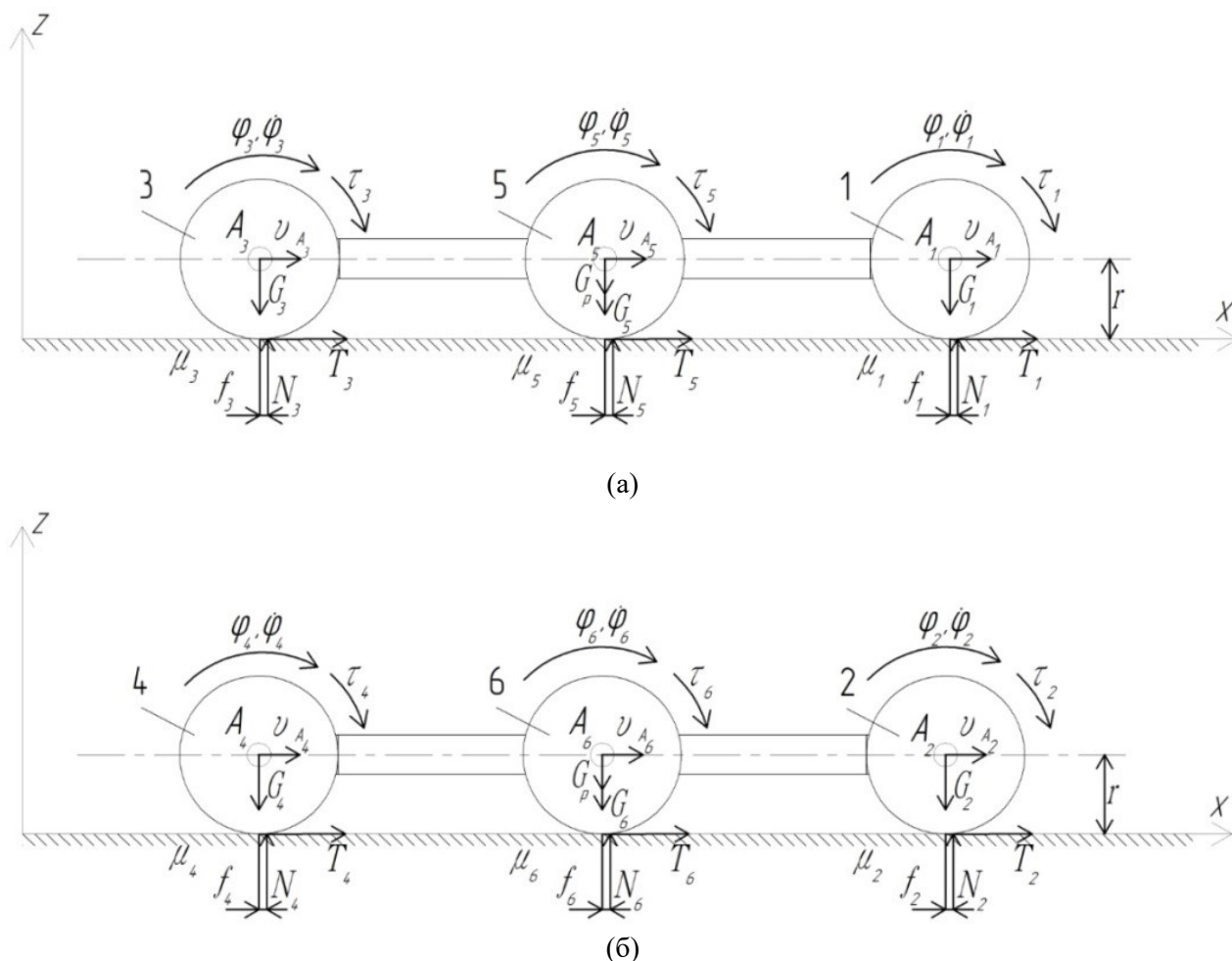


Рис. 2. (а) Силы и моменты сил, действующих на колеса № 1, 3, 5,  
(б) Силы и моменты сил, действующих на колеса № 2, 4, 6

$i$ -е колесо Илона приводится в движение за счет тягового момента  $\tau_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ), исходящего от  $i$ -й системы передачи энергии. Кроме того, предполагалось, что вес платформы колесного мобильного робота равен  $G_p$ , тогда как вес  $i$ -го колеса Илона равен  $G_i$ , и оно движется по

плоской, шероховатой (коэффициент сухого трения  $\mu_i$ ) и деформируемой (коэффициент трения качения  $f_i$ ) поверхности без заноса. При анализе также учитывается сила сухого трения  $T_i$  и сила давления  $N_i$  для  $i$ -го колеса.

Работа системы сил составляет:

$$D = Q_i q_i, (i = 1, 2, \dots, 6) = \left( [\tau_1 - T_1 r] \varphi_1 + [\tau_2 - T_2 r] \varphi_2 + [\tau_3 - T_3 r] \varphi_3 + \right. \\ \left. + [\tau_4 - T_4 r] \varphi_4 + [\tau_5 - T_5 r] \varphi_5 + [\tau_6 - T_6 r] \varphi_6 \right) \quad (18)$$

Величину сухого трения  $T_i$  можно вывести из рисунка 3, который показывает соотношение сил, действующих на колесо:

$$T = RF \sin \theta \quad (19)$$

где  $RF$  – сила реакции. Поскольку  $\theta$  – малый угол, можно найти следующее:

$$T = RF \sin \theta \approx RF \tan \theta \approx RF \theta \quad (20)$$

Теперь, умножив и разделив  $r_1$  на  $r_1$ :

$$T = \frac{RF \theta r_1}{r_1} \quad \text{но} \quad f = r_1 \theta \Rightarrow T = \frac{RF f}{r_1} \Rightarrow T r_1 = RF f \quad (21)$$

Возвращаясь к рисунку 4, можно найти:

$$RF^2 = G^2 + T^2 = (-N)^2 + T^2 = N^2 + T^2 \Rightarrow RF = \sqrt{N^2 + T^2} \quad (22)$$

Подставляя уравнение (22) в уравнение (21):

$$Tr_1 = (\sqrt{N^2 + T^2})f \Rightarrow T^2 r_1^2 = (N^2 + T^2)f^2 \Rightarrow T^2(r_1^2 - f^2) = N^2 f^2 \Rightarrow T = \frac{Nf}{\sqrt{r_1^2 - f^2}} = \frac{Nf}{r} \quad (23)$$

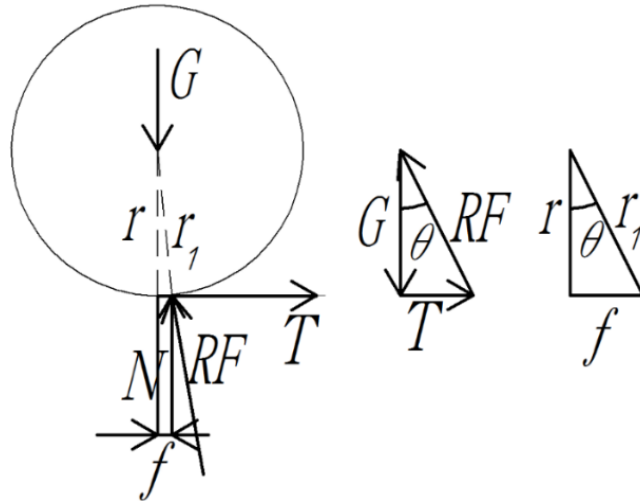


Рис. 3. Силы, действующие на колесо

Уравнение (23) компенсируется уравнением (18):

$$D = \left( \left[ \tau_1 - \frac{N_1 f_1}{r} r \right] \varphi_1 + \left[ \tau_2 - \frac{N_2 f_2}{r} r \right] \varphi_2 + \left[ \tau_3 - \frac{N_3 f_3}{r} r \right] \varphi_3 + \right. \\ \left. + \left[ \tau_4 - \frac{N_4 f_4}{r} r \right] \varphi_4 + \left[ \tau_5 - \frac{N_5 f_5}{r} r \right] \varphi_5 + \left[ \tau_6 - \frac{N_6 f_6}{r} r \right] \varphi_6 \right) \\ \Rightarrow D = \left( [\tau_1 - N_1 f_1] \varphi_1 + [\tau_2 - N_2 f_2] \varphi_2 + [\tau_3 - N_3 f_3] \varphi_3 + \right. \\ \left. + [\tau_4 - N_4 f_4] \varphi_4 + [\tau_5 - N_5 f_5] \varphi_5 + [\tau_6 - N_6 f_6] \varphi_6 \right) \quad (24)$$

Таким образом, мощность обобщенных сил составляет:

$$P = Q_i \dot{q}_i, (i = 1, 2, \dots, 6) = \left( [\tau_1 - N_1 f_1] \dot{\varphi}_1 + [\tau_2 - N_2 f_2] \dot{\varphi}_2 + [\tau_3 - N_3 f_3] \dot{\varphi}_3 + \right. \\ \left. + [\tau_4 - N_4 f_4] \dot{\varphi}_4 + [\tau_5 - N_5 f_5] \dot{\varphi}_5 + [\tau_6 - N_6 f_6] \dot{\varphi}_6 \right) \quad (25)$$

Но при расчете величины сухого трения необходимо учитывать направление угловой скорости (знак угловой скорости), поэтому уравнение (25) принимает следующий вид:

$$P = Q_i \dot{q}_i, (i = 1, 2, \dots, 6) = \left( [\tau_1 - N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_1)] \dot{\varphi}_1 + [\tau_2 - N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_2)] \dot{\varphi}_2 + \right. \\ \left. + [\tau_3 - N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_3)] \dot{\varphi}_3 + [\tau_4 - N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_4)] \dot{\varphi}_4 + \right. \\ \left. + [\tau_5 - N_5 f_5 \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_5)] \dot{\varphi}_5 + [\tau_6 - N_6 f_6 \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_6)] \dot{\varphi}_6 \right) \quad (26)$$

Уравнение (26) показывает, что вектор обобщенных сил можно записать в следующем виде:

$$Q = [Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6]^T = \left[ \tau_1 - N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_1), \tau_2 - N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_2), \tau_3 - N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_3), \right. \\ \left. \tau_4 - N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_4), \tau_5 - N_5 f_5 \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_5), \tau_6 - N_6 f_6 \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_6) \right]^T \quad (27)$$

Наконец, используя уравнения Лагранжа второго рода, получаются следующие системные уравнения:

$$\left( 2(8A + (4 + 2\sqrt{3})B + C)\ddot{\varphi}_1 - 2(4 + 2\sqrt{3})B\ddot{\varphi}_2 + 2(4 + 2\sqrt{3})B\ddot{\varphi}_3 + \right. \\ \left. + (16A - 2(4 + 2\sqrt{3})B)\ddot{\varphi}_4 + 4(\sqrt{3} + 1)B\ddot{\varphi}_5 - 4(\sqrt{3} + 1)B\ddot{\varphi}_6 \right) = \tau_1 - N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_1) \quad (28)$$

$$\left( 2(2A + (4 + 2\sqrt{3})B + C)\ddot{\varphi}_2 - 2(4 + 2\sqrt{3})B\ddot{\varphi}_1 + \right. \\ \left. + (4A - 2(4 + 2\sqrt{3})B)\ddot{\varphi}_3 + 2(4 + 2\sqrt{3})B\ddot{\varphi}_4 + \right. \\ \left. + (4A - 4(\sqrt{3} + 1)B)\ddot{\varphi}_5 + (4A + 4(\sqrt{3} + 1)B)\ddot{\varphi}_6 \right) = \tau_2 - N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_2) \quad (29)$$

$$\left( 2(2A + (4 + 2\sqrt{3})B + C)\ddot{\varphi}_3 + 2(4 + 2\sqrt{3})B\ddot{\varphi}_1 + \right. \\ \left. + (4A - 2(4 + 2\sqrt{3})B)\ddot{\varphi}_2 - 2(4 + 2\sqrt{3})B\ddot{\varphi}_4 + \right. \\ \left. + (4A + 4(\sqrt{3} + 1)B)\ddot{\varphi}_5 + (4A - 4(\sqrt{3} + 1)B)\ddot{\varphi}_6 \right) = \tau_3 - N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}_3) \quad (30)$$

$$\begin{pmatrix} 2(8A + (4 + 2\sqrt{3})B + C)\ddot{\phi}_4 + (16A - 2(4 + 2\sqrt{3})B)\ddot{\phi}_1 + \\ + 2(4 + 2\sqrt{3})B\ddot{\phi}_2 - 2(4 + 2\sqrt{3})B\ddot{\phi}_3 + \\ - 4(\sqrt{3} + 1)B\ddot{\phi}_5 + 4(\sqrt{3} + 1)B\ddot{\phi}_6 \end{pmatrix} = \tau_4 - N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_4) \quad (31)$$

$$\begin{pmatrix} 2(2A + 4B + C)\ddot{\phi}_5 + 4(\sqrt{3} + 1)B\ddot{\phi}_1 + (4A - 4(\sqrt{3} + 1)B)\ddot{\phi}_2 + \\ + (4A + 4(\sqrt{3} + 1)B)\ddot{\phi}_3 - 4(\sqrt{3} + 1)B\ddot{\phi}_4 + (4A - 8B)\ddot{\phi}_6 \end{pmatrix} = \tau_5 - N_5 f_5 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_5) \quad (32)$$

$$\begin{pmatrix} 2(2A + 4B + C)\ddot{\phi}_6 - 4(\sqrt{3} + 1)B\ddot{\phi}_1 + (4A + 4(\sqrt{3} + 1)B)\ddot{\phi}_2 + \\ + (4A - 4(\sqrt{3} + 1)B)\ddot{\phi}_3 + 4(\sqrt{3} + 1)B\ddot{\phi}_4 + (4A - 8B)\ddot{\phi}_5 \end{pmatrix} = \tau_6 - N_6 f_6 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_6) \quad (33)$$

Итак, мы можем написать:

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ Q_6 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_1 \\ \ddot{\phi}_2 \\ \ddot{\phi}_3 \\ \ddot{\phi}_4 \\ \ddot{\phi}_5 \\ \ddot{\phi}_6 \end{bmatrix} \quad (34)$$

Учитывая, что  $v_x, v_y$  — центральные скорости робота в локальных координатах, их можно

выразить в обобщенных координатах следующим образом:

$$v_x = \dot{x}_g \cos \beta + \dot{y}_g \sin \beta \quad (35)$$

$$v_y = -\dot{x}_g \sin \beta + \dot{y}_g \cos \beta \quad (36)$$

Здесь уравнения (35) и (36) должны быть выведены по времени, а затем приравнены к прямой кинематической модели после ее вывода по времени. Таким образом, мы получаем:

$$\dot{x}_g \cos \beta - \dot{x}_g \dot{\beta} \sin \beta + \dot{y}_g \sin \beta + \dot{y}_g \dot{\beta} \cos \beta = r \left( \frac{\dot{\phi}_1}{4} + \frac{\dot{\phi}_2}{8} + \frac{\dot{\phi}_3}{8} + \frac{\dot{\phi}_4}{4} + \frac{\dot{\phi}_5}{8} + \frac{\dot{\phi}_6}{8} \right) \quad (37)$$

$$-\dot{x}_g \sin \beta - \dot{x}_g \dot{\beta} \cos \beta + \dot{y}_g \cos \beta - \dot{y}_g \dot{\beta} \sin \beta = r \left( -\frac{\dot{\phi}_1}{4} + \frac{\dot{\phi}_2}{8} + \frac{\dot{\phi}_3}{8} - \frac{\dot{\phi}_4}{4} + \frac{\dot{\phi}_5}{8} + \frac{\dot{\phi}_6}{8} \right) \quad (38)$$

$$\dot{\beta} = \frac{r}{4R(\sqrt{3}+3)} \left( -(\sqrt{3}+1)\ddot{\phi}_1 + (\sqrt{3}+1)\ddot{\phi}_2 - (\sqrt{3}+1)\ddot{\phi}_3 + \right. \\ \left. + (\sqrt{3}+1)\ddot{\phi}_4 - 2\ddot{\phi}_5 + 2\ddot{\phi}_6 \right) \quad (39)$$

Здесь мы должны найти уравнения для  $\ddot{\phi}_1, \ddot{\phi}_2, \ddot{\phi}_3, \ddot{\phi}_4, \ddot{\phi}_5, \ddot{\phi}_6$  из уравнения (34), затем подставить полученные уравнения в уравнения

(37), (38), (39), чтобы найти требуемую динамическую модель.

Из уравнения (34) получаем:

$$\ddot{\phi}_1 = \left( \begin{aligned} & \frac{(6\sqrt{3}+20)BC^2 + (32\sqrt{3}+128)ABC + C^3 + 8AC^2}{2((8\sqrt{3}+24)BC^3 + (128\sqrt{3}+384)ABC^2 + C^4 + 16AC^3)} (\tau_1 - N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_1)) + \\ & + \frac{(2+\sqrt{3})BC}{(8\sqrt{3}+24)BC^2 + C^3} (\tau_2 - N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_2)) - \frac{(2+\sqrt{3})BC}{(8\sqrt{3}+24)BC^2 + C^3} (\tau_3 - N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_3)) + \\ & + \frac{(2+\sqrt{3})BC^2 - (16\sqrt{3}+64)ABC - 4AC^2}{(8\sqrt{3}+24)BC^3 + (128\sqrt{3}+384)ABC^2 + C^4 + 16AC^3} (\tau_4 - N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_4)) + \\ & + \frac{-(1+\sqrt{3})B}{(8\sqrt{3}+24)BC + C^2} (\tau_5 - N_5 f_5 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_5)) + \frac{(1+\sqrt{3})B}{(8\sqrt{3}+24)BC + C^2} (\tau_6 - N_6 f_6 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_6)) \end{aligned} \right) \quad (40)$$

$$\ddot{\phi}_2 = \left( \begin{aligned} & \frac{(2+\sqrt{3})BC}{(8\sqrt{3}+24)BC^2 + C^3} (\tau_1 - N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_1)) + \\ & + \frac{(6\sqrt{3}+20)BC^2 + (32\sqrt{3}+112)ABC + C^3 + 6AC^2}{2((8\sqrt{3}+24)BC^3 + (64\sqrt{3}+192)ABC^2 + C^4 + 8AC^3)} (\tau_2 - N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_2)) + \\ & + \frac{(2+\sqrt{3})BC - 8AB - AC}{(8\sqrt{3}+24)BC^2 + (64\sqrt{3}+192)ABC + C^3 + 8AC^2} (\tau_3 - N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_3)) + \\ & + \frac{-(2+\sqrt{3})BC}{(8\sqrt{3}+24)BC^2 + C^3} (\tau_4 - N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_4)) + \\ & + \frac{(1+\sqrt{3})BC^2 - 16ABC - AC^2}{(8\sqrt{3}+24)BC^3 + (64\sqrt{3}+192)ABC^2 + C^4 + 8AC^3} (\tau_5 - N_5 f_5 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_5)) + \\ & + \frac{-(1+\sqrt{3})BC^2 - (16\sqrt{3}+32)ABC - AC^2}{(8\sqrt{3}+24)BC^3 + (64\sqrt{3}+192)ABC^2 + C^4 + 8AC^3} (\tau_6 - N_6 f_6 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_6)) \end{aligned} \right) \quad (41)$$

$$\ddot{\phi}_3 = \left( \begin{aligned} & \frac{-(2+\sqrt{3})BC}{(8\sqrt{3}+24)BC^2+C^3} (\tau_1 - N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_1)) + \\ & + \frac{(2+\sqrt{3})BC-8AB-AC}{(8\sqrt{3}+24)BC^2+(64\sqrt{3}+192)ABC+C^3+8AC^2} (\tau_2 - N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_2)) + \\ & + \frac{(6\sqrt{3}+20)BC^2+(32\sqrt{3}+112)ABC+C^3+6AC^2}{2((8\sqrt{3}+24)BC^3+(64\sqrt{3}+192)ABC^2+C^4+8AC^3)} (\tau_3 - N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_3)) + \\ & + \frac{(2+\sqrt{3})BC}{(8\sqrt{3}+24)BC^2+C^3} (\tau_4 - N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_4)) + \\ & + \frac{-(1+\sqrt{3})BC^2-(16\sqrt{3}+32)ABC-AC^2}{(8\sqrt{3}+24)BC^3+(64\sqrt{3}+192)ABC^2+C^4+8AC^3} (\tau_5 - N_5 f_5 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_5)) + \\ & + \frac{(1+\sqrt{3})BC^2-16ABC-AC^2}{(8\sqrt{3}+24)BC^3+(64\sqrt{3}+192)ABC^2+C^4+8AC^3} (\tau_6 - N_6 f_6 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_6)) \end{aligned} \right) \quad (42)$$

$$\ddot{\phi}_4 = \left( \begin{aligned} & \frac{(2+\sqrt{3})BC^2-(16\sqrt{3}+64)ABC-4AC^2}{(8\sqrt{3}+24)BC^3+(128\sqrt{3}+384)ABC^2+C^4+16AC^3} (\tau_1 - N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_1)) + \\ & + \frac{-(2+\sqrt{3})BC}{(8\sqrt{3}+24)BC^2+C^3} (\tau_2 - N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_2)) + \frac{(2+\sqrt{3})BC}{(8\sqrt{3}+24)BC^2+C^3} (\tau_3 - N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_3)) + \\ & + \frac{(6\sqrt{3}+20)BC^2+(32\sqrt{3}+128)ABC+C^3+8AC^2}{2((8\sqrt{3}+24)BC^3+(128\sqrt{3}+384)ABC^2+C^4+16AC^3)} (\tau_4 - N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_4)) + \\ & + \frac{(1+\sqrt{3})B}{(8\sqrt{3}+24)BC+C^2} (\tau_5 - N_5 f_5 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_5)) + \frac{-(1+\sqrt{3})B}{(8\sqrt{3}+24)BC+C^2} (\tau_6 - N_6 f_6 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_6)) \end{aligned} \right) \quad (43)$$

$$\ddot{\phi}_5 = \left( \begin{aligned} & \frac{-(1+\sqrt{3})B}{(8\sqrt{3}+24)BC+C^2} (\tau_1 - N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_1)) + \\ & + \frac{(1+\sqrt{3})BC^2-16ABC-AC^2}{(8\sqrt{3}+24)BC^3+(64\sqrt{3}+192)ABC^2+C^4+8AC^3} (\tau_2 - N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_2)) + \\ & + \frac{-(1+\sqrt{3})BC^2-(16\sqrt{3}+32)ABC-AC^2}{(8\sqrt{3}+24)BC^3+(64\sqrt{3}+192)ABC^2+C^4+8AC^3} (\tau_3 - N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_3)) + \\ & + \frac{(1+\sqrt{3})B}{(8\sqrt{3}+24)BC+C^2} (\tau_4 - N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_4)) + \\ & + \frac{(8\sqrt{3}+20)BC^2+(48\sqrt{3}+112)ABC+C^3+6AC^2}{2((8\sqrt{3}+24)BC^3+(64\sqrt{3}+192)ABC^2+C^4+8AC^3)} (\tau_5 - N_5 f_5 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_5)) + \\ & + \frac{2BC^2-(8\sqrt{3}+8)ABC-AC^2}{(8\sqrt{3}+24)BC^3+(64\sqrt{3}+192)ABC^2+C^4+8AC^3} (\tau_6 - N_6 f_6 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_6)) \end{aligned} \right) \quad (44)$$

$$\ddot{\phi}_6 = \left( \begin{aligned} & \frac{(1+\sqrt{3})B}{(8\sqrt{3}+24)BC+C^2} (\tau_1 - N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_1)) + \\ & + \frac{-(1+\sqrt{3})BC^2-(16\sqrt{3}+32)ABC-AC^2}{(8\sqrt{3}+24)BC^3+(64\sqrt{3}+192)ABC^2+C^4+8AC^3} (\tau_2 - N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_2)) + \\ & + \frac{(1+\sqrt{3})BC^2-16ABC-AC^2}{(8\sqrt{3}+24)BC^3+(64\sqrt{3}+192)ABC^2+C^4+8AC^3} (\tau_3 - N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_3)) + \\ & + \frac{-(1+\sqrt{3})B}{(8\sqrt{3}+24)BC+C^2} (\tau_4 - N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_4)) + \\ & + \frac{2BC^2-(8\sqrt{3}+8)ABC-AC^2}{(8\sqrt{3}+24)BC^3+(64\sqrt{3}+192)ABC^2+C^4+8AC^3} (\tau_5 - N_5 f_5 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_5)) + \\ & + \frac{(8\sqrt{3}+20)BC^2+(48\sqrt{3}+112)ABC+C^3+6AC^2}{2((8\sqrt{3}+24)BC^3+(64\sqrt{3}+192)ABC^2+C^4+8AC^3)} (\tau_6 - N_6 f_6 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_6)) \end{aligned} \right) \quad (45)$$

Теперь, подставляя уравнения (40, ..., 45) в уравнения (37), (38), (39), получаем:

$$\ddot{x}_g = -\dot{y}_g \dot{\beta} + r \left[ \begin{aligned} & (\cos \beta - \sin \beta) \left( \tau_2 + \tau_3 + \tau_5 + \tau_6 - N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_2) - N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_3) - \right. \\ & \left. - N_5 f_5 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_5) - N_6 f_6 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_6) \right) * \\ & * \left( \frac{(8\sqrt{3}+24)B+C}{16[(8\sqrt{3}+24)BC+(64\sqrt{3}+192)AB+C^2+8AC]} \right) + \\ & + (\cos \beta + \sin \beta) (\tau_1 + \tau_4 - N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_1) - N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_4)) * \\ & * \left( \frac{(8\sqrt{3}+24)B+C}{8[(8\sqrt{3}+24)BC+(128\sqrt{3}+384)AB+C^2+16AC]} \right) \end{aligned} \right] \quad (46)$$

$$\dot{y}_g = \dot{x}_g \dot{\beta} + r \left[ \begin{aligned} & (\sin \beta + \cos \beta) (\tau_2 + \tau_3 + \tau_5 + \tau_6 - N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_2) - N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_3) - \\ & - N_5 f_5 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_5) - N_6 f_6 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_6)) * \\ & * \left( \frac{(8\sqrt{3}+24)B+C}{16[(8\sqrt{3}+24)BC+(64\sqrt{3}+192)AB+C^2+8AC]} \right) + \\ & + (\sin \beta - \cos \beta) (\tau_1 + \tau_4 - N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_1) - N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_4)) * \\ & * \left( \frac{(8\sqrt{3}+24)B+C}{8[(8\sqrt{3}+24)BC+(128\sqrt{3}+384)AB+C^2+16AC]} \right) \end{aligned} \right] \quad (47)$$

$$\ddot{\beta} = \frac{r}{4R(\sqrt{3}+3)} \left[ \begin{aligned} & \left( \frac{-(\sqrt{3}+1)[(4\sqrt{3}+16)BC+(64\sqrt{3}+256)AB+C^2+16AC]}{2[(8\sqrt{3}+24)BC^2+(128\sqrt{3}+384)ABC+C^3+16AC^2]} + \right) * \\ & + \left( \frac{(8+2\sqrt{3})(\sqrt{3}+1)B}{(8\sqrt{3}+24)BC+C^2} \right) * \\ & * (\tau_1 - \tau_4 - N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_1) + N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_4)) + \\ & + \left( \frac{-2(2+\sqrt{3})(\sqrt{3}+1)B}{(8\sqrt{3}+24)BC+C^2} + \right. \\ & \left. + \frac{(4\sqrt{3}+8)(\sqrt{3}+1)BC+(96\sqrt{3}+160)AB+(\sqrt{3}+1)C^2+8(\sqrt{3}+1)AC}{2[(8\sqrt{3}+24)BC^2+(64\sqrt{3}+192)ABC+C^3+8AC^2]} \right) * \\ & * (\tau_2 - \tau_3 - N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_2) + N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_3)) + \\ & + \left( \frac{2(\sqrt{3}+1)^2 B}{(8\sqrt{3}+24)BC+C^2} + \right. \\ & \left. + \frac{(-8-4\sqrt{3})BC+(-32\sqrt{3}-64)AB-C^2-8AC}{(8\sqrt{3}+24)BC^2+(64\sqrt{3}+192)ABC+C^3+8AC^2} \right) * \\ & * (\tau_5 - \tau_6 - N_5 f_5 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_5) + N_6 f_6 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_6)) \end{aligned} \right] \quad (48)$$

Из уравнений (46), (47), (48) можно записать следующую общую форму:

$$\ddot{q} = U(q, \dot{q})\dot{q} + H(q)\tau + W(q)SNF \quad (49)$$

где:

$$\ddot{q} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g \\ \ddot{\beta} \end{bmatrix}, \dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x}_g \\ \dot{y}_g \\ \dot{\beta} \end{bmatrix}, U(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\beta} & 0 \\ \dot{\beta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix}, f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix},$$

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_6 \end{bmatrix},$$

$$S = \begin{bmatrix} \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_2) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_3) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_5) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_6) \end{bmatrix},$$



$$H^T(q) = \begin{bmatrix} (\cos \beta + \sin \beta)h_1 & (\sin \beta - \cos \beta)h_1 & h_3 \\ (\cos \beta - \sin \beta)h_2 & (\cos \beta + \sin \beta)h_2 & h_4 \\ (\cos \beta - \sin \beta)h_2 & (\cos \beta + \sin \beta)h_2 & -h_4 \\ (\cos \beta + \sin \beta)h_1 & (\sin \beta - \cos \beta)h_1 & -h_3 \\ (\cos \beta - \sin \beta)h_2 & (\cos \beta + \sin \beta)h_2 & h_5 \\ (\cos \beta - \sin \beta)h_2 & (\cos \beta + \sin \beta)h_2 & -h_5 \end{bmatrix},$$

$$W(q) = -H(q)$$

где

$$h_1 = r \left[ \frac{(8\sqrt{3} + 24)B + C}{8[(8\sqrt{3} + 24)BC + (128\sqrt{3} + 384)AB + C^2 + 16AC]} \right],$$

$$h_2 = r \left[ \frac{(8\sqrt{3} + 24)B + C}{16[(8\sqrt{3} + 24)BC + (64\sqrt{3} + 192)AB + C^2 + 8AC]} \right],$$

$$h_3 = \frac{r}{4R(\sqrt{3} + 3)} \left[ \frac{-(\sqrt{3} + 1)[(4\sqrt{3} + 16)BC + (64\sqrt{3} + 256)AB + C^2 + 16AC]}{2[(8\sqrt{3} + 24)BC^2 + (128\sqrt{3} + 384)ABC + C^3 + 16AC^2]} + \frac{(8 + 2\sqrt{3})(\sqrt{3} + 1)B}{(8\sqrt{3} + 24)BC + C^2} \right],$$

$$h_4 = \frac{r}{4R(\sqrt{3} + 3)} \left[ \frac{-2(2 + \sqrt{3})(\sqrt{3} + 1)B}{(8\sqrt{3} + 24)BC + C^2} + \frac{(4\sqrt{3} + 8)(\sqrt{3} + 1)BC + (96\sqrt{3} + 160)AB + (\sqrt{3} + 1)C^2 + 8(\sqrt{3} + 1)AC}{2[(8\sqrt{3} + 24)BC^2 + (64\sqrt{3} + 192)ABC + C^3 + 8AC^2]} \right],$$

$$h_5 = \frac{r}{4R(\sqrt{3} + 3)} \left[ \frac{2(\sqrt{3} + 1)^2 B}{(8\sqrt{3} + 24)BC + C^2} + \frac{(-8 - 4\sqrt{3})BC + (-32\sqrt{3} - 64)AB - C^2 - 8AC}{(8\sqrt{3} + 24)BC^2 + (64\sqrt{3} + 192)ABC + C^3 + 8AC^2} \right].$$

Из уравнения (49) можно написать:

$$\tau = H^{-1}(q)\ddot{q} - H^{-1}(q)U(q, \dot{q})\dot{q} + SNF \quad (50)$$

Полученная математическая модель была использована для проведения численных моделирований движения выбранной характерной точки робота.

**Численное моделирование.** В ходе численных исследований была проведена симуляция для отображения движения характерной точки робота по двум траекториям: прямолинейной и криволинейной. Моделирование уравнения (50) выполнялось в среде Matlab Simulink. Для проведения численного моделирования движения выбранной точки робота были приняты следующие геометрические параметры:  $\delta = \pi/4$  [рад],  $R = 0.5$  [м],  $r = 0.052$  [м]. Другие константы, использованные в симуляции:  $f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = f_6 = 0.002$  [м],  $N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = N_5 = N_6 = 1455.1$  [Н],  $I_w = 0.4688$  [кг·м<sup>2</sup>],  $m_p = 20$  [кг],  $m_w = 0.5$  [кг].

Были заданы следующие начальные условия:  $x_0(0) = 0$ ,  $y_0(0) = 0$ ,  $v_x(0) = 0$ ,  $v_y(0) = 0$ ,  $\beta(0) = 0$ ,  $\dot{\beta}(0) = 0$  в симуляции. В свою очередь, каркас робота движется с постоянной конфигурацией в течение симуляции:  $\beta(t) = \beta(0)$ .

#### 1. Движение по прямолинейной траектории:

На рисунке 4 показана смоделированная прямолинейная траектория.

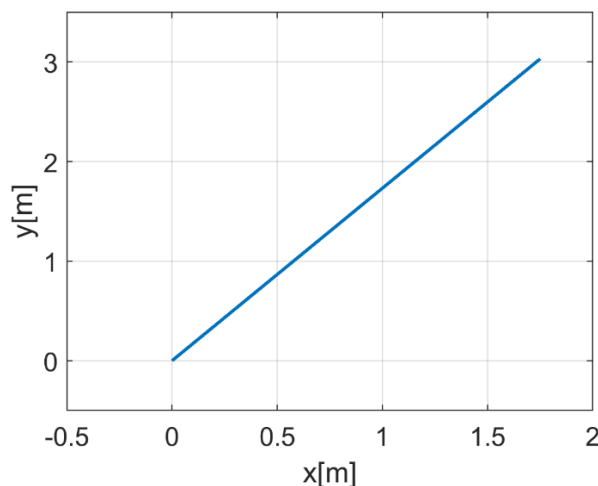


Рис. 4. Смоделированная прямолинейная траектория

На рисунке 5 показано, как ведет себя набор скоростей для выбранной точки робота:  $v_x(t)$ ,  $v_y(t)$ ,  $\dot{\beta}(t)$ .

На рисунке 6 показано, как ведет себя набор ускорений выбранной точки робота:  $\dot{v}_x(t)$ ,  $\dot{v}_y(t)$ ,  $\ddot{\beta}(t)$ .

Рисунки 7 и 8 иллюстрируют решение задачи обратной кинематики: поведение угловых скоростей и угловых ускорений отдельных колес.

На рисунке 9 показано решение задачи обратной динамики: поведение приводных моментов отдельных колес.

Рисунок 10 демонстрирует величину ошибки между эталонной скоростью и скоростью, полученной в модели прямой динамики.

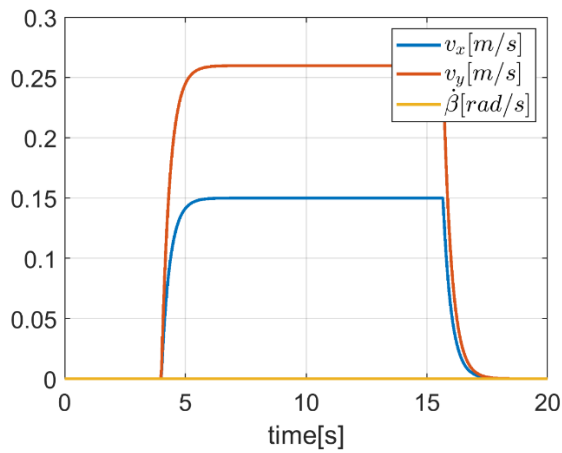


Рис. 5. Набор скоростей для выбранной точки робота

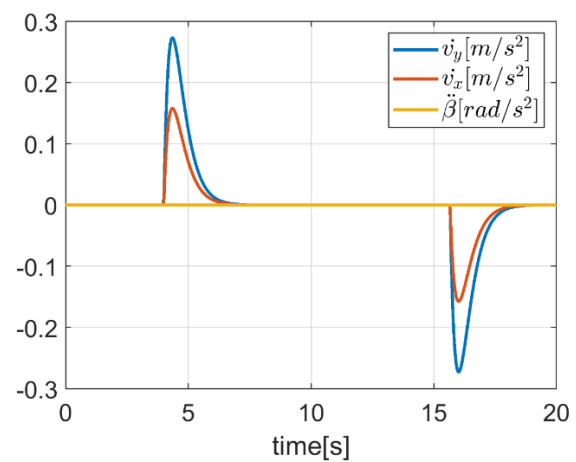


Рис. 6. Набор ускорений для выбранной точки робота

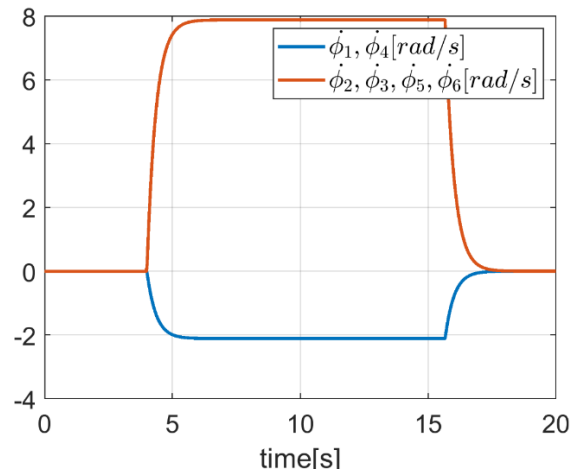


Рис. 7. Поведение угловых скоростей колес

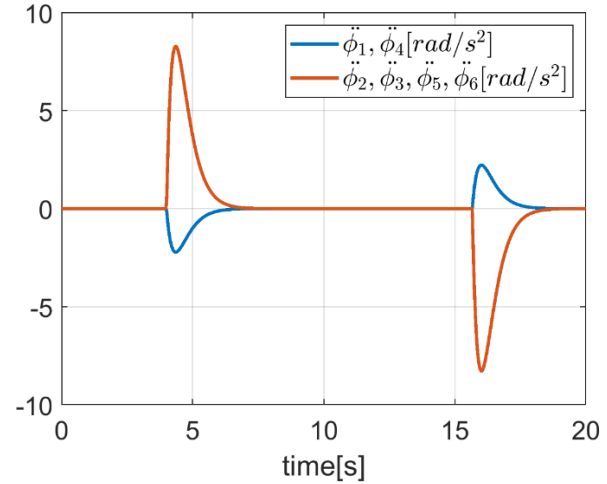


Рис. 8. Поведение угловых ускорений колес

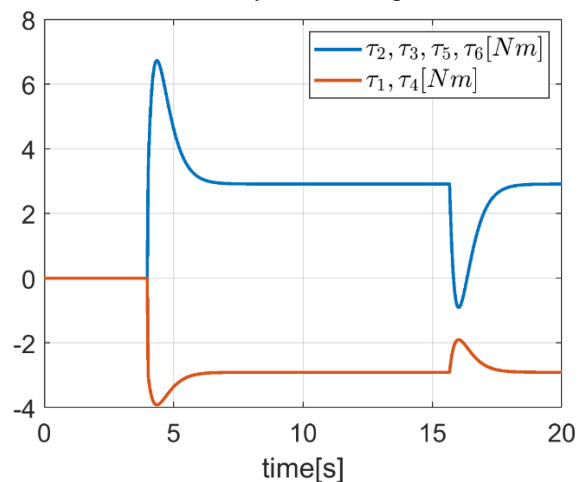


Рис. 9. Поведение приводных моментов колес

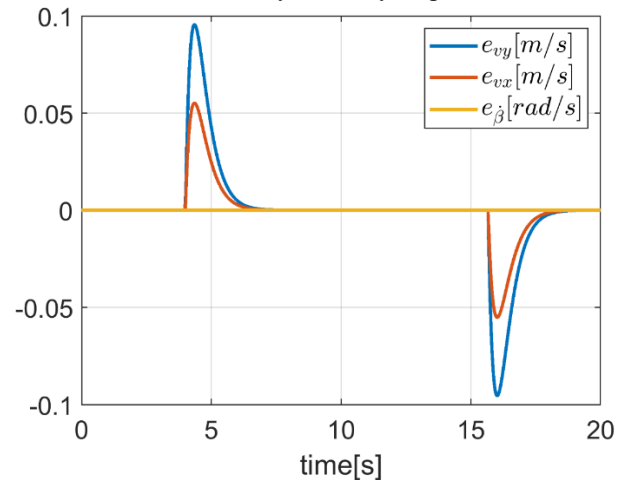


Рис. 10. Ошибка скорости

## 2. Движение по криволинейной траектории

Рисунок 11 показывает смоделированную криволинейную траекторию.

На рисунке 13 показано, как ведет себя набор ускорений выбранной точки робота:  $\dot{v}_x(t), \dot{v}_y(t), \dot{\beta}(t)$ .

На рисунке 12 показано, как ведет себя набор скоростей для выбранной точки робота:  $v_x(t), v_y(t), \dot{\beta}(t)$ .

Рисунки 14 и 15 иллюстрируют решение задачи обратной кинематики: поведение угловых скоростей и угловых ускорений отдельных колес.

На рисунке 16 показано решение задачи обратной динамики: поведение приводных моментов отдельных колес.

Рисунок 17 демонстрирует величину ошибки между эталонной скоростью и скоростью, полученной в модели прямой динамики.

Из рисунков 10 и 17 видно, что ошибки очень малы. Они проявляются только в переходных процессах, когда скорость изменяется. По-

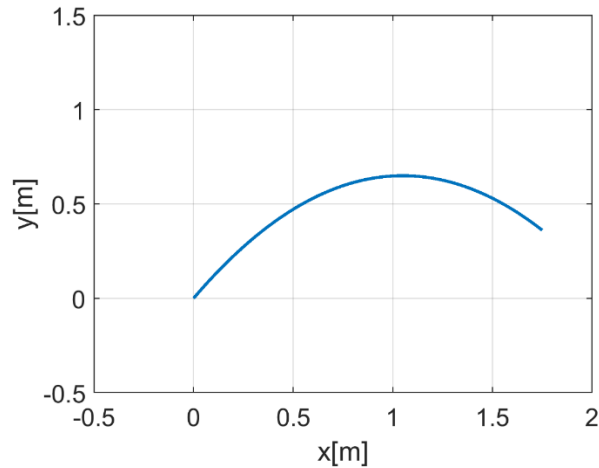


Рис. 11. Сымитированная криволинейная траектория

что их нет, когда скорость постоянна, что подтверждает правильность полученных результатов.

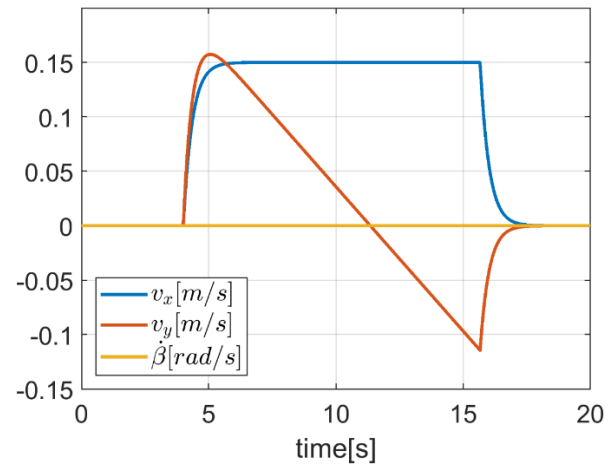


Рис. 12. Набор скоростей для выбранной точки робота

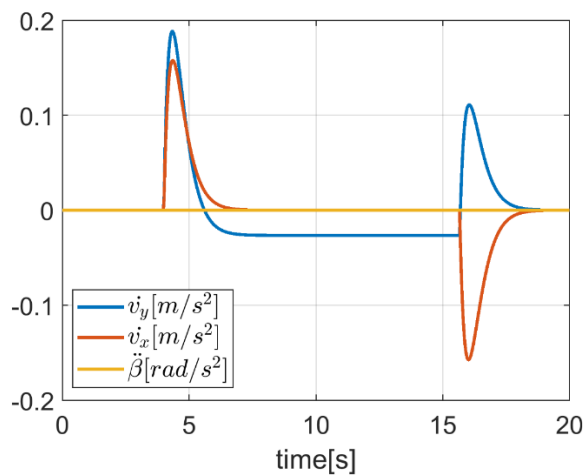


Рис. 13. Набор ускорений для выбранной точки робота

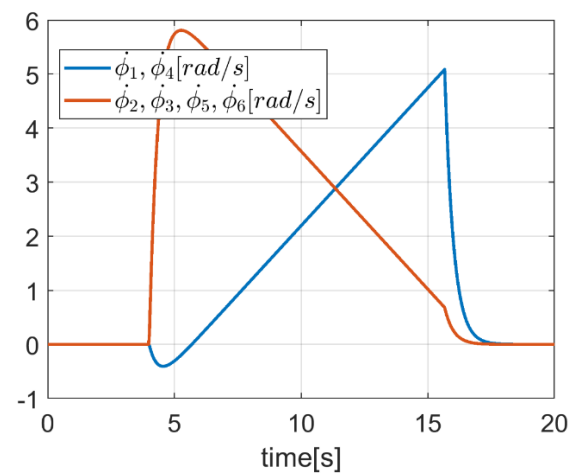


Рис. 14. Поведение угловых скоростей колес

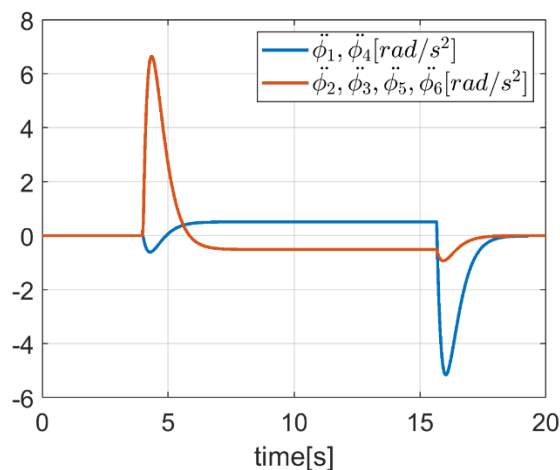


Рис. 15. Поведение угловых ускорений колес

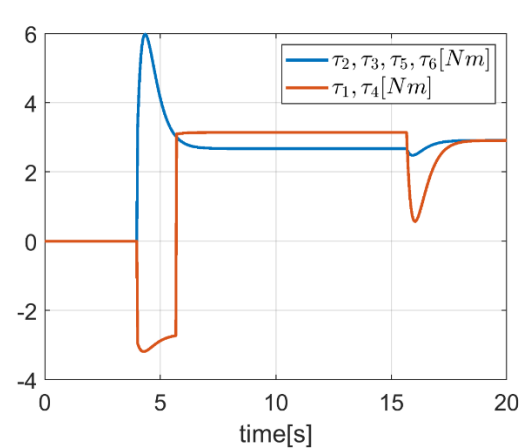


Рис. 16. Поведение приводных моментов колес

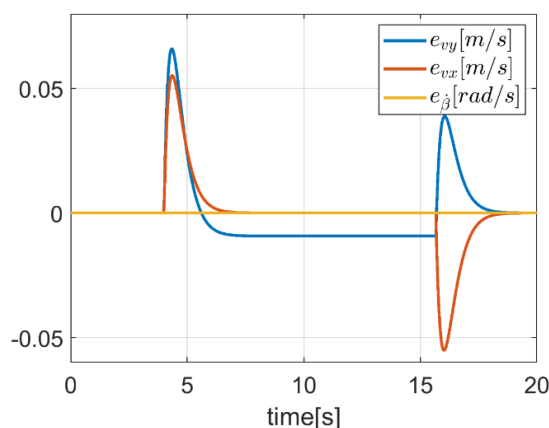


Рис. 17. Ошибка скорости

**Вывод.**

В рамках данного исследования была разработана динамическая модель мобильного робота с шестью колесами Илона. Модель была построена на основе уравнений Лагранжа второго рода с использованием множителей. Для проверки корректности модели было проведено численное моделирование в среде Matlab Simulink, включающее движение робота по двум траекториям: прямолинейной и криволинейной.

Результаты моделирования показали:

1. На прямолинейной траектории наблюдались разные знаки приводных моментов колес после стабилизации скорости: моменты  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ ,  $\tau_5$ ,  $\tau_6$  были положительными, а  $\tau_1$ ,  $\tau_4$  – отрицательными.

2. На криволинейной траектории все знаки моментов были положительными после стабилизации скорости.

Данный результат демонстрирует, что прямолинейное движение способствует снижению отрицательных эффектов трения на колеса. Дополнительно, малые значения ошибки скорости подтвердили точность и корректность предложенной модели.

Разработанная модель может быть использована в будущем для проектирования и управления мобильными роботами в условиях, требующих высокой маневренности.

В перспективе дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку обобщенной модели мобильных платформ с шестью колесами Илона, включающей различные геометрические конфигурации, такие как круг, овал и прямоугольник. Такой подход позволит избежать необходимости проведения отдельных исследований для каждой возможной конструкции и обеспечит возможность их сопоставления с точки зрения динамических характеристик. Кроме того, перспективным направлением является оптимизация геометрических параметров платформы и численный анализ её поведения в сравнении с традиционными прямоугольными платформами, представленными в работах [13]-

[14]. Это позволит глубже понять преимущества различных конфигураций и повысить эффективность проектирования мобильных роботов.

Таблица 1

**Список обозначений**

АУТС	Автоматически управляемые транспортные средства
$O, x_i, y_i, z_i$	система координат
$\delta$	угол между осью колеса и осью качения [рад]
$\alpha$	угол между осью $x_i$ и осью колеса $a$ [рад]
$\dot{\phi}$	угловая скорость колеса Илона [рад/с]
$r$	расстояние между осью колеса и землей [м]
$v_x$	скорость центра робота (O) в направлении $x$ [м/с]
$v_y$	скорость центра робота (O) в направлении $y$ [м/с]
$\dot{\beta}$	угловая скорость робота [рад/с]
$a_x, a_y$	координаты центра колеса [м]
O	центр массы робота
R	радиус платформы робота [м]
q	вектор обобщенных координат
Q	вектор обобщенных сил
L	кинетический потенциал системы [кг·м <sup>2</sup> ·с <sup>-2</sup> ]
E	полная кинетическая энергия системы [кг·м <sup>2</sup> ·с <sup>-2</sup> ]
U	потенциальная энергия системы [кг·м <sup>2</sup> ·с <sup>-2</sup> ]
$E_p$	кинетическая энергия платформы [кг·м <sup>2</sup> ·с <sup>-2</sup> ]
$E_w$	кинетическая энергия колес Илона [кг·м <sup>2</sup> ·с <sup>-2</sup> ]
$m_p$	масса платформы [кг]
$I_p$	массовый момент инерции платформы робота [кг·м <sup>2</sup> ]
$m_w$	масса колеса Илона [кг]
$I_w$	массовый момент инерции колес Илона относительно оси вращения колеса [кг·м <sup>2</sup> ]
$I_{wzL}$	массовый момент инерции колеса Илона относительно оси $ez$ , проходящей через точку o [кг·м <sup>2</sup> ]
$m_{pc}$	масса робота [кг]
$I_{pc}$	массовый момент инерции робота [кг·м <sup>2</sup> ]
$\tau$	крутящий момент двигателя колеса [кг·м <sup>2</sup> ·с <sup>-2</sup> ]
$G_p$	вес платформы мобильного робота [кг·м·с <sup>-2</sup> ]
$G_i$	вес i-го колеса Илона [кг·м·с <sup>-2</sup> ]
$\mu$	коэффициент сухого трения
$f$	коэффициент трения качения [м]
T	сила сухого трения [кг·м·с <sup>-2</sup> ]
N	сила давления [кг·м·с <sup>-2</sup> ]
D	работа системы сил [кг·м <sup>2</sup> ·с <sup>-2</sup> ]
RF	реакционная сила [кг·м·с <sup>-2</sup> ]
P	мощность обобщенных сил [кг·м <sup>2</sup> ·с <sup>-3</sup> ]

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chawla V.K., Chanda A.K., Angra S. The scheduling of automatic guided vehicles for the workload balancing and travel time minimization in the flexible manufacturing system by the nature-inspired algorithm // *Journal of Project Management*. 2019. Vol. 4. Pp. 19–30. DOI: 10.5267/j.jpm.2018.8.001.
2. Du L.Z., Ke S.F., Wang Z., Tao J., Yu L.Q., Li H.J. Research on multi-load AGV path planning of weaving workshop based on time priority // *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2019. Vol. 16. Pp. 2277–2292. DOI: 10.3934/mbe.2019113.
3. Chen C., Huy D.T., Tiong L.K., Chen I.M., Cai Y.Y. Optimal facility layout planning for AGV-based modular prefabricated manufacturing system // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 98. Pp. 310–321. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.08.008.
4. Chen C., Tiong L.K., Chen I.M. Using a genetic algorithm to schedule the space-constrained AGV-based prefabricated bathroom units manufacturing system // *International Journal of Production Research*. 2019. Vol. 57. Pp. 3003–3019. DOI: 10.1080/00207543.2018.1521532.
5. Dehnavi-Arani S., Saidi-Mehrabad M., Ghezavati V. An integrated model of cell formation and scheduling problem in a cellular manufacturing system considering automated guided vehicles' movements // *International Journal of Operations Research*. 2019. Vol. 34. Pp. 542–561. DOI: 10.1504/IJOR.2019.099108.
6. Abdelrahman M., Zeidis I., Bondarev O., Adamov B., Becker F., Zimmermann K. A description of the dynamics of a four-wheel mecanum mobile system as a basis for a platform concept for special purpose vehicles for disabled persons // 58th Ilmenau Scientific Colloquium, Ilmenau University of Technology. 2014. 10 p.
7. Hendzel Z., Rykała Ł. Modeling of Dynamics of a Wheeled Mobile Robot with Mecanum Wheels with the use of Lagrange Equations of the Second Kind // *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 2017. №22(1). Pp. 81–99. DOI: 10.1515/ijame-2017-0005.
8. Hendzel Z., Rykała Ł. Description of kinematics of a wheeled mobile robot with mecanum wheels // *Modeling in Engineering*. 2015. №26(57). Pp. 5–12.
9. Wampfler G., Salecker M., Wittenburg J. Kinematics, dynamics, and control of omnidirectional vehicles with mecanum wheels // *Mechanics of Structures and Machines*. 1989. Vol. 17(2). Pp. 165–177. DOI: 10.1080/15397738909412814.
10. Shafiq M., Imran A., Maznoor S., Majeed A., Ahmed B., Khan I. Real-time navigation of mecanum wheel-based mobile robot in a dynamic environment // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. e26829. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26829.
11. Racz S.-G., Crenganis M., Breaz R.-E., Maros,an A., Bârsan A., Gîrjob C.-E., Biris C.-M., Tera M. Mobile Robots—AHP-Based Actuation Solution Selection and Comparison between Mecanum Wheel Drive and Differential Drive with Regard to Dynamic Loads // *Machines*. 2022. Vol. 10. 886. DOI: 10.3390/machines10100886.
12. Leng J., Mou H., Tang J., Li Q., Zhang J. Design, Modeling, and Control of a New Multi-Motion Mobile Robot Based on Spoked Mecanum Wheels // *Biomimetics*. 2023. Vol. 8. 183. DOI: 10.3390/biomimetics8040183.
13. Typiak A., Łopatka M.J., Rykała Ł., Kijek M. Dynamics of Omnidirectional Unmanned Rescue Vehicle with Mecanum Wheels // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 1922. Pp. 120005–10. DOI: 10.1063/1.5019120.
14. Tian Y., Zhang S., Liu J., Chen F., Li L., Xia B. Research on a new omnidirectional mobile platform with heavy loading and flexible motion // *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 9(9). Pp. 1–15. DOI: 10.1177/1687814017726683.
15. Шбани А., Волков А.Н., Кочнева О.В., Алван Х.М. Разработка кинематической модели для мобильного робота с шестью колесами Илона // *Наука и бизнес: пути развития*. 2022. №10(136). С. 160–166.
16. Шбани А., Алван Х.М., Кочнева О.В., Волков А.Н. Разработка контроллера обратного шага для мобильного робота с шестью колесами Илона // *Наука и бизнес: пути развития*. 2023. №2(140). С. 55–60.

## Информация об авторах

**Шбани Али**, аспирант высшей школы автоматизации и робототехники. E-mail: ali.shbani951@gmail.com. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б.

**Алван Хасан Мохаммед**, кандидат технических наук, доцент высшей школы автоматизации и робототехники. E-mail: hassan.m.alwan@uotechnology.edu.iq. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б.

Поступила 13.12.2024 г.

© Шбани А., Алван Х.М., 2025



\*Shbani A., Alwan H.M.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

\*E-mail: ali.shbani951@gmail.com

## DEVELOPMENT OF A DYNAMIC MODEL FOR A MOBILE ROBOT WITH SIX MECANUM WHEELS

**Abstract.** This study focuses on the analysis of a mobile robot with six Mecanum wheels. Among all ground transportation systems, the robot equipped with Mecanum wheels possesses exceptional maneuverability and operates effectively in warehouse environments requiring precise control and high mobility. This type of robot was chosen as the research object for its combination of versatility and simplicity in implementation.

The goal of this work is to develop a dynamic model of a mobile robot with six Mecanum wheels, enabling motion analysis and control. To achieve this, the following tasks were undertaken: a critical review of existing scientific and technical sources, the development of the robot's dynamic model, and its computer simulation. The dynamic equations were derived using Lagrange's equations of the second kind, accounting for the key parameters of motion.

The mobile robot is considered a planar mechanism capable of linear and angular movement on a horizontal plane. It is assumed that motion occurs under the condition of pure rolling of the wheels without slipping. The dynamic model was validated through simulation of motion along two trajectories: straight and curved. The simulation results demonstrated the high accuracy of the proposed model, as confirmed by the small velocity error values.

**Keywords:** Dynamic robot modeling, Mobile robot, Mecanum wheel, Mobile system navigation, Robot motion analysis.

### REFERENCES

1. Chawla V.K., Chanda A.K., Angra S. The scheduling of automatic guided vehicles for the workload balancing and travel time minimization in the flexible manufacturing system by the nature-inspired algorithm. *Journal of Project Management*. 2019. Vol. 4. Pp. 19–30. DOI: 10.5267/j.jpm.2018.8.001.
2. Du L.Z., Ke S.F., Wang Z., Tao J., Yu L.Q., Li H.J. Research on multi-load AGV path planning of weaving workshop based on time priority. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2019. Vol. 16. Pp. 2277–2292. DOI: 10.3934/mbe.2019113.
3. Chen C., Huy D.T., Tiong L.K., Chen I.M., Cai Y.Y. Optimal facility layout planning for AGV-based modular prefabricated manufacturing system. *Automation in Construction*. 2019. Vol. 98. Pp. 310–321. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.08.008.
4. Chen C., Tiong L.K., Chen I.M. Using a genetic algorithm to schedule the space-constrained AGV-based prefabricated bathroom units manufacturing system. *International Journal of Production Research*. 2019. Vol. 57. Pp. 3003–3019. DOI: 10.1080/00207543.2018.1521532.
5. Dehnavi-Arani S., Saidi-Mehrabadi M., Ghezavati V. An integrated model of cell formation and scheduling problem in a cellular manufacturing system considering automated guided vehicles' movements. *International Journal of Operations Research*. 2019. Vol. 34. Pp. 542–561. DOI: 10.1504/IJOR.2019.099108.
6. Abdelrahman M., Zeidis I., Bondarev O., Adamov B., Becker F., Zimmermann K. A description of the dynamics of a four-wheel mecanum mobile system as a basis for a platform concept for special purpose vehicles for disabled persons. 58th Ilmenau Scientific Colloquium, Ilmenau University of Technology. 2014. 10 p.
7. Hendzel Z., Rykała Ł. Modeling of Dynamics of a Wheeled Mobile Robot with Mecanum Wheels with the use of Lagrange Equations of the Second Kind. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 2017. No. 22(1). Pp. 81–99. DOI: 10.1515/ijame-2017-0005.
8. Hendzel Z., Rykała Ł. Description of kinematics of a wheeled mobile robot with mecanum wheels. *Modeling in Engineering*. 2015. No. 26(57). Pp. 5–12.
9. Wampfler G., Salecker M., Wittenburg J. Kinematics, dynamics, and control of omnidirectional vehicles with mecanum wheels. *Mechanics of Structures and Machines*. 1989. Vol. 17(2). Pp. 165–177. DOI: 10.1080/15397738909412814.
10. Shafiq M., Imran A., Maznoor S., Majeed A., Ahmed B., Khan I. Real-time navigation of mecanum wheel-based mobile robot in a dynamic environment. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. e26829. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26829.
11. Racz S.-G., Crenganiş M., Breaz R.-E., Maros,an A., Bărsan A., Gîrjob C.-E., Biris C.-M., Tera M. Mobile Robots—AHP-Based Actuation Solution Selection and Comparison between Mecanum Wheel Drive and Differential Drive with Regard to Dynamic Loads. *Machines*. 2022. Vol. 10. 886. DOI: 10.3390/machines10100886.

12. Leng J., Mou H., Tang J., Li Q., Zhang J. Design, Modeling, and Control of a New Multi-Motion Mobile Robot Based on Spoked Mecanum Wheels. *Biomimetics*. 2023. Vol. 8. 183. DOI: 10.3390/biomimetics8040183.

13. Typiak A., Łopatka M.J., Rykała L., Kijek M. Dynamics of Omnidirectional Unmanned Rescue Vehicle with Mecanum Wheels. *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 1922. Pp. 120005–10. DOI: 10.1063/1.5019120.

14. Tian Y., Zhang S., Liu J., Chen F., Li L., Xia B. Research on a new omnidirectional mobile platform with heavy loading and flexible motion. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 9(9). Pp. 1–15. DOI: 10.1177/1687814017726683.

15. Shbani A., Volkov A.N., Kochneva O.V., Alwan H.M. Development of a kinematic model for a mobile robot with six Elon's wheels [Razrabotka kinematicheskoy modeli dlya mobil'nogo robota s shest'yu kolesami Ilona]. *Science and business: paths of development*. 2022. No. 10(136). Pp. 160–166. (rus)

16. Shbani A., Alwan H.M., Kochneva O.V., Volkov A.N. Development of a backstepping controller for a mobile robot with six Elon's wheels [Razrabotka kontrollera obratnogo shaga dlya mobil'nogo robota s shest'yu kolesami Ilona]. *Science and business: paths of development*. 2023. No. 2(140). Pp. 55–60. (rus)

#### *Information about the authors*

**Shbani, Ali** Postgraduate student. E-mail: ali.shbani951@gmail.com. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint Petersburg, Politekhnikeskaya st., 29, building B.

**Alwan, Hassan M.** PhD, Assistant professor. и. E-mail: hassan.m.alwan@uotechnology.edu.iq. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint Petersburg, Politekhnikeskaya st., 29, building B.

---

*Received 13.12.2024*

#### **Для цитирования:**

Шбани А., Алван Х.М. Разработка динамической модели для мобильного робота с шестью колесами Илона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 9. С. 89–103. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-89-103

#### **For citation:**

Shbani A., Alwan H.M. Development of a dynamic model for a mobile robot with six mecanum wheels. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 9. Pp. 89–103. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-89-103

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-104-114

<sup>1,\*</sup>Колос Э.М., <sup>2</sup>Малышев И.И., <sup>2</sup>Глобенко С.А., <sup>1</sup>Сергеев Э., <sup>1</sup>Ишкуватов Р.Р.,  
<sup>1</sup>Кроткова И.Л.<sup>1</sup>Российский государственный университет нефти и газа  
(Национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет

\*E-mail: kolos.edvard@yandex.ru

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТУРБОДЕТАНДЕРОВ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ

**Аннотация.** В статье рассматривается актуальная проблема оптимизации энергопотребления на газораспределительных станциях (ГРС) с использованием турбодетандеров. Большая часть потенциальной энергии сжатого газа, передаваемой ему на компрессорных станциях магистрального газопровода, традиционно расходуется в процессе редуцирования. В контексте мирового движения к энергосбережению и в соответствии с энергетической стратегией Российской Федерации, всё более актуальным становится вопрос утилизации энергии, высвобождаемой при редуцировании. Турбодетандеры позволяют преобразовать эту энергию в электрическую, которая может быть использована для хозяйственных нужд ГРС или для подогрева газа, предотвращая гидратообразование. В статье представлена компьютерная модель, разработанная для анализа работы турбодетандеров на ГРС. Модель позволяет рассчитать энергетический баланс станции, а также определить температуру газа после дросселирования в турбодетандере. В результате параметрического анализа установлено, что при предложенной схеме работы ГРС возможно получить профицит энергии в размере 11 %, при этом поддерживая температуру газа на выходе свыше 10 °С, посредством варьирования входных параметров (давления, расхода, температуры газа) установлена специфическая рабочая зона для задаваемых наборов параметров. Проведённые расчёты демонстрируют, что использование турбодетандеров не только повышает энергоэффективность ГРС, но и обеспечивает соблюдение нормативных требований к температуре газа на выходе. Результаты исследования подтверждают целесообразность внедрения турбодетандеров на газораспределительных станциях как эффективного инструмента для энергосбережения и повышения устойчивости работы газотранспортных систем.

**Ключевые слова** газораспределительная станция (ГРС), турбодетандер, энергосбережение, редуцирование газа, энергетический баланс, компьютерное моделирование, утилизация энергии, гидратообразование, подогрев газа, энергоэффективность.

**Введение.** Современные вызовы, связанные с глобальным изменением климата, истощением природных ресурсов и необходимостью перехода к устойчивому развитию, обуславливают повышенное внимание к вопросам энергосбережения и повышения энергоэффективности во всех отраслях экономики. В энергетической сфере, особенно в газовой промышленности, значительные объёмы энергии теряются на этапах транспортировки и распределения природного газа. Одной из ключевых точек потерь являются газораспределительные станции (ГРС), где большая часть потенциальной энергии сжатого газа, передаваемой ему на компрессорных станциях магистральных газопроводов, расходуется в процессе редуцирования. Традиционные регуляторы давления, используемые для снижения давления газа до требуемых параметров, не предусматривают утилизацию энергии расширяемого газа, что приводит к нерациональному использованию энергетического потенциала и увеличению эксплуатационных затрат.

В условиях мирового движения к энергосбережению и в рамках реализации Энергетической стратегии Российской Федерации, направленной на снижение энергоёмкости экономики и повышение эффективности использования энергоресурсов, актуальным становится внедрение инновационных технологий, позволяющих утилизировать энергию, высвобождаемую при редуцировании газа. Одним из наиболее перспективных решений является замена традиционных регуляторов давления на турбодетандеры (ТД) [1, 2], [3]. Эти устройства преобразуют энергию расширяемого газа в механическую, а затем в электрическую с помощью генератора [4–6]. Полученная электроэнергия может быть использована для собственных нужд ГРС, таких как подогрев газа для предотвращения гидратообразования, что особенно важно в условиях низких температур, или для обеспечения работы вспомогательного оборудования [7]. Необходимость подогрева

обоснована опасностью возникновения кристаллогидратов в трубопроводах ГРС при значительном снижении температуры [8].

Использование ТД не только позволяет повысить энергоэффективность работы ГРС, но и способствует снижению эксплуатационных затрат за счет уменьшения потребления внешней электроэнергии. Кроме того, утилизация энергии расширяемого газа помогает избежать сжигания излишков газа, что снижает выбросы вредных веществ в атмосферу и способствует повышению экологической устойчивости объектов газовой инфраструктуры [9].

Согласно исследованиям, внедрение ТД на объектах газотранспортной системы теоретически может обеспечить экономию 11 % транспортируемого газа, затрачиваемого на выработку тепловой и электрической энергии [10].

Одной из проблем внедрения ТД на ГРС является достижение положительного энергетического баланса: при простой схеме с ТД и подогревателем газа возникает дефицит энергии [1], который необходимо компенсировать потреблением из электросетей, что, в свою очередь, негативно сказывается на экономических показателях подобных проектов. В связи с этим рядом авторов предлагается ряд различных решений с целью повышения эффективности подогрева.

Предлагается решение, при котором исходный поток подвергается двойному расширению и промежуточной передаче тепла от одного к другому в теплообменном аппарате, или расширению и компримированию разделенных потоков с последующей передачей тепла от нагретого в компрессоре газа к охлажденному в ТД [11]. Кроме того, рассматривается применение тепловых насосов [7, 1212].

Основным вопросом остается влияние неравномерности производительности ГРС в течение суток, сезонного изменения температуры, а также влияние величины входного давления на эффективность оснащения ГРС ТД [13].

В данной статье рассматриваются вопросы оптимизации энергопотребления на газораспределительных станциях с использованием ТД. Проведено моделирование и анализ процессов, связанных с утилизацией энергии при редуцировании газа, а также оценена эффективность использования высвобождаемой энергии для производства электроэнергии и подогрева газа. Предложены рекомендации по внедрению ТД на ГРС, что позволит не только снизить энергопотери, но и повысить общую энергоэффективность газотранспортной системы. Результаты исследования имеют важное практическое значение для газовой отрасли и могут быть использо-

ваны при разработке стратегий повышения энергоэффективности и снижения экологической нагрузки.

Целью исследования выступает обоснование эффективности внедрения ТД на ГРС, при условии нестабильности параметров работы самой станции. Задачами исследования выступают создание компьютерной модели работы ГРС, апробация ее работы, а также проведение параметрического анализа посредством варьирования ее входных данных. Основными вопросами исследования выступают:

1. Возможна ли организация автономного энергоснабжения ГРС на основе генерации энергии ТД?
2. Возможно ли заменить стандартные электрические нагреватели более эффективными тепловыми машинами для подогрева газа на ГРС?
3. Возможно ли поддержание эффективной работы ТД при нестабильности входных параметров ГРС: давления, температуры, расхода?

Методами исследования выступают аналитический, дедуктивный, экспериментальный и сравнительный.

**Материалы и методы.** Предлагаемая схема работы ГРС представлена на рис. 1. При такой конфигурации ТД функционирует при стационарном режиме работы станции, а при резком изменении давления газа на входе происходит переключение на байпасную линию, на которой установлен стандартный регулятор.

При такой конфигурации электрическая энергия, вырабатываемая ТД, расходуется на собственные нужды ГРС:

1. Блоком подогрева газа;
2. Системой автоматики или телемеханики ГРС;
3. Системами освещения, пожаротушения и сигнализации;
4. Отопление помещений ГРС.

Кроме того, излишняя энергия может передаваться в единую энергосистему, а также для энергоснабжения объектов линейной части магистральных газопроводов и газораспределительных сетей. В случае присутствия на ГРС высокой суточной неравномерности расхода или давления, избыточная энергия может накапливаться аккумуляторными блоками.

В процессе дросселирования поток газа снижает свою температуру в результате эффекта Джоуля-Томсона [14], при этом относительное уменьшение температуры на единицу редуцируемого давления описывается коэффициентом Джоуля-Томсона,  $D_i$ , К/МПа, рассчитываемым по следующей зависимости [15]:

$$D_i = \frac{1}{c_p} \cdot \left( 0,98 \cdot \frac{10^6}{T^3} - 0,5 \right) \quad (1)$$

где  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость газа, определяемая для средних значений давления и

температуры, кДж/(кг·К);  $T$  – температура газа, К.

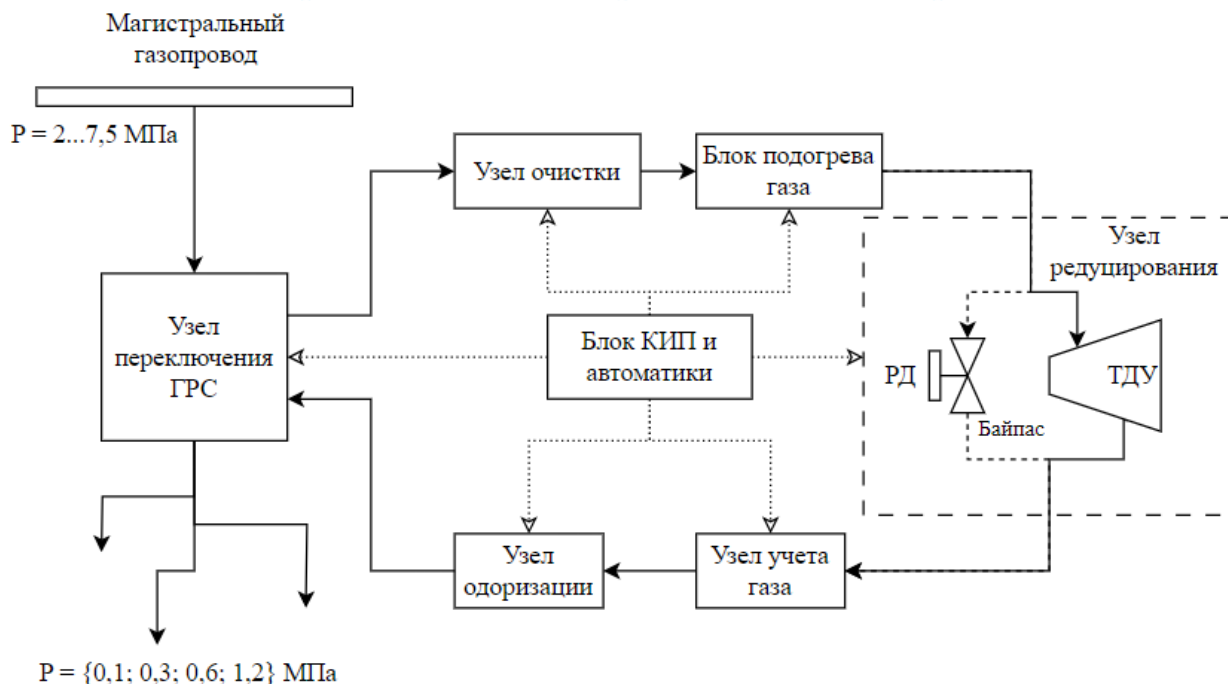


Рис. 1. Принципиальная схема технологического процесса на ГРС с ТД

С учетом описанных выше условий, снижение температуры газа в ходе дросселирования:

$$\Delta T = D_i \cdot (P_{вх} - P_{вых}) \quad (2)$$

где  $P_{вх}$ ,  $P_{вых}$  – давление на входе и выходе ТД, МПа.

При расширении газа в ТД механическая энергия на валу электрогенератора, в кДж, определяется по формуле:

$$W_{ТД} = \eta_{ТД} \cdot G \cdot (h_1 - h_2) \quad (3)$$

где  $\eta_{мех}$  – КПД механической передачи;  $\eta_{ген}$  – КПД электрогенератора;  $Q_n$  – нормальный объемный расход, нм<sup>3</sup>/сек;  $R$  – удельная газовая постоянная, кДж/(кг · К);  $k$  – показатель адиабаты.

В настоящее время на большинстве ГРС для подогрева газа с целью предотвращения гидратообразования используется природный газ, отбираемый из общего потока. Согласно требованиям СТО Газпром 2-3.5-051-2006, на выходе ГРС должна обеспечиваться температура газового потока не менее 10 °С, на пучинистых грунтах – 0 °С. Замена горючего газа на собственную генерацию ГРС позволит повысить энергоэффективность системы.

Уравнение баланса энергии ГРС в таком случае выглядит следующим образом:

$$W_{ТД} + W_{ЭС} = W_{ГРС} + W_{ПГ} + W_{вс} \quad (5)$$

где  $\eta_{ТД}$  – КПД ТД,  $G$  – массовый расход через ТД, кг/сек;  $h_1$ ,  $h_2$  – удельная энтальпия газа до и после расширения (кДж/кг).

Однако, для практических расчетов удобнее использовать технические параметры, которые легко измерить и вычислить: давление, температуру, объемный расход. Кроме того, необходимо принимать во внимание КПД механической передачи от ТД к электрогенератору и КПД электрогенератора. Таким образом, формула (3) приобретает вид:

$$W_{ТД} = \eta_{ТД} \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{ген} \cdot Q_n \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_{вх} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_{вых}}{P_{вх}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (4)$$

где  $W_{ЭС}$ ,  $W_{ГРС}$ ,  $W_{ПГ}$ ,  $W_{вс}$  – соответственно дефицит энергии, потребляемый из единой энергосистемы; энергопотребление ГРС; затраты энергии на подогрев газа; энергопотребление вспомогательных процессов ГРС (КИПиА, сигнализация, освещение, отопление, суммарная пиковая мощность которых принята равной 20 кВт), в кВт.

Оценку энергобаланса ГРС, с точки зрения возможности обеспечения автономной работы с ТД, предлагается проводить по относительному показателю, численно равному  $(W_{ТД}/W_{ГРС}) \cdot 100$  %. Целевым значением выступает величина показателя более 100 %, при которой возможна организация автономной работы ГРС.

**Основная часть.** Анализ процесса дросселирования производился на основе компьютерной модели (рис. 2), выполненной в ПО DWSIM



[16]. Входные данные моделирования представлены в таблице 1. Исходный поток природного газа из магистрального газопровода (из МГ) под давлением 3 МПа и с температурой 5 °С попадает в кожухотрубный теплообменник теплового насоса ТА, повышая свою температуру до 59,3 °С, после чего – в турбодетандер ТД, где расширяется до 1,2 МПа, снижая свою температуру на

46,6 °С. В сеть высокого давления (в СВД) газ подается при давлении 1,2 МПа и температуре порядка 10...15 °С. В тепловой машине теплоноситель (углекислый газ) циркулирует по контуру: компрессор К – теплообменник ТА – дроссель Др – испаритель Х. Параметры потоков цикла теплового насоса приведены в таблице 2.

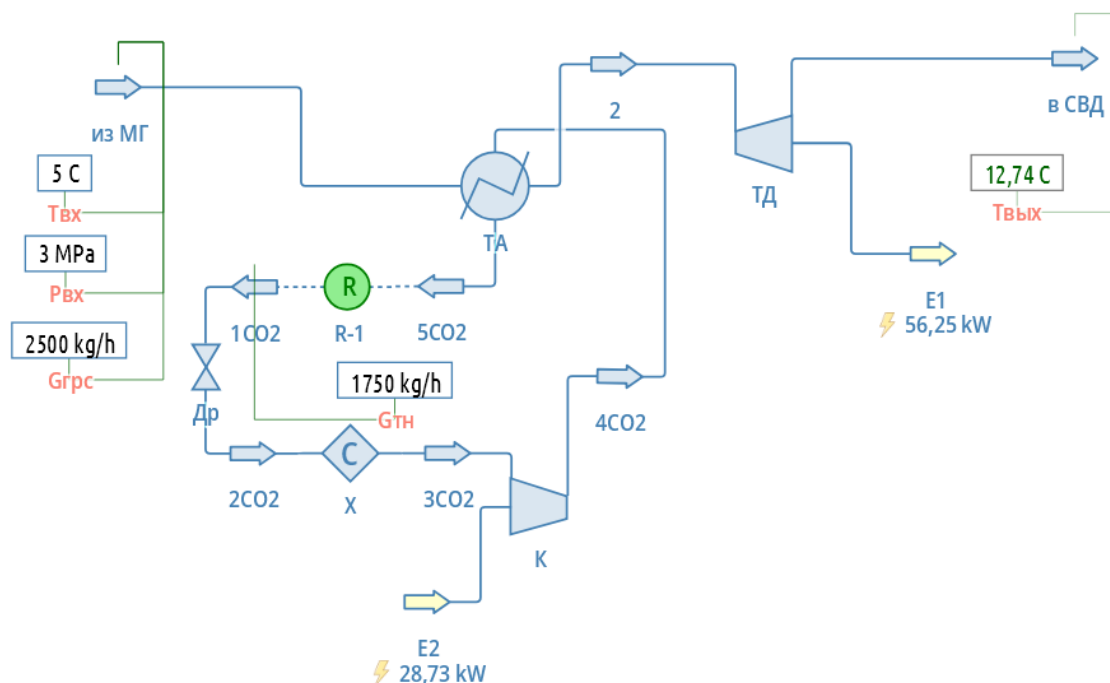


Рис. 2. Модель процессов подогрева и расширения газа на ГРС

Таблица 1

### Исходные данные моделирования

№ п/п	Наименование показателя	Обозначение	Единицы измерения	Значение
1.	Состав природного газа: C1 C2 C3 n-C4 i-C4	$r_1, r_2, \dots, r_i$	% об.	91,23 5,93 2,03 0,43 0,38
2.	Производительность ГРС	$G_{ГРС}$	кг/ч	2500
3.	Расход теплоносителя	$G_{ТН}$	кг/ч	1650
4.	Температура газа на входе	$T_{вх}$	К	278,15
5.	КПД турбодетандера	$\eta_{ТД}$	—	0,7
6.	КПД теплообменного аппарата	$\eta_{ТА}$	—	0,6

Таблица 2

### Параметры цикла теплового насоса

Обозначение объекта	Расшифровка	Давление, МПа	Температура, °С	Доля жидкой фазы, % мольн.
1CO2	Газ на выходе из теплообменника ТА	8	33,49	100
2CO2	Дросселированный газ из дросселя Др	3	-5,63	43,53
3CO2	Газ из испарителя Х	3	5,00	0
4CO2	Компримированный газ из компрессора К	8	97,06	0

Таким образом, при заданном наборе исходных параметров, потребляемая компрессором теплового насоса К энергия составляет 28,73

кВт·ч, а вырабатываемая на приводе ТД – 51,87 кВт·ч. Тепловая машина позволяет достичь достаточного нагрева газа, чтобы предотвратить

его охлаждения до критически низкой температуры после расширения в ТД.

Следует также отметить, что модель не учитывает расхода энергии на работу испарителя Х, так как принято допущение, согласно которому суммарный пиковый поток энергии для обеспечения всех вспомогательных процессов принимается равным 20 кВт·ч.

По результатам моделирования можно заключить, что энергобаланс ГРС при заданных условиях положительный: выработка газа на ТД покрывает суммарные потребности комплекса, создавая профицит генерации в размере 11 %. Кроме того, на выходе ГРС обеспечивается соответствующая нормативным требованиям температура (12,74 °С), следовательно, моделирование демонстрирует положительный результат внедрения ТД на ГРС.

На следующем этапе работы необходимо изучить восприимчивость предложенной схемы к изменению входных макропараметров: давления, температуры и расхода газа. Для варьирования указанных показателей использованы блоки ввода, предлагаемые набором инструментов ПО DWSIM, для настройки параметров работы теплового цикла CO<sub>2</sub> использованы блоки-контроллеры, которые настраивались на изменение двух параметров: расхода теплоносителя и давления на выходе компрессора (поз. К на рис. 2). Рассмотрены два сценария: с регулированием параметров и без. В первом случае ключевым параметром регулирования выступает расход теплоносителя. Целью анализа выступает определение:

1. Эффективной области работы ТД на ГРС – зоны, в которой обеспечивается профицит генерируемой энергии;
2. Допустимой области работы – зоны, где соблюдается порог температуры на выходе ТД.

Первоначально произведена регистрация параметров модели при различных величинах входного давления в интервале 2...4,5 МПа с шагом 0,5 МПа. В ходе анализа параметры, заданные блоком-контроллером, корректировались для достижения наименьшего расхода теплоносителя. В ходе моделирования требуемый показатель температуры на выходе установлен на уровне 15 °С. Результаты анализа для энергетического баланса и температуры на выходе приведены на рис. 3, 4.

Представленные зависимости отображают эффективность работы конфигурации ГРС с применением ТД и теплового насоса. В первом (базовом) варианте рабочие параметры системы остаются неизменными, однако варьируются параметры, задаваемые потоку газа из МГ. Для этого варианта получены кривые зависимостей энергобаланса и температуры на выходе ГРС (для всех графиков обозначены треугольными маркерами). Заметна прямая пропорциональность возрастания профицита энергии в системе при увеличении входного давления, за счет роста величины расширяемого давления, что подтверждается формулой (4), где величина энергии, вырабатываемой ТД пропорциональна величине давления на входе. Влияние температуры газа на входе на показатели работы можно описать следующими тезисами:

1. С увеличением температуры газа на входе растет выработка газа в ТД, так как увеличивается энтальпия газа, что соответствует формуле (3).
2. Влияние разницы температуры на величину энергобаланса становится более значительным при увеличении величины мощности на валу ТД.

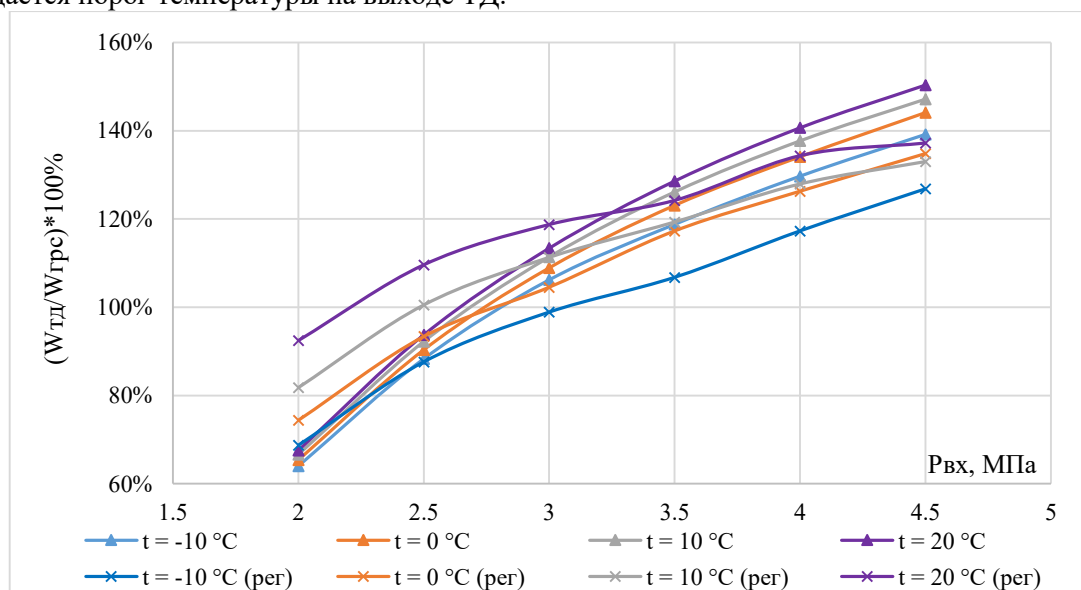


Рис. 3. Зависимость энергобаланса ГРС от величины входного давления при различных температурах

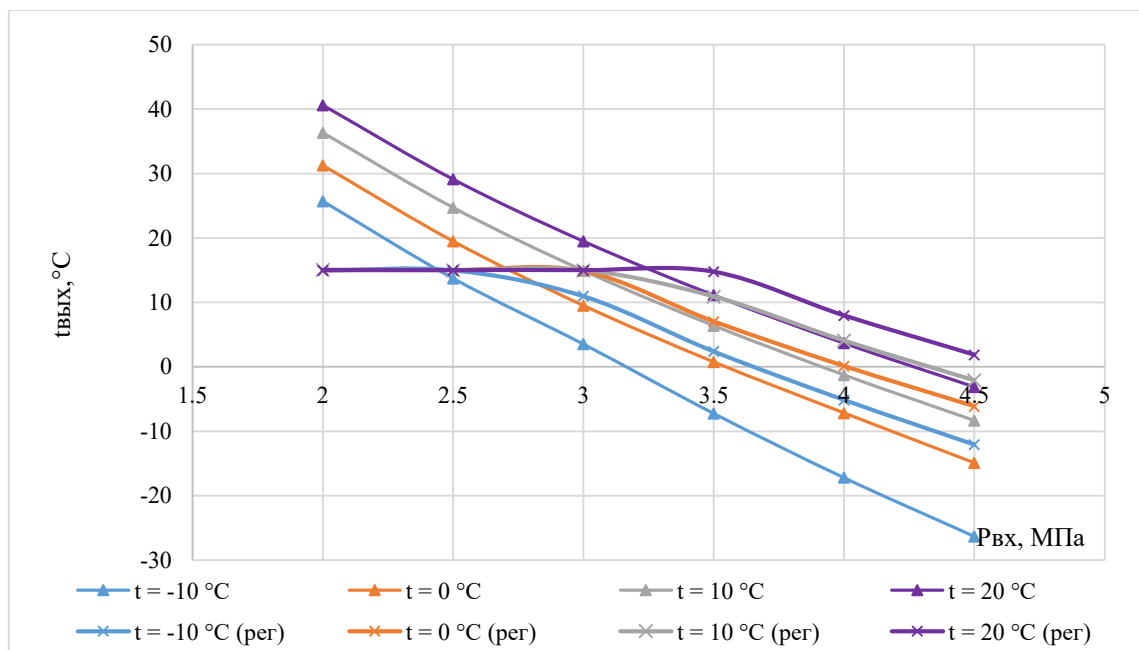


Рис. 4. Зависимость температуры газа на выходе ТД от величины входного давления при различных температурах

Во втором варианте, которому соответствуют кривые с х-образными маркерами, было применено регулирование системы посредством изменения расхода теплоносителя при неизменных рабочих параметрах цикла теплового насоса. Одинаковые цвета кривых в обоих вариантах соответствуют определенному значению температуры на входе. В случае энергобаланса, зависимость становится более пологой, исходя из чего можно сделать вывод, что для поддержания стабильности работы системы в условиях значительных перепадов давления целесообразно применять механизмы регулирования и настройки работы теплового насоса.

С точки зрения температуры газа на выходе, можно заключить о наличии зоны допустимого применения комбинации ТД и теплового насоса (правая часть графика, в которой температура на выходе остается постоянной и равной приблизительно 15 °C). В этой зоне предложенный алгоритм регулирования снижает расход теплоносителя до минимального необходимого, позволяя достичь оптимального энергобаланса. В связи с этим на графике энергобаланса кривые зависимостей в этой зоне проходят выше, чем для базового (нерегулируемого) варианта. Вторая зона графика – зона недопустимой работы (для 20 °C – при давлении свыше 3,5 МПа, для -10 °C – 3 МПа). В этой зоне снижение температуры вследствие дросселирования газа никак не может быть компенсировано подогревом от теплового насоса, а, следовательно, не соблюдается главное условие работоспособности системы – наличие температуры на выходе ГРС не менее 10 °C. При этом, чем выше температура поступающего газа,

тем шире зона допустимой работы системы. Однако, увеличение производительности по теплоносителю ведет к увеличению потребляемой мощности компрессора, что вызывает снижение значения энергобаланса.

На следующем этапе исследовалось влияние колебаний часового расхода ГРС на работоспособность системы. Значения рассчитаны для температуры газа на входе 5 °C. Расход газа задавался в интервале 500...3000 кг/час с шагом 500 кг/час. Результаты определения температуры на выходе и энергобаланса приведены на рис. 5, 6.

Рассматривая зависимости, полученные для энергобаланса, можно заключить о том, что при расходах менее номинального (2500 кг/ч) алгоритм регулирования снижает расход теплоносителя, что позволяет повысить энергоэффективность работы системы в среднем на 5...10 %. При превышении расходом газа через ГРС номинального значения мощность теплового насоса увеличивается, таким образом, снижается энергоэффективность.

Основным условием симуляции в этом случае выступает неизменность давления. Анализируя зависимости, полученные для температуры на выходе ГРС, можно сделать вывод об эффективности регулирования системы на всем рассматриваемом интервале значений расхода газа через ГРС, в то время как при базовом варианте при расходе 2530 кг/ч температура газа на выходе становится ниже 10 °C.

Таким образом, предположенная компоновка ГРС с параллельным размещением ТД и классического регулятора давления обусловлена наличием ограниченной эффективной зоны ТД,

за пределами которой его применение нецелесообразно, то есть основной поток газа может быть перенаправлен на регулятор. Границы зоны сильно варьируются в зависимости от температуры на входе, однако, можно рассуждать, что диапазон для возможного регулирования состав-

ляет от 0,5 до 1,5 МПа в обе стороны от номинальной величины. Диапазон эффективной работы ТД зачастую гораздо уже и находится ближе к максимальным значениям входного давления, так как появляется возможность эффективно использовать возросший перепад на ТД.

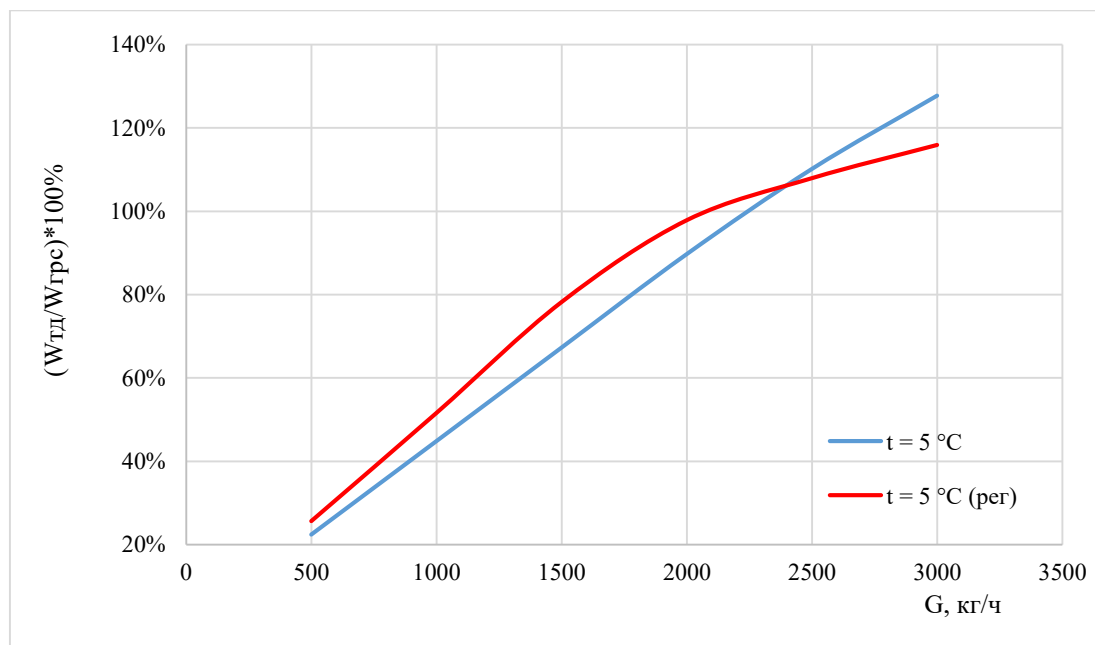


Рис. 5. Зависимость энергобаланса ГРС от величины ее производительности

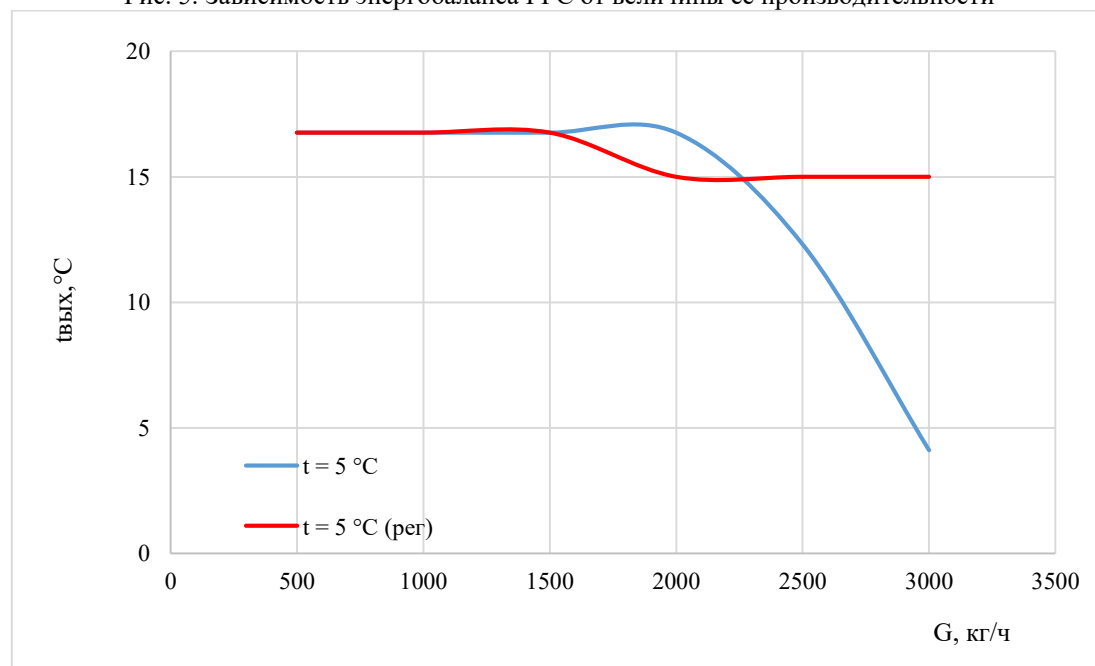


Рис. 6. Зависимость температуры газа на выходе ТД от величины производительности ГРС

**Выводы.** Проведенное исследование и моделирование процессов на газораспределительных станциях (ГРС) с использованием ТД подтвердили высокую эффективность данного подхода для оптимизации энергопотребления и утилизации энергии, выделяемой при редуцировании газа. Основные выводы работы можно сформулировать следующим образом:

1. Внедрение ТД на ГРС позволяет преобразовывать потенциальную энергию сжатого газа в механическую работу, которая может быть использована для выработки электроэнергии. Это способствует значительному снижению энергопотерь и повышению общей энергоэффективности газотранспортной системы. Моделирование показало, что при заданных условиях выработка

энергии на ТД покрывает суммарные потребности ГРС, создавая профицит генерации в размере 11 %.

2. Использование ТД в сочетании с системами подогрева газа позволяет поддерживать температуру на выходе ГРС в соответствии с нормативными требованиями (не менее 10 °С). Это предотвращает образование гидратов, которые могут привести к закупорке трубопроводов и нарушению работы системы.

3. Замена традиционного сжигания газа для подогрева на использование энергии, вырабатываемой ТД, способствует снижению выбросов вредных веществ в атмосферу. Это соответствует современным требованиям экологической безопасности и устойчивого развития.

4. Предложенная схема работы ГРС с ТД демонстрирует устойчивость к изменениям входных параметров, таких как давление, температура и расход газа. Моделирование показало, что система способна эффективно функционировать в широком диапазоне условий, обеспечивая как профицит генерируемой энергии, так и соблюдение температурных требований на выходе.

5. Расширить рабочую зону ТД можно, применив регулирование рабочего цикла тепловой машины по следующим параметрам: степень сжатия в компрессоре и расход теплоносителя. Такие меры позволят поддерживать заданную температуру газа на выходе из ТД.

6. Результаты исследования подтверждают, что использование ТД на ГРС является перспективным направлением для повышения энергоэффективности и снижения экологической нагрузки. Предложенные рекомендации могут быть использованы при разработке стратегий модернизации газотранспортной инфраструктуры.

Внедрение ТД на газораспределительных станциях представляет собой эффективное решение для оптимизации энергопотребления, повышения энергоэффективности и снижения экологического воздействия. Полученные результаты имеют важное практическое значение и могут быть использованы для дальнейшего развития газовой отрасли в рамках реализации энергетической стратегии Российской Федерации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зацепин С.С., Купцов С.М. Применение турбодетандерных установок на газораспределительных станциях // Территория Нефтегаз. 2016. №12. С. 50–53.
2. Микаэлян Э. А. Модернизация газораспределительных систем с применением утилизационных турбодетандерных установок // Территория Нефтегаз. 2015. №9. С. 36–39.
3. Al-Ismael F.S. A comprehensive and critical review on integrated electric power and gas networks, IEEE Access. 2024. Vol. 12. Pp. 143042–143057.
4. Gas turboexpanders // Ipieca. 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-compendium/gas-turboexpanders-2023> (дата обращения: 06.02.2025)
5. Воронов В.А., Самигуллин Г.Х., Рузманов А.Ю. Повышение энергетических характеристик газораспределительной станции путем применения турбодетандера // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. №4 (58). С. 1–5
6. Черных А.П. Использование турбинного привода для получения электроэнергии и тепла на объектах газовой промышленности // Газовая промышленность. 2017. No. 2 (748). С. 82–88.
7. Урванов С.В., Кондрашова Ю.Н., Газизова О.В., Скворцов Д.С. Разработка и исследование существующих возможностей применения детандер-генераторного агрегата для газораспределительной станции с использованием в качестве системы подогрева газа тепловой насосной установки // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2017. №2. С. 5–13.
8. Капыш В.В., Кулемин Н.В., Истомин В.А. Предупреждение гидратообразования в газопроводах-отводах и на газораспределительных станциях // Вести газовой науки. 2013. №. 4 (15). С. 125–131.
9. Керимов И.А., Саидов А.А., Батаев Д.К., Дебиев М.В. Экономические аспекты использования детандер-генераторных агрегатов в системе газовых сетей Чеченской Республики // Вестник российских университетов. Математика. 2012. №2. С. 786–790.
10. Lehman B., Worrell E., Electricity Production from Natural Gas Pressure Recovery Using Expansion Turbines // Engineering, Environmental Science. 2009. Pp. 43–54.
11. Li Z.-D., Cheng Q.-L., Chen Y.-W., Wei J.-D., Li-Li Lv, Wu H., Liu Y. Electric power generation technology of natural gas pressure reduction: Insights from black box-gray box hierarchical exergy analysis and evaluation method // Petroleum science. 2022. No. 19(1). Pp.329–338.
12. Александров А.А., Агабабов В.С., Джураева Е.В., Корягин А.В., Утенков В.Ф. Анализ совместной работы детандер-генераторного агрегата и теплового насоса // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2004. № 7(8). С. 50–60.
13. Kuczyński S., Łaciak M., Olijnyk A., Szurlej A., Włodek T. Techno-Economic assessment of turboexpander application at natural gas regulation stations // Energies. 2019. No. 12(4). 755.



14. Çengel Y.A., Boles M.A., Kanoglu M. Thermodynamics: an Engineering Approach. 9th ed. New York: Mcgraw-Hill Education, 2019. 984 p.

15. Коршак А.А. Газораспределение: учебник для вузов. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. 596 с.

16. DWSIM – Open-Source Chemical Process Simulator [Электронный ресурс]. URL: <https://dwsim.org/> (дата обращения: 06.02.2025).

#### Информация об авторах

**Колос Эдвард Михайлович**, студент магистратуры кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и хранилищ. E-mail: kolos.edvard@yandex.ru. Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина. Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., д. 65к1.

**Малышев Илья Игоревич**, студент магистратуры департамента нефтегазовых технологий и нефтехимии. E-mail: kolos.edvard@yandex.ru. Дальневосточный федеральный университет. Россия, 690922, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, д. 10.

**Глобенко Сергей Алексеевич**, студент магистратуры департамента нефтегазовых технологий и нефтехимии. E-mail: kolos.edvard@yandex.ru. Дальневосточный федеральный университет. Россия, 690922, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, д. 10.

**Сергеев Эдуард**, студент магистратуры кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и хранилищ. E-mail: ed.sergeyev.2002@mail.ru. Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина. Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., д. 65к1.

**Ишкуватов Рустам Русланович**, студент магистратуры кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и хранилищ. E-mail: ishkuvatov.r@mail.ru. Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина. Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., д. 65к1

**Кроткова Инна Леонидовна**, студент магистратуры кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и хранилищ. E-mail: innakrotkova@list.ru. Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина. Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., д. 65к1.

Поступила 06.02.2025 г.

© Колос Э.М., Малышев И.И., Глобенко С.А., Сергеев Э., Ишкуватов Р.Р., Кроткова И.Л., 2025

<sup>1,\*</sup>*Kolos E.M., <sup>2</sup>Malyshev I.I., <sup>2</sup>Globenko S.A. <sup>1</sup>Sergeyev E., <sup>1</sup>Ishkuvatov R.R., <sup>1</sup>Krotkova I.L.*

<sup>1</sup>*Gubkin Russian State University of Oil and Gas*

<sup>2</sup>*Far Eastern Federal University*

<sup>\*</sup>*E-mail: kolos.edvard@yandex.ru*

## OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION AT GAS DISTRIBUTION STATIONS USING TURBOEXPANDERS: MODELING AND ANALYSIS

**Abstract.** The article deals with the relevant problem of energy consumption optimization at gas regulation stations (GRS) using turboexpanders. Most of the potential energy of compressed gas transferred to it at compressor stations of the main gas pipeline is traditionally consumed in the process of reduction. In the context of the global movement towards energy saving and in accordance with the energy strategy of the Russian Federation, the issue of utilization of energy released during reduction is becoming more and more urgent. Turbodetanders make it possible to convert this energy into electrical energy, which can be used for economic needs of the gas distribution station or for gas heating, preventing hydrate formation. The article presents a computer model developed to analyze the operation of turboexpanders at GDS. The model allows to calculate the energy balance of the station, as well as to determine the gas temperature after throttling in the turboexpander. The calculations demonstrate that the use of turboexpanders not only increases the energy efficiency of the gas distribution station, but also ensures compliance with the regulatory requirements to the gas temperature at the outlet. The results of the study confirm the feasibility of introducing turboexpanders at gas distribution stations as an effective tool for energy saving and improving the stability of gas transportation systems.

**Keywords:** gas regulation station (GRS), turboexpander, energy saving, gas reduction, energy balance, computer modeling, energy utilization, hydrate formation, gas heating, energy efficiency.

## REFERENCES

1. Zatsepin S.S., Kuptsov S.M. Application of turboexpander units at gas distribution stations [Primenenie turbodetandernyh ustanovok na gazoraspredeletel'nyh stanciyah]. Territory Neftegaz. 2016. No.12. Pp. 50–53. (rus)
2. Mikaelyan E.A. Modernization of gas distribution systems with the use of utilization turboexpander units. [Modernizaciya gazoraspredeletel'nyh sistem s primeneniem utilizacionnyh turbodetandernyh ustanovok] Territory Neftegaz. 2015. No. 9. Pp. 36–39. (rus)
3. Al-Ismail F.S. A comprehensive and critical review on integrated electric power and gas networks, 'IEEE Access. 2024. Vol. 12. Pp. 143042–143057.
4. Gas turboexpanders. Ipieca. 2023. URL: <https://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-compendium/gas-turboexpanders-2023>. (accessed on 06.02.2025)
5. Voronov, V.A. Increase of energy characteristics of a gas distribution station by application of a turboexpander [Povyshenie energeticheskikh harakteristik gazoraspredeletel'noj stancii putem primeneniya turbodetandera] International Research Journal. 2017. No. 4 (58). Pp. 1–5 (rus)
6. Chernykh A.P. Turbine drive utilization for electric power and heat generation at the gas industry facilities [Ispol'zovanie turbinogo privoda dlya polucheniya elektroenergii i tepla na ob"ektah gazovoj promyshlennosti] Gas industry. 2017. No. 2 (748). Pp. 82–88. (rus)
7. Urvanov S.V., Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Skvortsov D.S. Development and study of the existing possibilities of application of a detander-generator unit for a gas distribution station using a heat pump unit as a gas heating system [Razrabotka i issledovanie sushchestvuyushchih vozmozhnostej primeneniya detander-generatornogo agregata dlya gazoraspredeletel'noj stancii s ispol'zovaniem v kachestve sistemy podogreva gaza teplovoj nasosnoj ustanovki] Bulletin of SUSU. Series: Energy. 2017. No. 2. Pp. 5–13. (rus)
8. Kapysh V.V., Kulemin N.V., Istomin V.A. Prevention of hydrate formation in gas pipeline branches and gas distribution stations [Preduprezhdenie gidratobrazovaniya v gazoprovodah-otvodah i na gazoraspredeletel'nyh stanciyah]. Bulletin of Gas Science. 2013. No. 4 (15). Pp. 125–131. (rus)
9. Kerimov I.A., Saidov A.A., Bataev D. K., Debiev M.V. Economic aspects of the use of detander-generator units in the system of gas networks of the Chechen Republic [Ekonomicheskie aspekty ispol'zovaniya detander-generatornyh agregatov v sisteme gazovyh setej CHECHENSKOJ Respubliki]. Bulletin of Russian Universities. Mathematics. 2012. No. 2. Pp. 786–790. (rus)
10. Lehman B., Worrell E., Electricity Production from Natural Gas Pressure Recovery Using Expansion Turbines. Engineering, Environmental Science. 2009. Pp. 43–54.
11. Li Z.-D., Cheng Q.-L., Chen Y.-W., Wei J.-D., Li-Li Lv, Wu H., Liu Y. Electric power generation technology of natural gas pressure reduction: Insights from black box-gray box hierarchical exergy analysis and evaluation method. Petroleum science. 2022. No. 19(1). Pp. 329–338.
12. Aleksandrov A. A., Agababov V. S., Dzhuraeva E. V. V., Koryagin A. V. V., Utenkov V. F. Analysis of joint operation of a detandar-generator unit and a heat pump [Analiz sovместnoj raboty detandar-generatornogo agregata i teplovogo nasosa]. Izvestiya Vuzov. Problems of power engineering. 2004. No. 7-8. Pp. 50–60. (rus)
13. Kuczyński S., Łaciak M., Olijnyk A., Szurlej A., Włodek T. Techno-Economic assessment of turboexpander application at natural gas regulation stations, Energies. 2019. No. 12(4). 755.
14. Çengel Y.A., Boles M.A., Kanoglu M. Thermodynamics: an Engineering Approach. 9th ed. New York: Mcgraw-Hill Education, 2019. 984 p.
15. Korshak A.A. Gas distribution: textbook for universities [Gazoraspredeletel'nyy uchebnik dlya vuzov]. Moscow, Vologda: Infra-Engineering, 2022. 596 p. (rus)
16. DWSIM - Open-Source Chemical Process Simulator. URL: <https://dwsim.org/> (accessed on 06.02.2025)

*Information about the authors*

**Kolos, Edward M.** Master student. E-mail: kolos.edva@yandex.ru Gubkin Russian State University of Oil and Gas. Russia, 119991, Moscow, Leninski Prospect, 65.

**Malyshev, Ilya I.** Master student. E-mail: malyshev.ii@dvfu.ru. Far Eastern Federal University. Russia, 690922, Vladivostok, Russky is., Ajax settlem., 10.

**Globenko, Sergey A.** Master student. E-mail: globenko.sa@students.dvfu.ru. Far Eastern Federal University. Russia, 690922, Vladivostok, Russky is., Ajax settlem., 10.

**Sergeyev, Eduard.** Master student. E-mail: ed.sergeyev.2002@mail.ru. Gubkin Russian State University of Oil and Gas. Russia, 119991, Moscow, Leninski Prospect, 65.

**Ishkuvatov, Rustam R.** Master student. E-mail: [ishkuvatov.r@mail.ru](mailto:ishkuvatov.r@mail.ru). Gubkin Russian State University of Oil and Gas. Russia, 119991, Moscow, Leninski Prospect, 65.

**Krotkova, Inna L.** Master student. E-mail: [innakrotkova@list.ru](mailto:innakrotkova@list.ru). Gubkin Russian State University of Oil and Gas. Russia, 119991, Moscow, Leninski Prospect, 65.

---

*Received 06.02.2025*

**Для цитирования:**

Колос Э.М., Малышев И.И., Глобенко С.А., Сергеев Э., Ишкуватов Р.Р., Кроткова И.Л. Оптимизация энергопотребления на газораспределительных станциях с использованием турбодетандеров: моделирование и анализ // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 9. С. 104–114. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-104-114

**For citation:**

Kolos E.M., Malyshev I.I., Globenko S.A., Sergeyev E., Ishkuvatov R.R., Krotkova I.L. Optimization of energy consumption at gas distribution stations using turboexpanders: modeling and analysis. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 9. Pp. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-104-114

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-115-124

<sup>1,\*</sup>Качаев А.Е., <sup>2</sup>Орехова Т.Н., <sup>2</sup>Уральский А.В.<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт орошения и сельхозводоснабжения «Радуга»<sup>2</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: doctor\_cement@mail.ru

## ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ПНЕВМОСМЕСИТЕЛЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

**Аннотация.** В настоящем исследовании смоделировано движение двухфазного потока с различными по форме частицами численными методами в программе SolidWorks Simulation. В результате исследования определены параметры усредненных скоростей двухфазного потока в смесительной камере: использовался дифференцированный подход нахождения одиночной частицы в потоке несущей среды. Подтверждена идентичность уравнений математической модели вихревого движения двухфазного потока внутри смесительной камеры пневмосмесителя с траекториями и скоростями двухфазного потока, смоделированного в программе SolidWorks Simulation. Представлены результаты численного моделирования усредненных скоростей двухфазного потока в смесительной камере: для частицы и несущей среды. Проведена верификация математической модели вихревого движения двухфазного потока с результатами численного моделирования двухфазного потока в пневмосмесителе с помощью расчетного комплекса SolidWorks Simulation. Установлено, что расхождение между численными методами моделирования и математическими (аналитическими) не превышает для несущей среды – 8,55 %, а для частиц различной формы – 5,70 %. Полученные результаты исследования могут быть использованы в качестве основного подхода в верификации технологических процессов в оборудовании, которые могут быть рассчитаны как аналитическими (математическими), так и численными методами.

**Ключевые слова:** пневмосмеситель, частица, несущая среда, смешение, двухфазный поток, смесительная камера, верификация.

**Введение.** В современных условиях развития строительного материаловедения возникают вопросы разработки эффективного технологического оборудования [1]. В промышленности строительных материалов существуют различные переделы, на которых используются дробилки и мельницы, смесители и гомогенизаторы, транспортирующее оборудование и пылеуловители. Гибкие технологические комплексы, включающие в себя различное оборудование (перечисленное выше), являются объектом эффективной конкуренции в строительной отрасли [2].

Конкурентоспособность отечественного оборудования для производства смесей различного назначения повышается в виду работы, проводимой в рамках импортозамещения. Совершенствуются технологии перемешивания дисперсных компонентов [3]: разрабатываются новые составы сухих строительных смесей, исследуются свойства дисперсно-армирующих составов на прочность элементов строительных конструкций и др. В развитии технологии смешения полидисперсных компонентов при моделировании процессов в оборудовании используются современные информационные технологии [4].

Численное моделирование технологических процессов в аппаратах с высокой динамикой не-

сущей среды (воздуха) позволяет не только верифицировать математическую модель описания движения частиц в таком потоке внутри замкнутого пространства, но и наглядно увидеть возможные технологические особенности таких аппаратов. Актуальность исследований в вопросах численного моделирования технологического оборудования и процессов, протекающих в них, для строительной отрасли обосновывается эффективностью работы такого оборудования, его экономической эффективностью (низкими энергозатратами на единицу производительности) и конкурентоспособностью. Поэтому численный расчет основного технологического оборудования – смесителя – для различных типов смесей является необходимым с точки зрения выяснения всех вопросов, связанных с его эффективной эксплуатацией и экономической целесообразностью применения [5].

**Целью** настоящего исследования является верификация численного расчета осредненных скоростных параметров двухфазного потока (определение скоростей несущей среды и частиц) для пневмосмесителя непрерывного действия с разработанными ранее математическими моделями.

**Методы и объект исследования.** Исследование пневмосмесителя [6] проводилось с помощью численного моделирования динамики двухфазного потока, которое позволяет определить основные кинематические параметры несущей среды и твердой фазы (частиц) в смесительной камере агрегата. Выбранный метод исследования в дальнейшем поможет верифицировать математическую модель вихревого движения двухфазного потока в геометрическом объеме пневмосмесителя, описанную в работе [7].

С помощью пакета программ SolidWorks Simulation моделировались скоростные условия работы [8] пневмосмесителя: дифференцированный подход к определению параметров скорости несущей среды проводился для различных участков пневмосмесителя (вход смесительной камеры рассматривается как место падения скорости двухфазного потока, выход из смесительной камеры – как место разгрузки готовой смеси), после чего результаты объединялись и накладывались друг на друга. При таком подходе можно численно определить скоростные параметры движения воздуха с твердыми частицами поли-

дисперсных и волокнистых компонентов в любом геометрическом пространстве пневмосмесителя рассматриваемой конструкции.

Объектом исследования является пневмосмеситель [6], устройство которого показано на рис. 1. Предназначен пневмосмеситель для интенсивного перемешивания дисперсно-армированных смесей с различным размером частиц исходных компонентов (например, анизотропных материалов – армирующих волокон, изотропных материалов – вяжущих и технологических добавок). Конструкция пневмосмесителя спроектирована таким образом, чтобы в объеме смесительной камеры агрегата не было застойных зон, где мог бы накапливаться плохо перемешанный продукт. Криволинейная смесительная камера позволяет по всей своей длине изменять скорость двухфазного потока, что необходимо в момент интенсивного перемешивания материала в начале камеры до момента эффективной выгрузки готового продукта из нее. Для исследуемого агрегата представим расчетную схему, относительно которой разрабатывалась математическая модель с учетом ранее выполненных исследований в работах [7, 9].

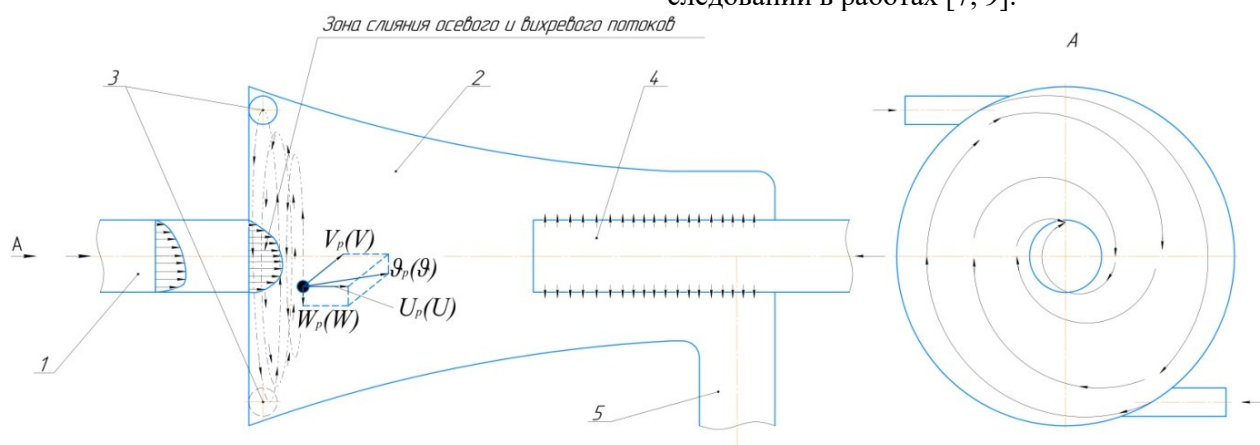


Рис. 1 Расчетная схема для математического моделирования динамики двухфазного потока внутри смесительной камеры пневмосмесителя:

- 1 – транспортирование компонентов смеси по разгонному узлу;  
2 – камера гомогенизации; 3 – тангенциальный поддув воздуха; 4 – узел аэрации и дезагрегации смеси;  
5 – разгрузочный патрубок.

Отработка результатов численного моделирования процесса смешения различных компонентов с армирующими волокнами и натурных исследований проводилась на опытно-экспериментальном образце пневмосмесителя, показанном на рис. 2. В соответствии с целью настоящего исследования необходимо численно определить параметры скоростных характеристик двухфазного потока в рабочем объеме пневмосмесителя и верифицировать их относительно математических моделей динамики двухфазного потока, изложенных в работах [7, 9].

Верификация результатов математических моделей технологических процессов необходима для выявления возможных факторов, которые не были учтены при их разработке [10–11].

При математическом моделировании смешения и динамики двухфазного потока внутри смесительной камеры агрегата используются уравнения газовой динамики с дисперсными частицами [12–14]. Такое моделирование процессов в оборудовании позволяет рассматривать поведение отдельно взятой частицы в несущей среде с учетом геометрии смесительной камеры.





Рис. 2. Экспериментальная установка пневмосмесителя

Абсолютная скорость несущей среды и частицы определяется из выражения [7]:

$$g(g_p) = \sqrt{[V(V_p)]^2 + [W(W_p)]^2 + [U(U_p)]^2}, \quad (1)$$

где  $V_p$ ,  $W_p$ ,  $U_p$  – радиальная, тангенциальная и осевая скорости частицы в смесительной камере пневмосмесителя, м/с;  $V$ ,  $W$ ,  $U$  – радиальная, тангенциальная и осевая скорости несущей среды (воздуха), м/с.

В исследовании рассматривается пространственная вихревая модель динамики воздуха с твердыми частицами в объеме смесительной камеры агрегата. В настоящих расчетах скоростей частиц пренебрегаем величиной силы, учитывающей ее вращение на различных участках тракта двухфазного потока, ввиду её незначительного влияния [15].

В настоящем исследовании, как и в работах [7, 9], радиальную, тангенциальную и осевую скорости движения воздуха и частицы перемещаемых материалов определяем расстоянием от оси их горизонтального вращения и временными интервалами без соударений со стенками смесительной камеры. Математически динамику частицы произвольной формы в вихревом потоке центробежного поля смесительной камеры пневмосмесителя запишем в виде следующей системы уравнений [7]:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = \frac{(V - V_p)}{\tau} - \frac{1}{\rho_p} \frac{\partial p}{\partial R} + \frac{W_p^2}{R}, \\ \frac{dW}{dt} = \frac{(W - W_p)}{\tau} + \frac{V_p \cdot W_p}{R}, \\ \frac{dU}{dt} = \frac{(U - U_p)}{\tau} - \frac{1}{\rho_p} \frac{\partial p}{\partial z} + g, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\rho_p$  – плотность отдельных частиц смешиваемых компонентов, кг/м<sup>3</sup>;  $R$  – начальный радиус

смесительной камеры, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $p$  – давление несущей среды (воздуха) на частицу материала в двухфазном потоке, Па;  $z$  – вертикальная координата положения частицы в двухфазном потоке, м.

Начальные условия для решения системы (2):

$$\{t = 0; \quad R = 1; \quad z = 0; \quad V_p = 0; \quad W_p = 0; \quad U_p = 0. \quad (3)$$

Радиальная, тангенциальная и осевая составляющие абсолютной скорости несущей среды (воздуха) в вихревом потоке рассчитывались по выражениям средних показателей, соответственно [7]:

$$\bar{V} = \frac{t \left[ \rho_p \left( \bar{W}_p^2 - \bar{\lambda} \bar{V}_p \bar{R} \right) - p \right]}{\bar{R} \cdot \rho_p (1 - \bar{\lambda} t)}, \quad (4)$$

$$\bar{W} = \frac{\bar{W}_p \cdot t \cdot \left[ \left( \bar{V}_p - \bar{\lambda} \bar{R} \right) \right]}{\bar{R} (1 - \bar{\lambda} t)}, \quad (5)$$

$$\bar{U} = \frac{t \left( \bar{\lambda} \bar{V}_p + \frac{p}{\rho_p \cdot z} \right)}{(1 - \bar{\lambda} t)}, \quad (6)$$

где  $\bar{\lambda}$  – безразмерная величина ( $\bar{\lambda} = \frac{1}{\tau}$ ) для осреднения показателей скоростей в выражениях (4 – 6) на основании результатов работы [11].

Вычисление величин составляющих скоростей несущей среды производится также, как и в математической модели [7] по выражениям (4–6) с учетом только заданных характеристик воздуха (плотности воздуха).

**Основная часть.** Рассмотрим результаты численного моделирования двухфазного потока при различных режимах работы пневмосмесителя. Используем кинематические осредненные показатели несущей среды (воздуха) и отдельных

частиц в объеме смесительной камеры пневмосмесителя, представленные в выражениях (4 – 6). С помощью математической модели динамики вихревого потока в смесительной камере пневмосмесителя, представленной в работе [7], проведем верификацию полученных результатов численного расчета с помощью программного комплекса SolidWorks Simulation.

На рис. 3 смоделированы две ситуации: а) – когда давление подачи основных компонентов больше давления в азраторе  $P_1 > P_2$  (0,253 МПа в трубопроводе подачи компонентов против 0,2026 МПа в азраторе); б) – когда давление подачи основных компонентов меньше чем в азраторе  $P_1 < P_2$  (0,2026 МПа в трубопроводе подачи компонентов против 0,253 МПа в азраторе). Эти два режима работы пневмосмесителя рассматриваются на основании образования в смесительной камере агрегата возможных обратных течений (это

было установлено в результате моделирования в SolidWorks Simulation). Такой подход позволит минимизировать негативные последствия от образования обратных течений и определенным образом интенсифицировать процесс смешения компонентов.

Рис. 3, а показывает результаты моделирования средней абсолютной скорости несущей среды в пневмосмесителе. На входе в пневмосмеситель ее величина составляет 47 м/с, в конце смесительной камеры (на выгрузке) – 8,2 м/с. При этом наблюдается вихревое движение несущей среды, что необходимо для эффективного перемешивания компонентов внутри смесительной камеры. Здесь условием такой динамики несущей среды (двухфазного потока) будет являться разница давления  $P_1 > P_2$  и конструктивная геометрическая особенность камеры – форма криволинейного конфузора.

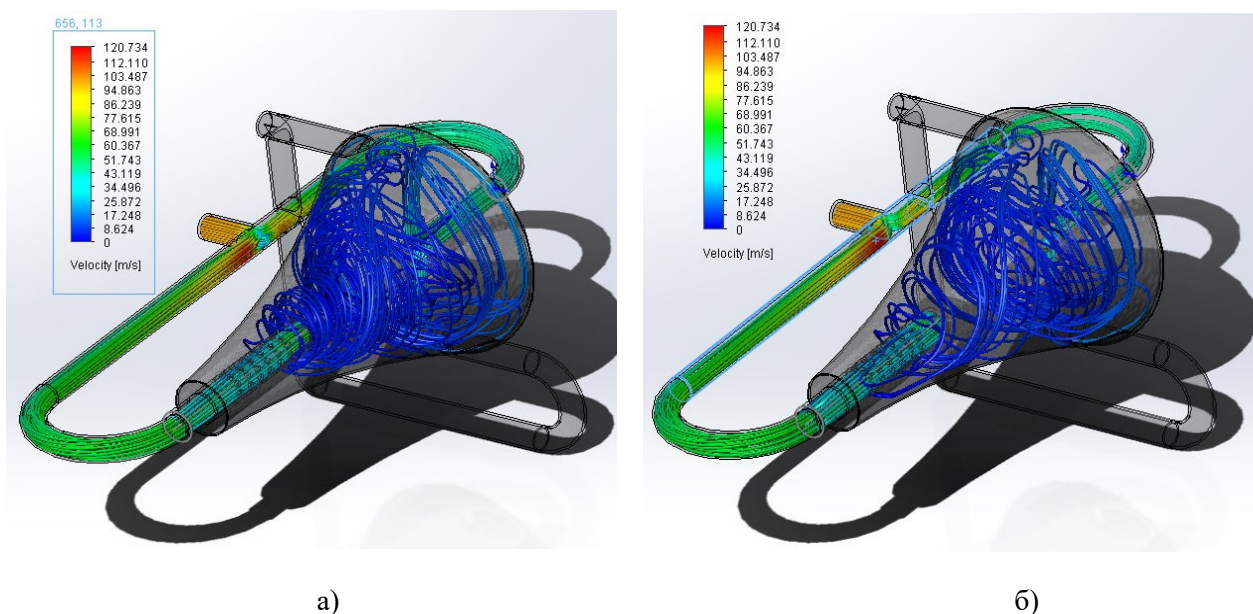


Рис. 3. Распределение скоростей несущей фазы в объеме пневмосмесителя: а) – при  $P_1 > P_2$ ; б) – при  $P_1 < P_2$

Случай на рис. 3, б имитирует разницу давления  $P_1 < P_2$  и показывает, что при таких условиях работы пневмосмесителя пониженного давления  $P_1$  (относительно давления в азраторе  $P_2$ ) не достаточно для формирования эффективного вихревого потока: наблюдается снижение его интенсивности и скоростных показателей несущей среды с 27,4 м/с на входе в смесительную камеру до 4,9 м/с на выходе из нее. Поэтому этот режим не рассматриваем в исследовании, так как он наименее эффективный, чем представленный условием  $P_1 > P_2$ .

По аналогии с рассматриваемыми случаями на рис. 3 смоделируем кинематику частиц сферической формы с  $d_{cp} = 40$  мкм и анизотропной формы с  $d_{cp} = 40$  мкм и  $l = 1$  мм (где  $l$  – длина

частицы). На рис. 4, а показана средняя скоростная характеристика потока частицы с  $d_{cp} = 40$  мкм. На входе в смесительную камеру абсолютная скорость частицы при таком размере равна 46,1 м/с, на выходе из смесительной камеры – 7,8 м/с.

Рис. 4, б устанавливает средний скоростной режим анизотропной частицы: на входе в смесительную камеру средняя скорость частицы составляет 44,7 м/с, а на выходе из нее – 6,1 м/с. Разница в скоростном режиме движения между сферической и анизотропной частицами при условии  $P_1 > P_2$  обусловлена парусностью анизотропных частиц и более высоким их сопротивлением в потоке несущей среды относительно аналогичного показателя сферической частицы.

Из численных результатов, представленных выше и полученных путем моделирования динамики анизотропной частицы в несущем потоке энергоносителя (воздуха), видим, что скоростные параметры анизотропной частицы на входе и на выходе из смесительной камеры по сравнению со сферической частицей на 9,5% и 21% меньше, соответственно. Поэтому делаем вывод, что при пе-

ремешивании смесей с анизотропными частицами, например, базальтовыми волокнами, необходимо интенсифицировать процесс смешения на входе двухфазного потока в смесительную камеру для подобной конструкции пневмосмесителя. Этого можно добиться с помощью повышения скоростного режима движения двухфазного потока на входе в смесительную камеру.

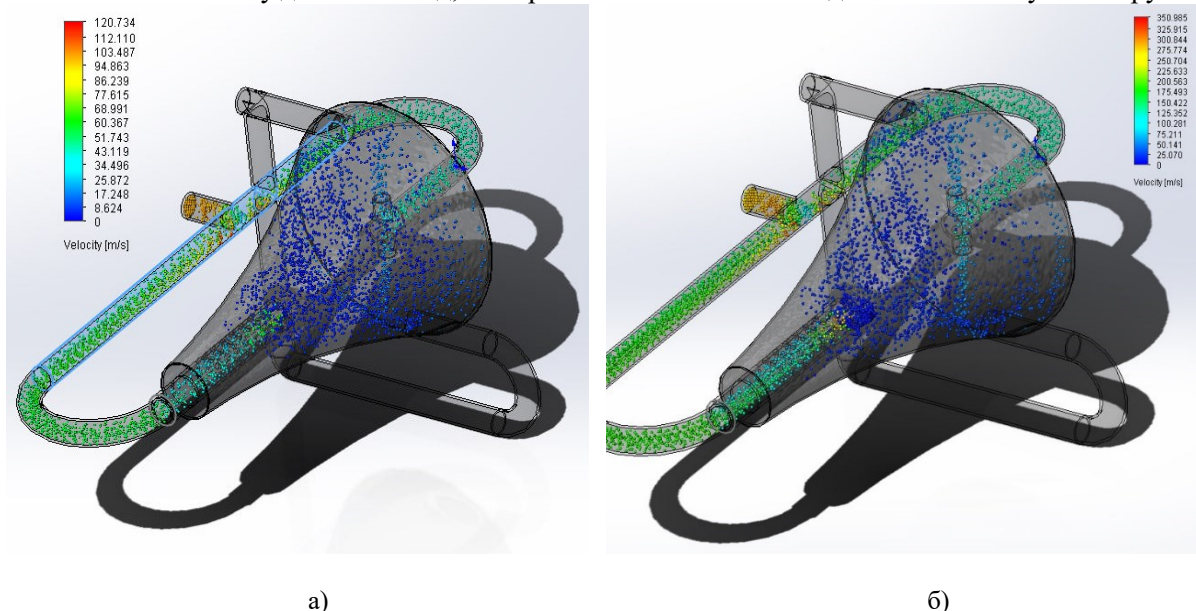


Рис. 4. Распределение средней скорости частицы в объеме смесительной камеры пневмосмесителя:  
а) – для сферической частицы при  $d_{cp} = 40$  мкм; б) – для анизотропной частицы при  $d_{cp} = 40$  мкм и  $l = 1$  мм

На рис. 5 показаны траектории и средние скорости несущей среды и твердых анизотропных частиц. Усредненная скорость несущей среды на входе в смесительную камеру при увеличении давления  $P_1$  с 0,258 МПа до 0,405 МПа составит 68,1 м/с, на выходе 13,2 м/с. При этом скорость несущей среды на выходе из аэратора  $P_2$  будет по-прежнему меньше  $P_1$  и составит 49,2 м/с

(рис. 5, а). Показатели скоростных режимов подачи энергоносителя в смесительную камеру влияют на качество получаемых смесей. Этому вопросу будет посвящены дальнейшие исследования пневмосмесителя непрерывного действия. Численные результаты моделирования несущей среды в пневмосмесителе требуют верификации с математической моделью двухфазного потока, полученной в работе [7].

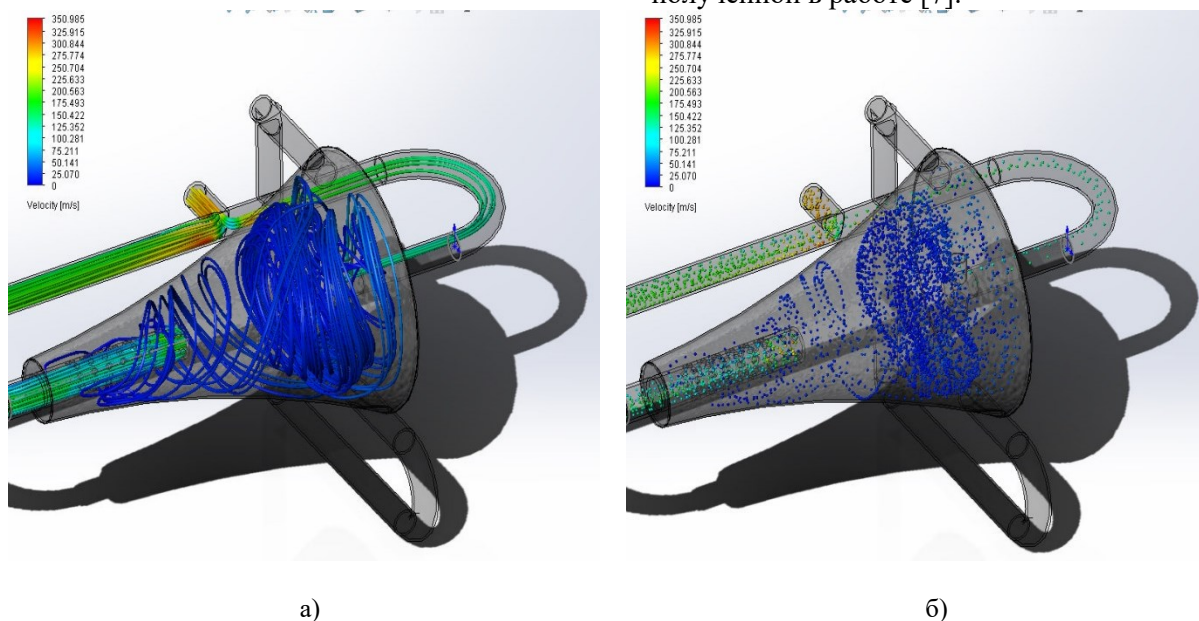


Рис. 5. Распределение средней скорости двухфазного потока в объеме смесительной камеры пневмосмесителя:  
а) несущая среда; б) анизотропная частицы при  $d_{cp} = 40$  мкм и  $l = 1$  мм



Рис. 5, 6 устанавливает траектории и средние скорости частиц анизотропной формы. Визуализация численных расчетов скоростей несущей среды и частиц показывает идентичность траекторий, по которым движется двухфазный поток. На входе в смесительную камеру средняя скорость частицы равна 63,8 м/с, на выходе из камеры – 11,4 м/с. Скорости частицы на выходе их смесительной камеры высокая и требует установки в технологической линии после пневмосмесителя дополнительного вспомогательного обеспыливающего оборудования. Эту проблему можно решить с помощью установки циклонного аппарата, под реальную производительность пневмосмесителя разработанной конструкции [16-17].

Для интенсификации процесса смешения компонентов в особенности смесей, в составе которых присутствуют частицы анизотропных материалов, в конструкции пневмосмесителя предусмотрен тангенциальный периферийный поддув дополнительного энергоносителя (воздуха). Это связано с тем, что на входе и несущая среда, и частицы резко начинают терять свою скорость, двигаясь в направлении разгрузки - к аэратору (поз. 3, рис. 1) [18–19]. На рис. 6 показано численное моделирование динамики анизотропной частицы в потоке энергоносителя. Средняя скорость двухфазного потока в зоне ввода дополнительного энергоносителя составляет 73,4 м/с. Этот параметр для дальнейших исследова-

ний тоже будет требовать оптимизации в зависимости от состава и средневзвешенного размера частиц в смеси.

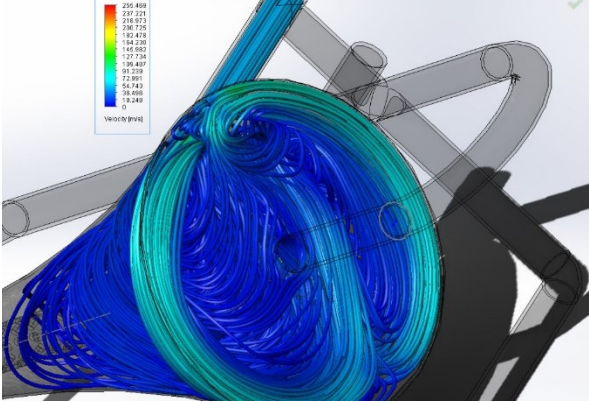


Рис. 6. Распределение средней скорости анизотропной частицы ( $d_{cp} = 30$  мкм при  $l = 1$  мм) в объеме пневмосмесителя при тангенциальном поддуве энергоносителя

В соответствии с полученными результатами численного моделирования в программном комплексе SolidWorks Simulation проведем верификацию с математической моделью, разработанной в работе [7]. Результаты верификации средних показателей скоростей несущей среды и частиц различной формы представлены в табл. 1. Условные обозначения: SWS – результаты численного моделирования двухфазного потока в SolidWorks Simulation; MM - результаты численного расчета динамики двухфазного потока по математической модели, изложенной в работе [7];  $\Delta$  – расхождение между результатами, %.

Таблица 1

**Результаты верификации численных расчетов средних скоростных параметров двухфазного потока на входе в пневмосмеситель по работе [7] с результатами моделирования в SolidWorks Simulation**

Параметр	P <sub>1</sub> = 0,258 МПа			P <sub>1</sub> = 0,405 МПа		
	SWS	ММ	Δ, %	SWS	ММ	Δ, %
	Средняя скорость, м/с			Средняя скорость, м/с		
Несущая среда (воздух)	47	51,4	8,55	68,1	73,1	6,85
Сферическая частица (d <sub>ср</sub> = 40 мкм)	46,1	48,2	4,35	–	–	–
Анизотропная частица (d <sub>ср</sub> = 40 мкм и l = 1 мм)	44,7	47,4	5,70	63,8	66,3	3,77

Таким образом, верификация расчета средней скорости двухфазного потока в пневмосмесителе в специализированной программе SolidWorks Simulation с результатами расчета по математической модели, представленной в работе [7], подтверждается достаточно высокой сходимостью (по несущей среде – воздуху – наблюдается наибольшее расхождение результатов). Возможно это связано с кинематическими параметрами воздуха, используемыми решателем в программном комплексе SolidWorks Simulation.

**Выводы.** Смоделировано движение двухфазного потока с различными по форме частицами численными методами в программе SolidWorks Simulation. Установлены параметры средних скоростей несущей среды и частиц в потоке на входе в смесительную камеру и на выходе из нее. Подтверждена идентичность уравнений математической модели с идентичностью траекторий и скоростей двухфазного потока, смоделированного в программе SolidWorks Simulation. Проведена верификация математической модели вихревого движения двухфазного потока с ре-

зультатами численного моделирования двухфазного потока в пневмосмесителе с помощью расчетного комплекса SolidWorks Simulation. Установлено, что расхождение между численными методами моделирования и математическими не превышает для несущей фазы – 8,55 %, а для твердой фазы – 5,70 %.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Севостьянов В.С., Ключев С.В., Севостьянов М.В., Бабуков В.А., Проценко А.М. Технологический комплекс для производства композиционных смесей с техногенными материалами // СТИН. 2022. № 12. С. 11–14.
2. Севостьянов М.В., Агеева М. С., Севостьянов В. С., Фомина Е.В., Проценко А.М., Бабуков В.А., Шамгулов Р.Ю. Высокотехнологичное оборудование и технологии для производства композиционных смесей с техногенными компонентами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 7. С. 98–110. DOI:10.34031/2071-7318-2024-9-7-98-110.
3. Коробчук М.В., Веригин А.Н. Обзор современных вибрационных смесителей сыпучих материалов и тенденции их развития // Южно-Сибирский научный вестник. 2020. № 4(32). С. 32–45.
4. Царев М.В., Андреев Ю.С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 7. С. 517–531. DOI:10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531.
5. Fadin Yu.M., Shemetova O.M., Voronov V.P., Bogdanov V.S. Research Study of Mixing Processes in the Pneumatic Mixer for Dry Construction Mixes // Innovations and Technologies in Construction, Белгород, 09–10 марта 2022 года. Vol. 307. – RUS: Springer Nature Switzerland AG, 2023. Pp. 243–252. DOI:10.1007/978-3-031-20459-3\_31.
6. Пат. № 141488, МПК B01F 5/00. Противоточный пневмосмеситель для производства дисперсно-армированных смесей: / Т. Н. Орехова, В. А. Уваров, С. В. Ключев, А. Е. Качаев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова". № 2013159013/05: заявл. 30.12.2013: опубл. 10.06.2014.
7. Качаев А.Е., Орехова Т.Н. Описание вихревого движения двухфазного потока в пневмосмесителе непрерывного действия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 121–125. DOI 10.12737/article\_590878fb7932c3.02818288.
8. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 448 с.
9. Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Окушко В.В., Шестаков Ю.Г. Механика взвешенного слоя с полидисперсными частицами в пневмосмесителях непрерывного действия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 121–127. DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-3-121-127.
10. Железнякова А.Л. Технологии верификации и валидации в численном газодинамическом моделировании // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2018. Т. 19, № 2. С. 8.
11. Сальников А.В., Французов М.С., Виноградов К.А., Пятунин К.Р., Никулин А.С. Верификация и валидация компьютерных моделей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 9. С. 100–115. DOI:10.18698/0536-1044-2022-9-100-115
12. Вараксин А.Ю. Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований (обзор) // Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58, № 4. С. 646–669. DOI:10.31857/S004036442004016X.
13. Смольский И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. Новосибирск: Наука. 1992. 301 с.
14. Hong-Quan Zhang, Cem Sarica. A Model of Wetted-Wall Fraction and Gravity Center of Liquid Film in Gas/Liquid Pipe Flow. SPE Journal, 2011, Vol. 16, No 3. Pp. 692–697.
15. Вараксин А.Ю. Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований (обзор) // Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58, № 4. С. 646–669. DOI:10.31857/S004036442004016X
16. Красовицкий Ю.В., Лобачева Н.Н., Романюк Е.В., Пигловский Н.В., Галиахметов Р.Ф. Особенности эксплуатации пылеуловителей при производстве строительных материалов // Строительные материалы. 2011. № 2. С. 63–65.
17. Агарков А.М. Направления совершенствования конструкций циклонных аппаратов // Эпоха науки. 2015. № 4. С. 89.
18. Кашапов Ф.Р., Ромашкин И.К., Симонов Л.А. Плоские, прямоугольные и осесимметричные конфузоры // Ученые записки ЦАГИ. 1983. Т. 14, № 3. С. 51–58.
19. Gidaspow D. Multiphase Flow and Fluidization. Boston: Academic Press, 1994. 467 p.

## Информация об авторах

**Качаев Александр Евгеньевич**, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела сельхозводоснабжения. E-mail: doctor\_cement@mail.ru. Всероссийский научно-исследовательский институт орошения и сельхозводоснабжения «Радуга». Россия, 140483, Московская область, Коломна, пос. Радужный, д. 38.

**Орехова Татьяна Николаевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: nefact@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Уральский Алексей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: alexx\_1984.10@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 11.04.2025 г.

© Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Уральский А.В., 2025

<sup>1</sup>\*Kachaev A.E., <sup>2</sup>Orehova T.N., <sup>2</sup>Uralsky A.V.

<sup>1</sup>All-Russian Research Institute of Irrigation and Agricultural Water Supply "Raduga"

<sup>2</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

\*E-mail: doctor\_cement@mail.ru

## VERIFICATION OF THE RESULTS OF NUMERICAL AND MATHEMATICAL MODELING OF TWO-PHASE FLOW IN A CONTINUOUS-ACTION PNEUMATIC MIXER

**Abstract.** In this study, the motion of a two-phase flow with particles of different shapes is simulated using numerical methods in the SolidWorks Simulation program. In the course of the study, the parameters of the average velocities of the carrier medium and particles in the flow at the inlet and outlet of the mixing chamber were established. The identity of the equations of the mathematical model of the vortex motion of a two-phase flow inside the mixing chamber of a pneumatic mixer with the trajectories and velocities of a two-phase flow simulated in the SolidWorks Simulation program is confirmed. The results of numerical modeling of the average absolute velocities of a two-phase flow in a mixing chamber are presented, which reflect the kinematic parameters for the carrier medium and particles at the inlet and outlet of the mixing chamber. The verification of the mathematical model of the vortex motion of a two-phase flow with the results of numerical modeling of a two-phase flow in a pneumatic mixer using the SolidWorks Simulation calculation complex is carried out. It has been established that the discrepancy between numerical and mathematical (analytical) modeling methods does not exceed 8.55% for the carrier medium and 5.70% for particles of different shapes. The obtained research results can be used as the main approach to verifying technological processes in equipment that can be calculated using both analytical (mathematical) and numerical methods.

**Keywords:** pneumatic mixer, particle, carrier medium, mixing, two-phase flow, mixing chamber, verification.

### REFERENCES

1. Sevostyanov V.S., Klyuev S.V., Sevostyanov M.V., Babukov V.A., Protsenko A.M. Technological complex for the production of composite mixtures with technogenic materials [Tekhnologicheskii kompleks dlya proizvodstva kompozitsionnykh smesey s tekhnogennymi materialami]. STIN. 2022. No. 12. Pp. 11–14. (rus)
2. Sevostyanov M.V., Ageeva M.S., Sevostyanov V.S., Fomina E.V., Protsenko A.M., Babukov V.A., Shamgulov R.Yu. High-tech equipment and technologies for the production of composite mixtures with technogenic components [Vysokotekhnologichnoye oborudovaniye i tekhnologii dlya proizvodstva kompozitsionnykh smesey s tekhnogennymi komponentami]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.. 2024. No. 7. Pp. 98–110. DOI:10.34031/2071-7318-2024-9-7-98-110. (rus)
3. Korobchuk M.V., Verigin A.N. Review of modern vibration mixers for bulk materials and their development trends [Obzor sovremennykh vibratsionnykh smesiteley sypuchikh materialov i tendentsii ikh razvitiya]. South Siberian Scientific Bulletin. 2020. No. 4(32). Pp. 32–45. (rus)
4. Tsarev M.V., Andreev Yu.S. Digital twins in industry: history of development, classification, technologies, use scenarios [Tsifrovyye dvoyniki v promyshlennosti: istoriya razvitiya, klassifikatsiya, tekhnologii, stsennarii ispol'zovaniya]. News of higher educational institutions. Instrument engineering. 2021. Vol. 64. No. 7. Pp. 517–531. DOI:10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531. (rus)



5. Fadin Yu.M., Shemetova O.M., Voronov V.P., Bogdanov V.S. Research Study of Mixing Processes in the Pneumatic Mixer for Dry Construction Mixes. *Innovations and Technologies in Construction*, Belgorod, March 09–10, 2022. Vol. 307. RUS: Springer Nature Switzerland AG, 2023. Pp. 243–252. DOI 10.1007/978-3-031-20459-3\_31.

6. Patent No. 141488, IPC B01F 5/00. Counter-current pneumatic mixer for the production of dispersed-reinforced mixtures: / T. N. Orekhova, V. A. Uvarov, S. V. Klyuev, A. E. Kachaev; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov". No. 2013159013/05: declared. 30.12.2013: published. 10.06.2014.

7. Kachaev A.E., Orekhova T.N. Description of the vortex motion of a two-phase flow in a continuous pneumatic mixer [Opisaniye vikhrevogo dvizheniya dvukhfaznogo potoka v pnevmosmesitele nepreryvnogo deystviya]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 5. Pp. 121–125. DOI: 10.12737/article\_590878fb7932c3.02818288. (rus)

8. Alyamovsky A.A. SolidWorks Simulation. How to solve practical problems [SolidWorks Simulation. Kak reshat' prakticheskiye zadachi]. SPb.: BHV-Petersburg,. 2012. 448 p. (rus)

9. Kachaev A.E., Orekhova T.N., Okushko V.V., Shestakov Yu.G. Mechanics of a suspended layer with polydisperse particles in continuous pneumatic mixers [Mekhanika vzveshennogo sloya s polidispersnymi chastitsami v pnevmosmesiteleyakh nepreryvnogo deystviya]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No. 3. Pp. 121–127. DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-3-121-127. (rus)

10. Zheleznyakova A.L. Verification and validation technologies in numerical gas-dynamic modeling [Tekhnologii verifikatsii i validatsii v chislenom gazodinamicheskom modelirovanii]. *Physico-chemical kinetics in gas dynamics*. 2018. Vol. 19, No. 2. Pp. 8–12. (rus)

11. Salnikov A.V., Frantsuzov M.S., Vinogradov K.A., Pyatunin K.R., Nikulin A.S. Verification and validation of computer models [Verifikatsiya i validatsiya komp'yuternykh modeley]. *News of*

higher educational institutions. *Mechanical Engineering*. 2022. No. 9. Pp. 100–115. DOI:10.18698/0536-1044-2022-9-100-115 (rus)

12. Varaksin A.Yu. Two-phase flows with solid particles, droplets and bubbles: problems and research results (review) [Dvukhfaznyye potoki s tverdymi chastitsami, kaplyami i puzyryami: problemy i rezul'taty issledovaniy (obzor)]. *High Temperature Thermophysics*. 2020. Vol. 58. No. 4. Pp. 646–669. DOI:10.31857/S004036442004016X. (rus)

13. Smulsky I.I. Aerodynamics and processes in vortex chambers [Aerodinamika i protsessy v vikhrevykh kamerakh]. Novosibirsk: Nauka. 1992. 301 p. (rus)

14. Hong-Quan Zhang, Cem Sarica. A Model of Wetted-Wall Fraction and Gravity Center of Liquid Film in Gas/Liquid Pipe Flow. *SPE Journal*, 2011, Vol. 16, No. 3. Pp. 692–697.

15. Varaksin A. Yu. Two-phase flows with solid particles, droplets and bubbles: problems and research results (review) [Dvukhfaznyye potoki s tverdymi chastitsami, kaplyami i puzyryami: problemy i rezul'taty issledovaniy (obzor)]. *High Temperature Thermophysics*. 2020. Vol. 58, No. 4. Pp. 646–669. DOI: 10.31857/S004036442004016X

16. Krasovitsky Yu.V., Lobacheva N.N., Romanyuk E.V., Piglovskiy N.V., Galiakhmetov R. F. Features of operation of dust collectors in the production of building materials [Osobennosti ekspluatatsii pileuloviteley pri proizvodstve stroitel'nykh materialov]. *Building materials*. 2011. No. 2. Pp. 63–65. (rus)

17. Agarkov A.M. Directions for improving the designs of cyclone devices [Napravleniya sovershenstvovaniya konstruktsiy tsiklonnykh apparatov]. *Epoch of science*. 2015. No. 4. Pp. 89–91. (rus)

18. Kashapov F.R., Romashkin I.K., Simonov L. A. Flat, rectangular and axisymmetric confusers [Ploskiye, pryamougol'nyye i osesimmetrichnyye konfuzory]. *Scientific notes of TsAGI*. 1983. Vol. 14. No. 3. Pp. 51–58. (rus)

19. Gidaspow D. *Multiphase Flow and Fluidization*. Boston: Academic Press, 1994. 467 p.

#### Information about the author

**Kachaev, Aleksandr E.** PhD in Engineering, research associate of the agricultural water supply department. E-mail: doctor\_cement@mail.ru. All-Russian Research Institute of Irrigation and Agricultural Water Supply "Raduga". Russia, 140483, Moscow region, Kolomna, Raduzhny settlement, 38.

**Orekhova, Tatyana N.** PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Lifting and Transport and Road Machines. E-mail: nefact@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

**Uralskiy, Aleksey V.** PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Technological Complexes, Machines and Mechanisms. E-mail: alexx\_1984.10@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

---

Received 11.04.2025

**Для цитирования:**

Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Уральский А.В. Верификация результатов численного и математического моделирования двухфазного потока в пневмосмесителе непрерывного действия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 9. С. 115–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-115-124

**For citation:**

Kachaev A.E., Orekhova T.N., Uralsky A.V. Verification of the results of numerical and mathematical modeling of two-phase flow in a continuous-action pneumatic mixer. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 9. Pp. 115–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-115-124