

Научно-теоретический журнал  
**ВЕСТНИК**

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

**10**

**2022**

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

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

**№ 10, 2022 год**

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

**Vol. 10. 2022**

# Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

## научно-теоретический журнал

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

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

- 2.1.1. – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
- 2.1.3. – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)
- 2.1.5. – Строительные материалы и изделия (технические науки)
- 2.1.11. – Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура)
- 2.1.12. – Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура)
- 2.1.13. – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)
- 2.1.13. – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура)
- 2.6.14. – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)
- 2.5.4. – Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки)
- 2.5.5. – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 2.5.6. – Технология машиностроения (технические науки)
- 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) (технические науки) (до 16.10.2022)
- 05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов (технические науки) (до 16.10.22)

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 Свидетельство 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. 724/4 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. Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 44446. (+12) Online подписка: <a href="http://www.akc.ru/itm/255810462/">http://www.akc.ru/itm/255810462/</a> Цена свободная.
<b>Подписан в печать</b>	13.10.2022
<b>Выход в свет</b>	25.10.2022

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 14,25. Тираж 40 экз. Заказ № 105

# Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov scientific and theoretical journal

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

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

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

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

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

<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. 724/4
<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>Подписка и распространение</b>	Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: <a href="http://www.akc.ru/itm/2558104627/">http://www.akc.ru/itm/2558104627/</a>
<b>Signed for printing:</b>	13.10.2022

**Главный редактор**

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

**Заместитель главного редактора**

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

**Члены редакционной коллегии**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## CHIEF EDITOR

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

## DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

## MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<b>Шаталова С.В., Чернышева Н.В., Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Шеремет А.А.</b> РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО РЕШЕНИЯ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ	8
<b>Лесовик Г.А., Лесовик Р.В., Ключев С.В., Вэньсюй С., Сюань Ч.</b> О ПЕРСПЕКТИВАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛ-УНОСА В ГАЗОБЕТОНЕ	20
<b>Юрьев А.Г., Панченко Л.А., Зинькова В.А.</b> СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ	34
<b>Тарасова Е.В., Коротынская В.С.</b> ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗДУШНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА	41
<b>Слободчиков Е.Г.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРА	49
<b>Бойцова Д.В.</b> ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРЫ ТУРИСТИЧЕСКИХ ВИЗИТ-ЦЕНТРОВ ПРИ ЗАГОРОДНЫХ ПАРКАХ	59
<b>Димитренко Н.В., Обыденнова А.А.</b> ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ РАЗВИТИЯ ЖИЛОГО РАЙОНА ШУИСТ В ГОРОДЕ ПЕНЗЕ	70

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<b>Коновалов В.М., Мошков И.П., Федоров А.С., Гостев Н.С., Гончаров А.А.</b> СЖИГАНИЕ RDF-ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КИСЛОРОДНОГО ДУТЬЯ	79
---	----

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<b>Сиваченко Л.А., Заровчатская Е.В., Коваленко А.И.</b> ВОЛОКОННЫЙ СПОСОБ ПОМОЛА МАТЕРИАЛОВ И ВОПРОСЫ ЕГО ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ	87
<b>Дуюн И.А., Корнилов А.В., Дуюн Т.А.</b> ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕЙСА PUTHON-ADAMS ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ПЛАТФОРМЫ ГЬЮ-СТЮАРТА	96
<b>Рязанцев В.Г., Герасимов М.Д., Любимый Н.С., Польшин А.А., Тихонов А.А.</b> ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ ВИБРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ГЕНЕРИРОВАНИЯ АСИММЕТРИЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ	107

## CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<b>Shatalova S.V., Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Elistratkin M.Y., Sheremet A.A.</b> DEVELOPMENT OF A COMPREHENSIVE SOLUTION FOR 3D PRINTING OF WALL STRUCTURES	8
<b>Lesovik G.A., Lesovik R.V., Klyuev S.V., Wenxu X., Xuan Zh.</b> ABOUT THE PROSPECTS OF USING FLY ASH IN AERATED CONCRETE	20
<b>Yuriev A.G., Panchenko L.A., Zinkova V.A.</b> CONSTRUCTIONS SYNTHESIS OF PIVOTAL SYSTEMS	34
<b>Tarasova E.V., Korotynskaya V.S.</b> ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF SOLAR HEAT SUPPLY USING AN AIR SOURCE HEAT PUMP	41
<b>Slobodchikov E.G.</b> RESEARCH OF THE OPERATION OF LOW-POWER SOLID-FUEL HEAT GENERATORS UN- DER THE CLIMATIC CONDITIONS OF THE NORT.	49
<b>Boytsova D.V.</b> GENERAL PRINCIPLES OF FORMING THE ARCHITECTURE OF TOURIST VISIT CENTERS AT COUNTRY PARKS	59
<b>Dimitrenko N.V., Obydenнова A.A.</b> URBAN DEVELOPMENT POTENTIAL OF THE SHUIST RESIDENTIAL AREA IN THE CITY OF PENZA	70

## CHEMICAL TECHNOLOGY

<b>Konovalov V.M., Moshkov I.P., Fedorov A.S., Gostev N.S., Goncharov A.A.</b> COMBUSTION OF RDF FUEL USING OXYGEN BLAST	79
---	----

## MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

<b>Sivachenko L.A., Zarovchatskaya E.V., Kovalenko A.I.</b> FIBER GRINDING METHOD OF MATERIALS AND ISSUES OF ITS PRACTICAL IMPLEMENTATION	87
<b>Duyun I.A., Kornilov A.V., Duyun T.A.</b> EVALUATION OF KINEMATIC AND DYNAMIC PARAMETERS OF THE GOUGH-STEWART PLATFORM USING A VIRTUAL PROTOTYPE	96
<b>Ryazantsev V.G., Gerasimov M.D., Lubimyi N.S., Polshin A.A., Tihonov A.A.</b> PHYSICAL MODEL OF A TWO-STAGE VIBRATION INSTALLATION FOR GENERATING ASYMMETRIC OSCILLATIONS	107

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-8-19

*\*Шаталова С.В., Чернышева Н.В., Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Шеремет А.А.**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**\*E-mail: shatalova.sv@yandex.ru*

## РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО РЕШЕНИЯ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Аннотация.** Строительная 3D-печать является одной из передовых технологий строительства в эпоху повсеместной цифровизации. Основной идеей строительной печати является создание готового изделия или конструкции одной установкой по заданной цифровой модели. Одним из препятствий на пути широкого внедрения является отсутствие комплексных решений по конструкции печатаемых стен, обеспечивающих выполнение как конструктивных, так и теплотехнических требований, а также отсутствие доступных материалов, позволяющих получать смеси для строительной печати, максимально оптимизированные под особенности 3D-принтера. При этом, важным условием коммерческой привлекательности 3D-технологий является сведение к минимуму первоначальных затрат, а также доступность сырьевой базы, способствующих их освоению малым и средним бизнесом. В статье предлагается комплексное решение по разработке и созданию стеновых конструкций, заключающееся в чередующейся печати одним устройством (в разных режимах) несъёмной опалубки из мелкозернистого бетона с заполнением внутреннего пространства пенобетонной смесью на основе гипсоцементного вяжущего. Данное решение обеспечивает выполнение конструктивных и теплотехнических требований на основе доступных стандартных компонентов (товарных вяжущих), максимально оптимизированных под особенности строительного принтера.

**Ключевые слова:** строительная 3D-печать, гипсоцементное вяжущее, реологический технологический индекс, printableность, формоустойчивость.

**Введение.** Одной из наиболее революционных технологий, способствующей повышению эффективности строительства и экономии всех видов ресурсов в настоящий момент является строительная 3D-печать, постепенно выходящая из лабораторий на строительные площадки.

Строительная печать – это аддитивная технология строительства, которая позволяет получить полноценную строительную конструкцию любой сложности по цифровой модели с использованием одной установки (3D-принтера) из различных материалов в короткие сроки [1].

Основной проблемой масштабного внедрения таких технологий является отсутствие комплексных решений по конструкции печатаемых стен, обеспечивающих выполнение как конструктивных, так и теплотехнических требований, а также недостаток доступных материалов, позволяющих получать смеси для строительной печати, максимально оптимизированные под особенности 3D-принтера. При этом, важным условием коммерческой привлекательности 3D-технологий является сведение к минимуму первоначальных затрат, а также доступность сырьевой базы, способствующих освоению их малым и средним бизнесом, являющимися на данный момент основными проводниками инноваций.

На сегодняшний день значительную научную проработку и практическое применение в области строительной печати получили смеси на

основе портландцементов. Известны исследования, направленные на поиск путей повышения их эффективности за счёт применения комплексов химических и минеральных добавок [2–7], модификации цементной вяжущей основы [8–10], использования особых технологических приёмов их получения [11, 12]. При этом сами используемые цементы отличаются высокой энергоёмкостью получения, а бетоны на их основе зачастую имеют неоптимальные для строительной печати реотехнологические показатели и характеристику нарастания ранней прочности.

В тоже время известны работы [13–15], рассматривающие строительство малоэтажных зданий посредством строительной 3D-печати из гипсовых композиций при соблюдении определенных условий. Однако данные технологические решения сопряжены с повышенным расходом вяжущего (ввиду невысокой марочной прочности) и не всегда достаточной водостойкостью гипса.

Эти недостатки возможно нивелировать применением композиционных гипсовых вяжущих (КГВ) [16]. Однако, на наш взгляд, присутствие в составе КГВ минеральной добавки, в качестве которой сегодня рекомендуются дорогостоящие товарные продукты (микрокремнезём, метакаолин и др.) либо отходы производств (отходы ММС, бой тяжелого бетона и др.), имеющие непостоянный состав и не обладающие стабильными свойствами, усложняет технологию

производства и повышает стоимость аддитивного строительства, что не выгодно малому бизнесу и выступает сильным демотивирующим фактором освоения данной сферы деятельности.

Исходя из этого, перспективным является применение гипсоцементных вяжущих без дополнительного введения минеральной добавки, путем смешения только двух товарных компонентов - гипсового вяжущего и портландцемента типов ЦЕМ II, ЦЕМ III (имеющих в своём составе минеральные добавки), качество и свойства которых изначально гарантированы производителем. Возможность и эффективность применения данных вяжущих в строительной 3D-печати была рассмотрена ранее [17].

Другой существенной проблемой является обеспечение требуемых теплотехнических показателей стеновой конструкции, возводимой методом 3D-печати, которые на данный момент достижимы только с применением утеплителей. Такие решения идут в разрез с основными идеями 3D печати – созданием готового строительного решения в едином технологическом цикле.

На наш взгляд решением этой проблемы на данном этапе может быть чередующаяся печать одним устройством (в разных режимах) несъёмной опалубки с заполнением внутреннего пространства пенобетонной смесью. Такое решение является удобным в части практической реализации и обеспечивает ряд дополнительных преимуществ: повышение несущей способности конструкции за счёт наличия слоёв конструкционного материала, а также защита поризованного композита от внешних воздействий в процессе эксплуатации и т.п. При этом следует обеспечить совместимость композитов плотного слоя (контур конструкции) и поризованного слоя (заполнения печатного контура) на всех стадиях процесса печати и эксплуатации.

В связи с вышеизложенным, целью исследования стало изучение вопросов получения мелкозернистых бетонов для печати контуров стеновых конструкций и пенобетонов для их заполнения, омоноличивания и теплоизоляции методом 3D-печати на основе гипсоцементных вяжущих, а также исследование их свойств.

**Материалы и методы.** Сырьевыми компонентами для проведения исследований были выбраны: гипсовое вяжущее  $\alpha$ -модификации марки ГВВС-16 (ЗАО «Самарский гипсовый комбинат»); портландцемент (ПЦ) ЦЕМ II/В-III 42,5Н (ООО «Южно-уральская ГПК»); кварцевый песок с  $M_{кр}=1,4$  (ООО «Формматериалы», Воронежская обл.); синтетический пенообразователь (ПО) «Пеностром» (ООО «ЩИТ» г. Шебекино,

ТУ 0250-001-22299560-97); замедлитель схватывания PLAST RETARD PE (Италия); суперпластификатор на базе поликарбоксилатов ПК тип R «Полипласт», (Россия); вода (ГОСТ 23732–2011).

Строительная печать пластичными смесями отличается от традиционных технологий и требует новых методов измерения и нормирования особых свойств. Это связано с тем, что требования к этим композитам выходят за рамки традиционного бетоноведения и их оценка известными методами невозможна или не эффективна. В связи с этим определение специальных свойств смесей для строительной печати и осуществлялось с применением, как стандартных методик, так и оригинальных, разработанных и утверждённых в БГТУ им. В.Г. Шухова [18]. К ним относятся: оценка пригодности смеси к печати (принтабельность) и оценка несущей способности свежееотформованного слоя (формоустойчивость).

Для численной оценки степени «печатаемости» авторы [18, 19] предлагают ввести понятие *реологического технологического индекса* смесей (РТИ, RTI), аппаратное обеспечение и методика определения которого будут воспроизводить ключевые особенности реальных процессов. Для определения величины РТИ (RTI) использовали прибор для определения реологического технологического индекса смесей (ПОРТИС) (рис. 1).

Величина реологического технологического индекса смеси соответствует глубине погружения поршня после цикла из 30 встряхиваний с частотой 1 Гц. Глубину погружения поршня определяют как разность между величиной выступа верхней части поршня до и после цикла встряхиваний, измеряемой с погрешностью  $\pm 1$  мм.

**Определение несущей способности** свежееотформованного раствора осуществляют для дисперсных растворных смесей по давлению в граммах на квадратный миллиметр приводящему к 10 % деформации раствора по высоте (при высоте образца 30 мм на 3 мм). Ячейка со смесью помещается на прибор с установленным штампом и контейнером для смеси. Ячейка размещается таким образом, чтобы рёбра штампа были параллельны сторонам ячейки и центрируется относительно него. Нижняя поверхность штампа, предварительно протёртая влажной тканью, подводится к поверхности смеси, и в соответствии с принятым способом осуществляется постепенное нагружение штока. Система нагружения и фиксации усилия должны обеспечивать измерение усилия, оказываемого на смесь, вызвавшего изменение её высоты на 10 % от исходной.



Рис. 1. Прибор для определения реологического технологического индекса смесей (ПОРТИС):  
1 – конический корпус; 2 – поршень определенной массы; 3 – столик с отверстиями для выхода смеси;  
4 – пружинные фиксаторы

Общий вид системы для определения указанных показателей представлен на рисунке 2.

Большой практический интерес представляет динамика изменения несущей способности

слоя в ранний период времени (0–30 мин), поскольку она лимитирует скорость наращивания высоты конструкции.



Рис. 2. Комплект оборудования и приспособлений для определения несущей способности свежесформованного слоя

**Основная часть.** Как уже упоминалось ранее, серьезным фактором, сдерживающим развитие строительной 3D-печати, выступает дефицит доступных и эффективных смесей. Составы, применяемые для печати, фактически являются мелкозернистыми бетонами. Однако для успешного формирования слоёв конструкции путём экструдирования они должны сочетать в себе два ключевых специальных, то есть ненормируемых для обычных бетонов, свойства [18]:

**принтабельность** (печатаемость, экструдирруемость), под которой предлагается понимать

*комплекс качественных и количественных характеристик смеси и принтера, которые должны быть обеспечены для переработки смеси в конструкцию или изделие. При неизменных характеристиках и режимах работы самого принтера данное определение может быть сформулировано как: принтабельность – комплекс качественных и количественных характеристик смеси, необходимый для эффективной переработки в конструкцию или изделие;*

**формоустойчивость**, которую предлагается характеризовать двумя взаимодополняющими показателями:

- несущей способностью свежееотформованного слоя;
- временем фиксации структуры, оцениваемым через способность смеси выдерживать определённое количество последовательно уложенных слоёв.

По отдельности эти свойства могут быть легко обеспечены стандартными методами, но особенность составов для 3D-печати заключается именно в их сочетании.

В мелкозернистых бетонных смесях, содержащих более двух частей заполнителя, доля цементного теста сравнительно не велика, обеспечить за счёт регулирования его реологии хороший уровень принтабельности и формоустойчивости крайне затруднительно. Поэтому, на наш взгляд, обязательным условием получения эффективных экономичных составов является вовлечение заполнителя в формирование спецсвойств. Для практической реализации данного тезиса и придания печатаемости и формоустойчивости предполагается использование сочетания двух добавок: пластифицирующей (СП) и воздухововлекающей - пенообразователя (ПО).

Добавка пенообразователя в подобных системах выполняет 3 функции:

- снижает поверхностное натяжение менисков воды между песчинками, контактирующими между собой через минимальные прослойки гипсоцементного теста;
- выступает в роли смазки при перемещении песчинок относительно друг друга в процессе экструдирования;
- создаёт и поддерживает существование многочисленных мелких пузырьков воздуха, соизмеримых по размерам с частицами заполнителя, но имеющих при деформации смеси нулевое трение. То есть две песчинки, разделённые воздушным пузырьком, не могут механически контактировать, и перемещаются друг относительно друга свободно.

Повышение несущей способности свежееотформованного слоя смеси, при ее частичной поризации, обеспечивается тем, что после определённого момента она достаточно быстро утрачивает специальные свойства, существенно раньше начала схватывания вяжущего, что, вероятно, связано с ростом удельной поверхности твёрдой фазы и преадсорбцией значительной доли молекул ПО на вновь сформированную поверхность.

Наиболее очевидным следствием частичной поризации мелкозернистых бетонов для печати контуров конструкций является:

- снижение нагрузки на нижерасположенные слои, ввиду уменьшения массы единичного слоя. Следствием этого может стать возможность последовательной (без перерыва) печати большего количества слоёв, либо увеличение высоты единичного слоя, что также будет способствовать повышению темпов ведения работ;

- увеличение объёма получаемой смеси по сравнению с непоризованным композитом, следствием чего является уменьшение удельной материалоёмкости стеновых конструкций, экономия различных видов ресурсов на разных стадиях жизненного цикла материала.

Негативными аспектами частичной поризации можно считать снижение прочности материала, и как следствие, его долговечности в жёстких режимах эксплуатации.

С учётом рассмотренных аспектов, на основе двухкомпонентных гипсоцементных вяжущих, были разработаны составы мелкозернистого бетона для печати контуров ограждающих конструкций с различным содержанием мелкого заполнителя (1:2, 1:3, 1:4), для которых были определены основные характеристики. Для сравнения был использован состав на цементном вяжущем, придание специальных свойств которому осуществлялось на тех же принципах.

В таблице 1 представлены рецептуры и основные физико-механические характеристики смесей для печати контуров конструкций.

Как видно из представленных данных, повышение доли вяжущего в смеси ведёт к закономерному росту прочности, который, тем не менее, не всегда пропорционален его расходу. Так, переход на состав Вяжущее:Песок = 1:3 взамен 1:4, обеспечивает практически пропорциональный прирост прочности, а с состава 1:4 на 1:2 (двухкратное повышение расхода вяжущего) - лишь в 1,72 раза. При этом более богатые составы демонстрируют тенденцию к ощутимому повышению плотности, что свидетельствует о меньшей степени поризации, необходимой для обеспечения принтабельности. Увеличение плотности также приводит к относительно небольшому приросту коэффициента конструктивного качества (ККК), свидетельствуя о меньшей эффективности использования вяжущего в более богатых составах.

Вне зависимости от обеспечиваемых составами прочностных показателей, приоритетным моментом при разработке смесей для строительной печати является их пригодность для подачи в конструкцию с помощью формующего устройства определённого типа. В качестве основного критерия печатаемости (экструдированности) получаемых смесей был принят, предложенный в БГТУ им. В.Г. Шухова, показатель реологического технологического индекса (РТИ) [18].

Таблица 1

## Составы и свойства мелкозернистых бетонов для печати контуров конструкций

№ п/п	Состав, масс частей			В/Вяз	Добавки, % от массы вяжущего			$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	R1, МПа	R7, МПа	R28, МПа	ККК, 28 сут	Принтабельность (РТИ), мм	F, количество циклов попеременного замораживания и оттаивания
	Г16	ЦЕМ П- (Ш)	Песок		ПО, %	Замедлитель, %	СП, %							
1	0,5	0,5	4	0,4	0,3	0,05	0,6	1639	2,6	4,8	8,2	5	78	–
2			4	0,38	0,3	0,05	0,6	1720	2,9	5,8	10,7	6,2	56	50
3			4	0,35	0,3	0,05	0,6	1815	3,1	6,3	11,1	6,1	22	–
4	0,5	0,5	3	0,38	0,3	0,05	0,6	1980	3,2	8,6	14,6	7,4	64	–
5			3	0,35	0,3	0,05	0,6	2010	3,8	8,8	15,3	7,6	54	55
6			3	0,32	0,3	0,05	0,6	2017	4,0	9,4	14,8	7,3	29	–
7	0,5	0,5	2	0,38	0,3	0,05	0,6	2005	6,3	13,7	17,2	8,6	46	56
8			2	0,35	0,3	0,05	0,6	2049	6,4	14,5	16,9	8,2	28	–
9			2	0,33	0,3	0,05	0,6	2094	6,9	14,7	17,6	8,4	23	–
10К	0	1	4	0,35	0,3	–	0,8	1905	–	9,2	12,7	6,7	55	–

Как видно из таблицы 1, изменение В/Вяз отношения и количества заполнителя при прочих равных условиях оказывает ощутимое влияние на принтабельность смесей – величину реологического технологического индекса (РТИ). Оптимальное значение РТИ смеси, в отсутствие на настоящий момент стандартизации параметров формирующих устройств строительных принтеров, определяется индивидуально для каждой конкретной установки. Для использованного в работе лабораторного строительного принтера наилучшие показатели печати (стабильность подачи, качество трека) достигаются при использовании смесей с величиной РТИ в диапазоне 40...60 мм. При этом работоспособность принтера сохраняется и при применении смесей в расширенном на  $\pm 10...15$  мм диапазоне. Однако смеси с РТИ > 60 мм имеют избыточный выход (корректируемый программно) и пониженную несущую способность свежееотформованного слоя (формоустойчивость). Смеси с пониженным РТИ < 40 мм требуют включения вибратора на сопле, а также могут иметь ощутимые изменения показателя выхода в начале и конце работы с замесом.

Следующим важным специальным показателем смесей для строительной печати является формоустойчивость, характеризующая способность свежееуложенной смеси выдерживать собственный вес и вес вышерасположенных слоёв при нормированной величине деформации. Также большой практический интерес представляет динамика изменения несущей способности слоя в ранний период времени (0–30 мин), поскольку она лимитирует скорость наращивания

высоты конструкции. Также следует учитывать, что изучение указанного показателя имеет смысл только для смесей, имеющих требуемый уровень принтабельности. Оценка величины показателя несущей способности свежееотформованного (НССС) слоя производилась также по методике, разработанной в БГТУ им. В.Г. Шухова [18].

На рисунке 3 показаны различия в изменении деформативности смесей в зависимости от вида вяжущего и времени с момента укладки. Значения по оси X соответствуют времени нагружения (с) и степени текущей деформации при скорости процесса 3 мм/с для образцов с высотой 30 мм, находящихся в специальных П-образных формах. Как видно из рисунка, для смесей на основе гипсоцементного вяжущего характерна несколько меньшая исходная несущая способность, по сравнению с составом на основе портландцемента, которая существенно повышается в течение первых 15 мин. Судя по графикам, у цементного состава повышение несущей способности слоя за это время не существенно, и достигается только за счёт тиксотропного загущения, в то время как гипсоцементное вяжущее, при нахождении в состоянии покоя, способно к образованию ранних кристаллических структур. Структурирующее действие в гипсоцементных вяжущих проявляется достаточно для первичной фиксации структуры композита, но не является препятствием для экструдирования смеси.

В течение последующих 15 мин несущая способность гипсоцементного композита (рис. 3, а) продолжает прогрессирующе нарастать, что обусловлено приближением к моменту схватыва-

ния гипсовой составляющей. Несущая способность цементного композита (рис. 3, б) возрастает по сравнению с начальным значением только в  $\approx 3$  раза, оставаясь на уровне меньшем

чем, гипсоцементный композит демонстрировал в 15 мин.

На рисунке 4 представлено соотношение несущей способности слоя с количеством слоёв, создающих подобную нагрузку.

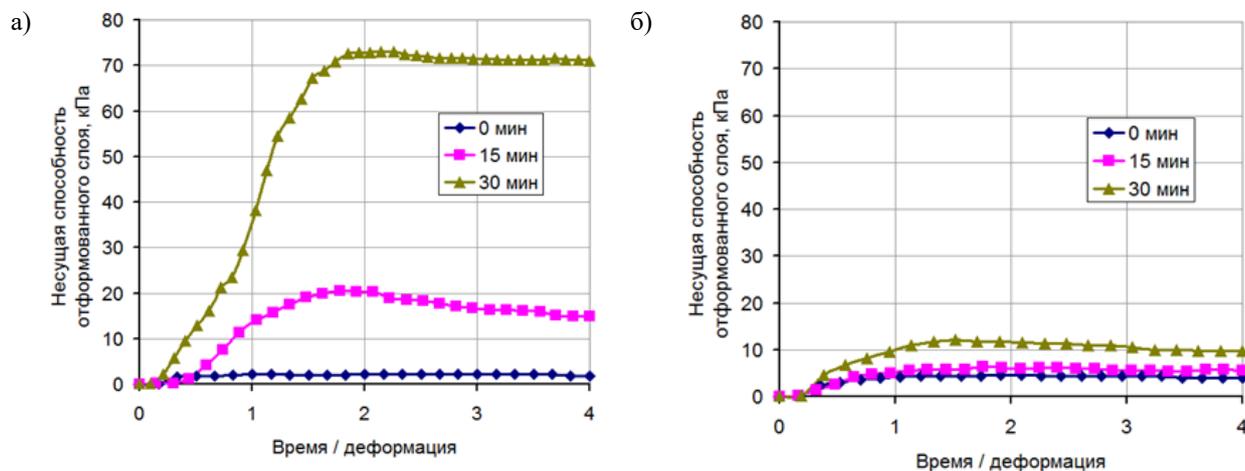
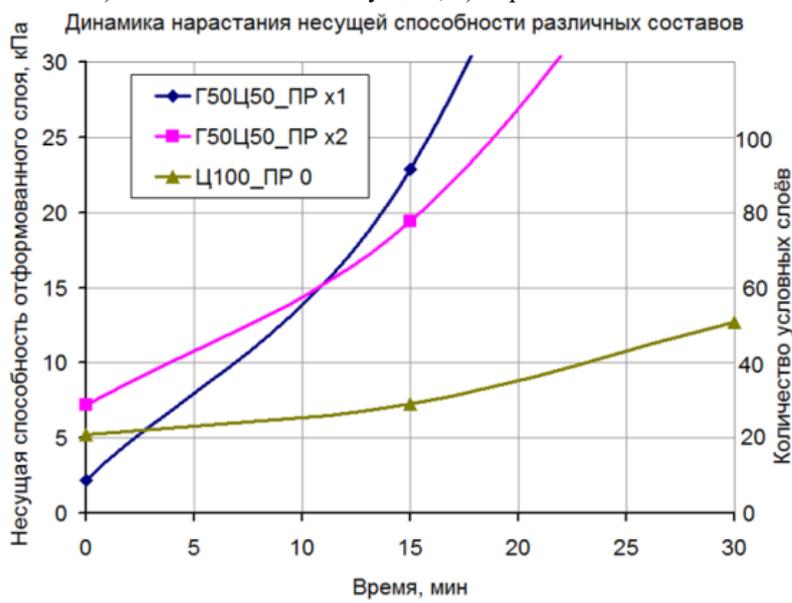


Рис. 3. Кривые сопротивления деформированию смеси для строительной печати (1:4) на основе: а) гипсоцементного вяжущего, б) портландцемента



а)



б)

Рис. 4. а) возможная динамика наращивания высоты конструкции при печати смесями на основе цементного (Ц100\_ПР 0) и гипсоцементного вяжущего с замедлителем схватывания (Г50Ц50\_ПР×1, Г50Ц50\_ПР×2) при высоте слоя составляющей 0,7 ширины;

б) результат печати разработанными гипсоцементными составами

Как видно, все рассмотренные составы допускают последовательную укладку от 10 до 30 слоёв с указанными параметрами. Однако следует учитывать, что фактически рекомендуемое значение, по нашему представлению, должно быть уменьшено минимум в 2...2,5 раза. Это связано с тем, что процесс укладки слоёв сопровождается дополнительным давлением выходящей из сопла смеси, наличием усилий в горизонтальной плоскости и вибраций, связанных с перемещением формирующего устройства, эксцентриситетов, возникающих из-за невозможности обеспечить абсолютную соосность укладываемых слоёв. В то же время, при печати реальных конструкций, укладка последующего слоя всегда осуществляется через некоторое время, необходимое для отрисовки всего трека. С учётом неизбежных интервалов между укладкой слоёв и высокой динамикой нарастания несущей способности, смеси на основе гипсоцементного вяжущего пригодны для непрерывного увеличения высоты конструкций даже при использовании строительных принтеров с высокой производительностью и небольших размерах печатаемого объекта (изделия).

На основе гипсоцементных вяжущих также были разработаны составы пенобетонов - для заполнения внутренних полостей и омоноличивания конструкций, при подаче смеси с помощью принтера. Особенностью предложенных решений является применение одинаковой вяжущей композиции и поризующей добавки для получения бетонов разного функционального назначения. Необходимость такого подхода обусловлена упрощением технологического цикла получения разных типов смесей и логистики снабжения сырьём объекта аддитивного строительства, улучшением условий совместной работы двух различных материалов за счёт обеспечения максимальной степени подобия на минералогическом и микроструктурном уровнях, снижения инфильтрации различных агентов между материалами.

Разработка составов пенобетонов осуществлялась с учётом наработок ряда исследователей [20–23].

В таблице 2 представлены физико-механические показатели пенобетона на гипсоцементном вяжущем для омоноличивания аддитивно-возводимых стеновых конструкций. В качестве контрольного выступал состав на основе портландцемента.

Таблица 2

Составы и физико-механические показатели пенобетона на различных вяжущих

№	Вид вяжущего	В/Вяж	ПО, %	Замедл., %	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	R5, МПа	R14, МПа	R28, МПа	$\lambda$ , Вт/(м·К)
1	Г16 + ЦЕМ II- (Ш)	0,45	0,25	0,05	570	1,32	1,73	2,04	0,13
2		0,57	0,25	0,05	470	0,93	1,27	1,57	0,11
3	ЦЕМ II- (Ш)	0,5	0,25	–	550	0,72	1,42	1,90	0,13

Как видно из таблицы 2, с использованием разработанного вяжущего получены составы пенобетона с плотностью менее 500 кг/м<sup>3</sup>, с прочностью более 1,5 МПа. Несмотря на то, что данный уровень прочностных показателей не является рекордным для данного типа материалов, следует учитывать, что высокие темпы начального структурообразования в наибольшей степени отвечают требованиям строительной печати, позволяя непрерывно наращивать высоту конструкции без дополнительных перерывов на набор прочности.

В рамках лабораторной апробации технологии печати контурных стеновых конструкций с пенобетонным заполнением на основе гипсоцементных вяжущих была разработана специальная цифровая модель тестового образца, имеющего криволинейные боковые поверхности для демонстрации возможности технологии строительной печати (рис. 5).

В рамках теста на стеклянную подложку осуществлялась печать контурной опалубки, которая состояла из 10 последовательно укладываемых слоёв частично поризованного мелкозернистого бетона.

Высота слоя была принята 15 мм, при диаметре сопла 20 мм и фактической ширине получаемого трека 30...35 мм. Затем, через определённое время, с помощью принтера внутренний объём тестовой модели заполнялся пенобетонной смесью в 4 прохода. При этом, время фиксации структуры для составов на гипсоцементном вяжущем позволяло осуществлять заполнение опалубки пенобетонной смесью непосредственно после окончания печати (с учётом переналадки оборудования).

Таким образом, предлагаемые решения позволяют изготавливать стеновые конструкции из формовочных мелкозернистых и пенобетонных смесей на основе гипсоцементного вяжущего методом строительной 3D-печати для объектов малоэтажного строительства.

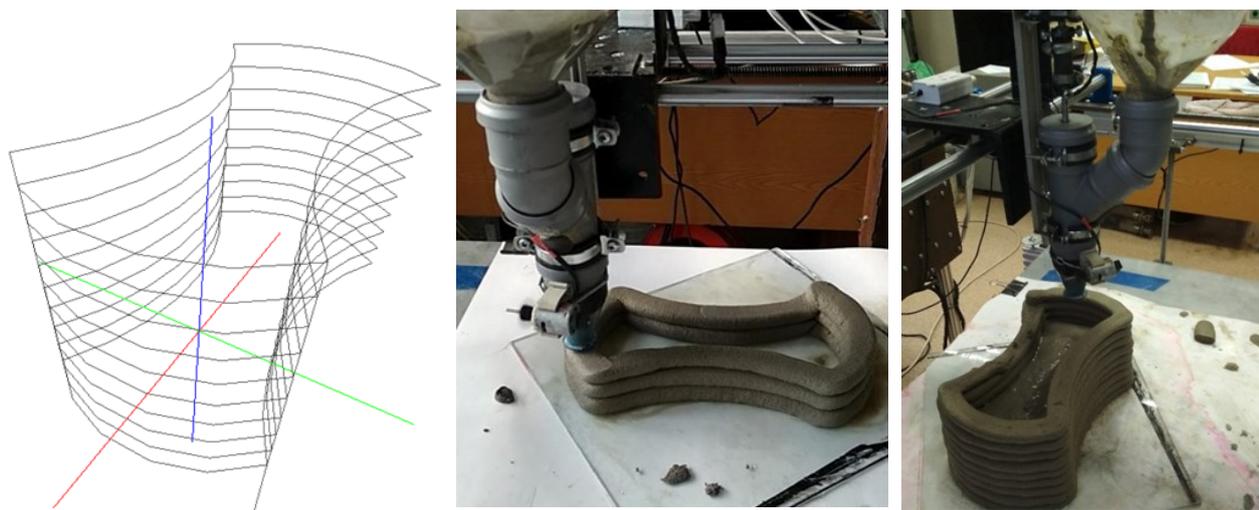


Рис. 5. Модель для тестирования разработанных составов и решений

### Выводы.

1. Установлено, что создание в конструкционных мелкозернистых бетонах частичной пористости за счёт введения ПО, при содержании от 2 частей заполнителя, является эффективным способом придания смесям для строительной печати прিনтабельности и формоустойчивости.

2. Фиксация структуры конструкционных (условно-плотных) мелкозернистых бетонов в ранний период (до схватывания вяжущего) происходит за счёт преадсорбции части ПО из водного раствора на ранние гидратные фазы, вследствие чего возрастает действие структурирующих капиллярных сил в зонах контакта частиц заполнителя, и несущая способность системы повышается.

3. Предложены составы мелкозернистых формовочных смесей на основе гипсоцементных вяжущих с комплексом химических добавок – пенообразователем, суперпластификатором и замедлителем сроков схватывания для эффективной 3D-печати контуров стеновых конструкций прочностью 10,7–17,2 МПа, средней плотностью 1700–2000 кг/м<sup>3</sup>, морозостойкостью 50 циклов.

4. Разработаны составы конструкционно-теплоизоляционных пенобетонов на основе гипсоцементных вяжущих для внутреннего заполнения и омоноличивания с характеристиками: средней плотностью 450–570 кг/м<sup>3</sup>, прочностью 1,5–2 МПа, теплопроводностью 0,11–0,13 Вт/(м·К). Применение для пенобетонов разработанных гипсоцементных вяжущих обеспечивает получение материала с качественной поровой структурой, высокими физико-механическими показателями.

5. Разработано комплексное технологическое решение для строительной 3D-печати, позволяющее изготавливать стеновые конструкции,

удовлетворяющие прочностным и теплотехническим требованиям.

*Источник финансирования.* Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Глаголев Е.С., Шаталова С.В., Стариков М.С. Формирование свойств композиций для строительной печати // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 10. С. 6–14. doi:10.12737/article\_59cd0c57ede8c1.83340178
2. Khoshnevis B., Hwang D., Yeh Z. Mega-scale fabrication by contour crafting // International Journal of Industrial and Systems Engineering. 2006. Vol. 1. №. 3. Pp. 301–320. doi:10.1504/IJISE.2006.009791
3. Zhang J., Khoshnevis B. Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting. // Automation in Construction. 2013. №. 29. Pp. 50–67. doi:10.1016/J.AUTCON.2012.08.006
4. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete // Materials and structures. 2012. Vol. 45. №. 8. Pp. 1221–1232. doi:10.1617/s11527-012-9828-z
5. Malaeb Z., Hachem H.A., Tourbah A., Maalouf T., Zarwi N.E., Hamzeh F. 3D Concrete printing: machine and mix design // International Journal of Civil Engineering. 2015. Vol. 6. №. 6. Pp. 48–53.
6. Khalil N. Aouad G., Rémond S. Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars // Construction and Building

Materials. 2017. Vol. 157. Pp. 382–391. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.109

7. Lin J.C., Wu X., Yang W. Application of P.O and R-SAC mortar for 3D printing in construction // Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 292. Pp. 79–83. doi:10.1088/1757-899X/292/1/012070

8. Slavcheva G., Britvina E., Shvedova M. Heat release during 3d-printable materials setting and hardening // Materials Science Forum. 2021. Vol. 1043 MSF. Pp. 37–42. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.37

9. Marchon D., Kawashima S., Bessaies-Bey H., Mantellato S. Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: potential admixtures and cement chemistry // Cem. Concr. Res. 112. 2018. Pp. 96–110. doi:10.1016/j.cemconres.2018.05.014.

10. Thrane L.N., Pade C., Nielsen C.V. Determination of rheology of self-consolidating concrete using the 4C-Rheometer and how to make use of the results // J. ASTM Int., 2009. 7 (1). Pp. 1–10.

11. Reiter L., Wangler T., Roussel N., Flatt R.J. The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete // Cem. Concr. Res. 112. 2018. Pp. 86–95. doi:10.1016/j.cemconres.2018.05.011.

12. Keita E., Bessaies-Bey H., Zuo W., Belin P., Roussel N. Weak bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing. // Measurement and physical origin, submitted to Cem. Concr. Res. 2017. Pp. 217–222. doi:10.1016/j.cemconres.2019.105787

13. Liu K., Wu Y. F., Jiang X. L. Shear strength of concrete filled glass fiber reinforced gypsum walls. Materials and Structures. 2008. Vol. 41. №. 4. Pp. 649–662. doi:10.1617/s11527-007-9271-8

14. Удодов С.А., Белов Ф.А., Золотухина А.Е. Уточнение состава сухой строительной смеси для 3d-печати методом математического моделирования // В сборнике трудов конференции European scientific conference, г. Пенза, 30 июля 2017 г. С. 132–138.

15. Рязанов А.Н., Шигапов Р.И., Синицин Д.А., Кинзябулатова Д.Ф., Недосеко И.В. Использование гипсовых композиций в технологиях строительной 3d-печати малоэтажных жи-

лых зданий. Проблемы и перспективы // Строительные материалы. 2021. № 8. С. 39–44. doi:10.31659/0585-430X-2021-794-8-39-44

16. Чернышева Н.В., Лесовик В.С., Дребезгова М.Ю., Моторькин Д.А., Лесниченко Е.Н., Бочарников А.Л. Состав и реологические свойства формовочных смесей на композиционном гипсовом вяжущем // Строительные материалы. 2021. № 8. С. 45–52. doi:10.31659/0585-430X-2021-794-8-45-52

17. Chernysheva N.V., Shatalova S.V. Compounding features of composite gypsum binders for porous composites in construction printing technologies // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Buildintech bit 2020. Innovations and technologies in construction. 2020. 012007. doi:10.1088/1757-899X/945/1/012007

18. Стандарт организации ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова СТО 02066339-043-2020 «Смеси для получения композитов методом строительной печати на цементном вяжущем». Методы испытаний. Белгород, 2020. 22 с.

19. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Elistratkin M.Y., Pospelova M.A., Alfimova N.I. The method of creating and measuring the printability of fine-grained concrete // Materials Science Forum. 2021. T. 1017. C. 71–80. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1017.71

20. Аниканова Т.В., Рахимбаев Ш.М. Пенобетоны для интенсивных технологий строительства: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 128 с.

21. Удачкин И.Б. Ключевые проблемы развития производства пенобетона // Строительные материалы. 2002. № 3. С. 8–9.

22. Белов В.В., Баркая Т.Р., Куляев П.В. Неавтоклавный поризованный бетон на основе топливной золы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2021. № 2 (10). С. 6–18. doi:10.46573/2658-7459-2021-6-18

23. Chernysheva N.V., Shatalova S.V., Drebezgova M.Y., Lesnichenko E.N. Thermal Insulating and Constructive Foamed Concrete on a Composite Gypsum Binder // Materials Science Forum. 2019. Vol. 974 MSF. Pp. 125–130. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.974.125

#### Информация об авторах

**Шаталова Светлана Вячеславовна**, ассистент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: shatalova.sv@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Чернышева Наталья Васильевна**, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: chernysheva56@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Лесовик Валерий Станиславович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: naukavs@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Елистраткин Михаил Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Шерemet Алена Анатольевна**, ассистент кафедры дизайна архитектурной среды. E-mail: ajiyonka@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 26.05.2022 г.

© Шаталова С.В., Чернышева Н.В., Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Шерemet А.А., 2022

**\*Shatalova S.V., Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Elistratkin M.Y., Sheremet A.A.**

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

*\*E-mail: shatalova.sv@yandex.ru*

## DEVELOPMENT OF A COMPREHENSIVE SOLUTION FOR 3D PRINTING OF WALL STRUCTURES

**Abstract.** Construction 3D printing is one of the advanced construction technologies in the era of widespread digitalization. The main idea of construction printing is to create a finished product or structure with one installation according to a given digital model. One of the obstacles to widespread implementation is the lack of integrated solutions for the construction of printed walls, ensuring the fulfillment of both structural and thermal engineering requirements, as well as the lack of available materials that allow obtaining mixtures for construction printing, maximally optimized for the features of a 3D printer. At the same time, an important condition for the commercial attractiveness of 3D technologies is the minimization of initial costs, as well as the availability of raw materials that contribute to their development by small and medium-sized businesses. The article offers a comprehensive solution for the development and creation of wall structures, consisting in alternating printing with one device (in different modes) of a fixed formwork made of fine-grained concrete with filling the interior space with a foam concrete mixture based on gypsum cement binder. This solution ensures the fulfillment of structural and thermal engineering requirements based on available standard components (commodity binders), maximally optimized for the features of the construction printer.

**Keywords:** construction 3D printing, gypsum cement binder, rheotechnological index, printability, shape stability.

### REFERENCES

1. Lesovik V.S., Elistratkin M.Y., Glagolev E.S., Shatalova S.V., Starikov M.S. Formation of properties of compositions for construction printing [Formirovaniye svoystv kompozitsiy dlya stroitel'noy poligrafii]. Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 10. Pp. 6–14. doi:10.12737/article\_59cd0c57ede8c1.83340178 (rus)
2. Khoshnevis B., Hwang D., Yeh Z. Mega-scale fabrication by contour crafting. International Journal of Industrial and Systems Engineering. 2006. Vol. 1. №. 3. Pp. 301–320. doi:10.1504/IJISE.2006.0097913.
3. Zhang J., Khoshnevis B. Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting. Automation in Construction. 2013. №. 29. Pp. 50–67. doi:10.1016/J.AUTCON.2012.08.006
4. Le T. T., Austin S.A., Lim S., Buswell R. A., Gibb A. G. F., Thorpe T. Mix design and fresh prop-

erties for high-performance printing concrete // Materials and structures. 2012. Vol. 45. №. 8. Pp. 1221–1232. doi:10.1617/s11527-012-9828-z

5. Malaeb Z., Hachem H.A., Tourbah A., Maalouf T., Zarwi N.E., Hamzeh F. 3D Concrete printing: machine and mix design. International Journal of Civil Engineering. 2015. Vol. 6. No. 6. Pp. 48–53.

6. Khalil N. Aouad G., Rémond S. Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 157. Pp. 382–391. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.109

7. Lin J.C., Wu X., Yang W. Application of P.O and R-SAC mortar for 3D printing in construction. Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 292. Pp. 79–83. doi:10.1088/1757-899X/292/1/012070

8. Slavcheva G., Britvina E., Shvedova M. Heat release during 3d-printable materials setting and hardening. Materials Science Forum. 2021. Vol.

1043 MSF. Pp. 37–42. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.37

9. Marchon D., Kawashima S., Bessaies-Bey H., Mantellato S.Ng. Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: potential admixtures and cement chemistry. *Cem. Concr. Res.* 112. 2018. Pp. 96–110. doi:10.1016/j.cemconres.2018.05.014.

10. Thrane L.N., Pade C., Nielsen C.V. Determination of rheology of self-consolidating concrete using the 4C-Rheometer and how to make use of the results. *J. ASTM Int.*, 2009. 7 (1). Pp. 1–10.

11. Reiter L., Wangler T., Roussel N., Flatt R.J. The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete. *Cem. Concr. Res.* 112. 2018. Pp. 86–95. doi:10.1016/j.cemconres.2018.05.011.

12. Keita E., Bessais-Bey H., Zuo W., Belin P., Roussel N. Week bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing. Measurement and physical origin, submitted to *Cem. Concr. Res.* 2017. Pp. 217–222. doi:10.1016/j.cemconres.2019.105787

13. Liu K., Wu Y. F., Jiang X. L. Shear strength of concrete filled glass fiber reinforced gypsum walls. *Materials and Structures.* 2008. Vol. 41. No. 4. Pp. 649–662. doi:10.1617/s11527-007-9271-814.

14. Udodov S.A., Belov F.A., Zolotukhina A.E. Refinement of the composition of dry building mix for 3d printing by mathematical modeling. In the proceedings of the European scientific conference, Penza, July 30, 2017. Pp. 132–138. (rus)

15. Ryazanov A.N., Shigapov R.I., Sinitsyn D.A., Kinzyabulatova D.F., Nedoseko I.V. The use of gypsum compositions in construction 3D printing technologies of low-rise residential buildings. Problems and prospects. *Building materials.* 2021. No. 8. Pp. 39–44. doi:10.31659/0585-430X-2021-794-8-39-44 (rus)

16. Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Drebezhgova M.Yu., Motorykin D.A., Lesnichenko E.N., Bocharnikov A.L. Composition and rheological properties of molding mixtures on composite gypsum binder [Sostav i reologicheskiye svoystva formovochnykh smesey na kompozitsionnom gipsovom vyazhushchem]. *Building materials.*

2021. No. 8. Pp. 45–52. doi:10.31659/0585-430X-2021-794-8-45-52 (rus)

17. Chernysheva N.V., Shatalova S.V. Compounding features of composite gypsum binders for porous composites in construction printing technologies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Buildintech bit 2020. Innovations and technologies in construction.* 2020. 012007. doi:10.1088/1757-899X/945/1/012007

18. The standard of the organization of the V.G. Shukhov BSTU STO 02066339-043-2020 "Mixtures for the production of composites by meth of construction printing on cement binder". Test methods [Standart organizatsii V.G. Shukhova BGTU STO 02066339-043-2020 «Smesi dlya proizvodstva kompozitsionnykh materialov metodom stroitel'noy pechati na tsementnom vyazhushchem». *Metody ispytaniy*]. Belgorod, 2020. 22 p. (rus)

19. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Elistratkin M.Y., Pospelova M.A., Alfimova N.I. The method of creating and measuring the printability of fine-grained concrete. *Materials Science Forum.* 2021. Vol. 1017. Pp. 71–80. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1017.71

20. Anikanova T.V., Rakhimbayev Sh.M. Foam concrete for intensive construction technologies [Penobeton dlya intensivnykh tekhnologiy stroitel'stva]: monograph. Belgorod: Publishing House of BSTU, 2015. 128 p. (rus)

21. Udachkin I.B. Key problems of foam concrete production development. *Building materials [Klyuchevyye problemy razvitiya proizvodstva penobetona. Stroitel'nyye materialy]*. 2002. No. 3. Pp. 8–9. (rus)

22. Belov V.V., Barkaya T.R., Gulyaev P.V. Non-autoclave porous concrete based on fuel ash [Nevtoklavnyy yacheisty beton na osnove zoly topliva]. *Bulletin of the Tver State Technical University. Series: Construction. Electrical engineering and chemical technologies.* 2021. No. 2 (10). Pp. 6–18. doi:10.46573/2658-7459-2021-6-18 (rus)

23. Chernysheva N.V., Shatalova S.V., Drebezhgova M.Y., Lesnichenko E.N. Thermal Insulating and Constructive Foamed Concrete on a Composite Gypsum Binder. *Materials Science Forum.* 2019. Vol. 974 MSF. Pp. 125–130. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.974.125.

#### *Information about the authors*

**Shatalova, Svetlana V.** Assistant. E-mail: shatalova.sv@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Chernysheva, Natalya V.** DSc, Professor E-mail: chernysheva56@rambler.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Lesovik, Valery S.** DSc, Professor E-mail: naukavs@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Elistratkin, Michail Y.** PhD, Assistant professor. E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Sheremet, Alena A.** Assistant. E-mail: ajiyonka@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 26.05.2022*

**Для цитирования:**

Шаталова С.В., Чернышева Н.В., Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Шеремет А.А. Разработка комплексного решения для 3d-печати стеновых конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-8-19

**For citation:**

Shatalova S.V., Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Elistratkin M.Y., Sheremet A.A. Development of a comprehensive solution for 3d printing of wall structures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 10. Pp. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-8-19

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-20-33

*\*Лесовик Г.А., Лесовик Р.В., Ключев С.В., Вэньсюй С., Сюань Ч.**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**\*E-mail: galina.lesovik@mail.ru*

## О ПЕРСПЕКТИВАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛ-УНОСА В ГАЗОБЕТОНЕ

**Аннотация.** Угольная промышленность в Китае занимает лидирующую позицию. Дальнейший план развития на пятилетку допускает рост угольных мощностей, но при этом планируется идти по пути «чистого и эффективного использования угля». Одним из преимущественных направлений выделено «зеленое» строительство. В связи с этим остро стоит вопрос утилизации отходов сжигания угля, объем которых постоянно увеличивается, загрязняя тем самым почву, атмосферу и ближайшие водоемы.

Основной причиной большого перерасхода энергии на отопление зданий и сооружений является неэффективная теплоизоляция. При этом суровый климат и холодные зимы в некоторых районах Китая определяют необходимость применения высококачественных теплоизоляционных материалов. Одним из таких материалов признан газобетон. Но наряду с теплоизоляцией он должен выполнять и звукоизоляционную функцию, чтобы хоть как-то минимизировать воздействие шума на человека в больших мегаполисах.

Отмечено, что производство газобетонных смесей занимает лидирующую позицию, а применение отходов от сжигания топлива в качестве одного из компонентов газобетона, позволяет не только сократить расходы на его производство, но и снизить экологическую нагрузку на окружающую среду.

**Ключевые слова:** окружающая среда, летучая зола, теплоизоляционный и звукоизоляционный газобетон, применение отходов сжигания угля, приоритеты развития.

**Введение.** На текущий момент Китай занимает первое место в мире по электропотреблению и, соответственно, считается одной из крупнейших стран по производству угля.

Уголь считается популярным и необходимым видом топлива в стране, является фундаментом энергетической базы и гарантией успешного развития экономики страны. Месторождения угля в Китае занимают площадь более 600 тыс. км<sup>2</sup>. Уголь обеспечивает производство 77 % электроэнергии, производство 65 % химического сырья, целиком удовлетворяет потребности в топливе коммунально-бытового сектора и населения.

Но нельзя забывать о том, что огромное количество мелкодисперсных отходов обогащения, а также вскрышных пород, которые оказывают негативное влияние на экологическую ситуацию во всем мире, образуются именно при добыче и обогащении угля. Далее, при сжигании угля образуется значительное количество золы-уноса, которая отрицательно сказывается на здоровье человека и на окружающей среде в целом. По данным Всемирной организации здравоохранения 17 % всех смертей в Китае происходит по причине загрязнения воздуха, поэтому правительство постоянно совершенствует законы и мероприятия для сокращения вредных отходов угольных электростанций [1–5].

На сегодняшний день угольная промышленность Китая – это достаточно крупный кластер,

который был создан по аналогии бывшего Советского Союза и включал этапы, начиная от исследований и геологоразведки, строительства и эксплуатации угольного разреза до распространения продукции и научных исследований. Технология производства угля включает следующие стадии: промывка, измельчение и сортировка после добычи. Китайский уголь содержит большое количество летучих веществ, примесей, золы и серы. Как известно, сера и зола значительно ухудшают качество угля, поэтому минеральные примеси необходимо удалять до использования угля, то есть подвергать его процессу обогащения. Таким образом можно извлечь до 30–40 % серы и понизить его зольность на 50–80 %.

**Материалы и методы.** В данной работе в основе методики исследования лежит комплексный подход, который включает изучение литературных источников и электронных ресурсов; обобщение отечественного и зарубежного опыта применения отходов угольной промышленности в строительном секторе и поиск наиболее оптимальных решений.

Основные задачи исследования – расширение областей применения золы-уноса в строительстве, что, с одной стороны, позволит значительно снизить экологическую нагрузку на окружающую среду, а с другой, позволит решить проблемы современных мегаполисов.

**Основная часть.** Угольные месторождения рассредоточены почти по всей территории Китая.

Первое место в стране по запасам и объемам добычи занимает Северный Китай, где рельеф позволяет механизировать и автоматизировать добычу угля, а также находятся угольные пласты с большой мощностью. Однако там существует проблема дефицита водных ресурсов, которые необходимы при строительстве крупных шахт.

Самые большие запасы угля принадлежат следующим месторождениям: Сишань, Янцюань, Кайлуань, Шигуайгоу, Датун и Фэнфэн. Крупнейшие месторождения местного значения: в провинции Ганьсу – Шаньдань, в провинции Шэньси – Вэйбэй, в Синьцзян-Уйгурской автономной республике – Людавань и Хами, в Нинся-Хуэйской автономной республике – Шицзюйшань, в провинции Цинхай – угольный бассейн Ланьчжоу-Сининский. Помимо этого, на севере Китая, на границе провинции Шэньси с Внутренней Монголией находится одно из масштабных в мире месторождений угля, которое в текущий момент динамично осваивается. Найденные запасы составляют 223,6 млрд. тонн. Следовательно, можно предположить, что спустя несколько десятилетий, данный угольный бассейн будет являться основным в стране с годовой добычей угля до 60 миллионов тонн.

Угленосный район восточного Китая до недавнего времени считался бесперспективным в плане разработки угля, пока там не были обнаружены огромные запасы, сосредоточенные в основном в следующих месторождениях: в провинции Аньхой – Хуайнань, в провинции Шаньдун – Таочжуан, Цзыбо, Синьтай, в провинции Цзянсу – Сюйчжоу, в провинции Цзянси – Фэнчэн, Лэпин, Пинсян. Тем не менее непростой рельеф этого региона осложняет добычу угля.

В Центральном и Южном Китае расположено около 40 месторождений, наиболее значимые из которых: Хэби, Пиндиншань, Цзяоцзо (провинция Хэнань), Синнин-Мэйсянь (провинция Гуандун), Хуанши (провинция Хубэй), Цзысин (провинция Хунань).

Северо-Восток Китая славится такими крупнейшими месторождениями угля, как: Яньтай, Фусинь, Хайчжоу, Фушань, Бэйпяо, Бэньси, Шуаньяшань, Пиннань, Цзяохэ, Хэган, Тунхуа, Сиань, Цзиси. В Юго-Западном районе Китая в последние десятилетия постоянно велись работы по разведке новых месторождений. Обозначены следующие месторождения: Дуюнь (провинция Гуйчжоу), Чжунляншань, Хуаюшань, Шуйчэн, Чунцинское, Сяолуньтань (провинция Юньнань), Наньтун, но на сегодняшний день запасы еще по большей части не изучены. Разведывательные и исследовательские работы, а также добыча угля в Юго-Западном Китае затруднены из-за сложного

рельефа территории и недоразвитой транспортной инфраструктуры [5–7].

Все китайские провинции по уровню добычи угля можно разделить на следующие группы: импортеры угля, экспортеры угля, самодостаточные регионы. Импортерами являются Центральный и Южный Китай, Северо-Восточный и Восточный Китай. Как было уже отмечено, эти регионы содержат огромные запасы угля, но несмотря на это, продолжают его ввозить. Это объясняется, с одной стороны, стремительным развитием региона, и одновременно отсталостью добычи угля, устаревшим оборудованием и слабой геологической разведкой. Эти районы требуют повышения рентабельности малых угольных предприятий, развитие мощностей средних и крупных шахт и увеличение объемов добычи в малых шахтах. Также остро стоит вопрос об увеличении масштабов добычи коксующихся углей. Экспортеры угля – это провинции, обладающие огромными угольными запасами и транспортирующие их в другие районы или за границу. К ним относятся следующие провинции: Шэньси и Шаньси, АР Внутренняя Монголия и Нинся-Хуэйский АР. Этим районам также требуется современное техническое оснащение и перевооружение предприятий и усиление геологоразведки, а также закрытие или реструктуризация убыточных малых шахт. Самодостаточные регионы – это те провинции, которые самостоятельно обеспечивают свои потребности в угле. Это Юго-Западный Китай, провинции Ганьсу и Цинхай, Синьцзян-Уйгурский АР. В этих регионах планируется наладить экспорт угля и ограничить строительство малых шахт, но быстрое развитие угольной промышленности в данных регионах сдерживается недоразвитостью транспортной системы. Следовательно, для дальнейшего быстрого и планомерного развития угольной промышленности Китая необходимо в регионах-экспортерах увеличить производство, в регионах-импортерах и в самодостаточных регионах – стабилизировать добычу угля.

Необходимо дополнить, что месторождения углей сопряжены с месторождениями черных и цветных металлов, урана, германия, что мешает систематизировать угольные запасы, также немаловажным является тот факт, что различные типы углей залегают по-разному, например, бурые угли залегают горизонтально, а антрацит и коксующиеся угли – вертикально.

На этапе 14-го пятилетнего плана развития Китая ожидается, что экономический рост составит около 5,6–6 %, энергопотребление возрастет на 2 %, что соответствует приблизительно 100 млн. тонн угольного эквивалента. Общее потребление энергии планируется сохранять в пределах

около 5,5 млрд. тонн угольного эквивалента. План развития Китая на 14-ю пятилетку предполагает, что потребление угля, нефти, а тем более, природного газа, будет увеличиваться (рис. 1).

Он допускает рост угольных мощностей и не запрещает возведение новых угольных электростанций. Китай намеревается идти по пути «чистого и эффективного использования угля», что подразумевает уменьшение выбросов CO<sub>2</sub>, а также планируется введение больших налоговых льгот для развития низкоуглеродной экономики. Определяющим является тот факт, что количество углекислого газа, выбрасываемого в атмосферу при сжигании угля в 2,5 раза больше, чем при сжигании нефти и газа на единицу энергии, соответственно, и проблема борьбы с вредными выбросами стоит острее при использовании угля.

Основной причиной образования парниковых газов, как известно, является распространение двуокси углерода. Сами по себе парниковые газы не считаются загрязнителями, так как их концентрации не влияют на здоровье людей, но аккумуляция их в атмосфере несет серьезные последствия, ведет к глобальному потеплению. По данным некоторых ученых, потепление более чем на 2 °C ведет к необратимым последствиям для экологии. Это реальная угроза для всего человечества, так как ведет к нарушению системы выпадения осадков, поднятию уровня Мирового океана, увеличению количества экстремальных погодных явлений (ураганы, засухи и наводнения, увеличение кислотности океанов и др.). В сложившейся ситуации очень важно ограничивать выбросы парниковых газов и отдавать приоритеты не только развитию экономики, но и одновременно защите окружающей среды [8–11].



Рис. 1. Структура потребления первичных энергетических ресурсов в Китае

К слову, Китай на Международном климатическом саммите объявил, что к 2060 году страна не будет уже производить парниковых газов, при этом пик их выбросов придется на 2030 год. После этого заявления вновь стали закрывать угольные шахты. Активнее всего в Китае развивается гидроэнергетика, так как его территория богата горными реками. Такие запасы электроэнергии по некоторым оценкам могут составлять до 680 млн. киловатт. На юго-западе страны, где небольшие запасы угля и наибольшая потребность в электроэнергии, располагается основная часть электростанций, также большое количество компаний используют солнечные электростанции. Такие возобновляемые источники энергии, как энергия воды, солнца или ветра, выгодны тем, что не зависят от геополитической обстановки в мире. Значительно возрос спрос на природный газ, так как теплостанции постепенно пытаются переходить с экологически вредного угля на «зеленый» газ.

Еще одно из преимущественных направлений пятилетнего плана является соблюдение экопринципов в строительстве («зеленое» строительство), так как, не решив имеющиеся экологические проблемы в Китае, невозможно достичь высокого уровня жизни населения страны [12]. Китай занимает первое место в мире по количеству выбросов парниковых газов в атмосферу. Например, в 2019 году на Китай пришлось 30 % всех мировых выбросов диоксида углерода. Это колоссальная цифра, учитывая, что у США, которые находятся на втором месте, объем выбросов вдвое меньше, чем у лидера.

Также не стоит забывать о том, что в китайском угле содержится большое количество серы, 90 % которой при сжигании угля в виде диоксида серы (SO<sub>2</sub>) поступает в атмосферу, что приводит к ее загрязнению. Около 60 % этих выбросов производят загородные предприятия и 40 % приходится на промышленные предприятия города. Но городские власти, вместо того, чтобы принимать

эффективные меры по предупреждению загрязнений атмосферы, просто переносят загрязняющие цеха за пределы города. Неудивительно, что более трети территории Китая подвержены кислотным дождям, что является следствием загрязнения атмосферы диоксидом серы.

Также большой урон окружающей среде наносит угольная пыль, 71,1 % которой поступает в атмосферу от промышленных объектов. Наибольший объем этих объектов сконцентрирован в приморских районах и в нижнем и среднем течении реки Янцзы, огромное количество загрязняющих веществ скапливаются в низкогорьях и на Великой Китайской равнине. Самым чистым считается остров Хайнань, где количество выбросов – минимально.

В последнее время в крупнейших китайских городах все чаще наблюдается такое явление, как смог, который очень опасен для жизни китайского общества. В некоторых городах предельно допустимая концентрация твердых аэрозольных веществ в воздухе может превышать норму почти в 4 раза. Таким образом, ценой экономического прорыва Китая становится назревающий экологический кризис. Из-за китайского смога страдают не только сами китайцы, но и пограничные страны, такие как Россия, Южная Корея, Япония, поэтому Китай экстренно принимает меры по защите окружающей среды и предотвращению ее загрязнения, что на данном этапе является общенациональной задачей.

В целом использование угля наносит огромный ущерб не только окружающей среде, но и

здоровью людей. Значительно увеличилась смертность населения от онкологических заболеваний и заболеваний дыхательных путей. Китай – это страна, которая окунулась с головой в экологические проблемы, так как правительство с одной стороны недооценивало уровень загрязнения, а с другой стороны переоценивало способность природы к самоочищению и «смотрело сквозь пальцы» на многие экологические проблемы, а год от года ситуация становится все критичнее. Говоря об экологической ситуации, необходимо учитывать ущерб, наносимый не только сжиганием угля, но и разведкой месторождений, добычей, транспортировкой и хранением полезного ископаемого. Бесспорно, наиболее негативное воздействие на экологию оказывают загрязнение атмосферы, гидросферы, изъятие земель под строительство добывающих предприятий и электростанций, а также для размещения отходов. К слову, в районах, где производство угля превышает 1 млн. т. в год, имеет место оседание почвы до 30 га. Основными продуктами, загрязняющими атмосферу, являются: окислы азота, угарный газ, зола, сернистый ангидрид, которые образуются в результате сгорания угля.

Несмотря на это, из-за отсутствия собственного газа, Китай продолжает использовать дешевый уголь. Угольная промышленность остается на лидирующей позиции в стране. Уровень потребления угля в общей энергетике страны составляет более 60 % (рис. 2).

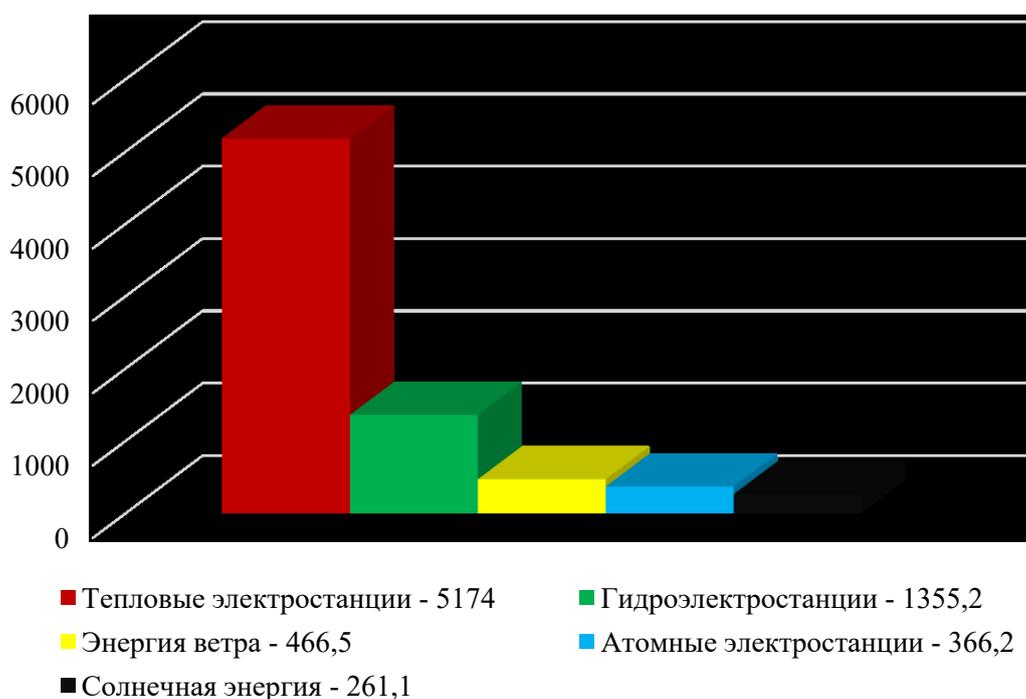


Рис. 2. Выработка электроэнергии в КНР в 2020 году (ТВтч)

Хотя в некоторых районах Китая зимы суровые, центрального отопления там нет, вернее есть только на севере Китая. Батареи в основном отапливаются с помощью угля, отапливать дровами с недавних пор государство запретило, поэтому в зимнее время проблемы со смогом становятся еще значительнее. Конечно Китай стремится развивать экологически чистое отопление, активно занимается поиском альтернатив, чтобы свести к минимуму использование угля, тем самым спасая экологическую ситуацию. Например, в последнее время все чаще можно услышать об отоплении помещений с помощью извлечения тепла из сточных вод.

В северной части Китая в отоплении нуждаются до шести месяцев в году, следовательно, тепло должно быть государственным и доступным товаром. Из-за постоянного роста городов и потребности в комфортном проживании спрос на тепло будет постоянно расти.

Проблема в том, что огромное количество энергии уходит на отопление зданий в Китае, например, чтобы нагреть 1 м<sup>2</sup> площади нужно израсходовать энергии в 2–3 раза больше, чем в странах Европы или США при одинаковых показателях среднегодовых температур. Главной причиной этой неэффективности является крайне плохая теплоизоляция в китайских зданиях. Вообще количество энергии, которая затрачивается на отопление дома, напрямую зависит от теплопотерь, чем больше тепла теряется, тем мощнее должна быть система отопления. Если рассматривать многоквартирные дома, то там основная масса тепла уходит через окна (около 55 %), а так как в Китае не принято устанавливать стеклопакеты, то там нет ни тепло-, ни шумоизоляции. Помимо этого, около 45 % тепла утекает через стены.

Если говорить о китайском рынке теплоизоляционных материалов, то даже несмотря на то, что за последние десятилетия разработки в этой области достигли высокого уровня, он переживает сложный этап по расширению и развитию. На сегодняшний день основными теплоизоляционными материалами в Китае являются стекловолокно и минеральная вата. Хотя темпы роста производства теплоизоляционных материалов постоянно увеличиваются, это не позволяет говорить о том, что Китай на данный момент хорошо «изолирован». Это касается именно жилищного строительства, так как в области промышленной изоляции дела обстоят намного лучше. Более 95 % жилой площади слабо изолированы и потребляют сверх нормы огромное количество энергии, а из строящегося жилья энергосберегающим стандартам соответствует всего лишь 24,6 % жилых зданий. Речь идет о городском жилье, но не

стоит забывать о том, что 60 % китайцев живут в деревенских районах, где об изоляции и не слышали. Поэтому у Китая есть большие резервы для производства новейших высококачественных теплоизоляционных материалов, потому как средства, вложенные в них, через несколько лет обязательно вернутся за счет уменьшения расходов на отопление.

Инвестирование в создание новых эффективных теплоизоляционных материалов является беспроигрышным вариантом, так как позволяет снизить энергопотребление, что значительно уменьшает количество выбросов углекислого газа в атмосферу. Более того, хорошая теплоизоляция приносит экономию в течение всего года, сокращая потребление энергии на обогрев в холодное время года и на охлаждение – в жаркое. Вложение средств в создание эффективных теплоизоляционных материалов – это, в первую очередь, вопрос государственной политики. В Китае, как и во многих других странах, размер платы за отопление зависит только от площади помещения, и совершенно не важно, достаточно ли тепло в здании или холодно, сумма оплаты остается неизменной. В соответствии с этим, производителям просто не выгодно использовать качественную теплоизоляцию, так как она ведет к удорожанию конструкции в целом.

Тем не менее, Китай пересматривает свою политику в этом направлении, и в ближайшем будущем эффективные теплоизоляционные материалы будут более востребованы.

На протяжении последних нескольких лет по причине сложной экологической обстановки на земле отдельные государства стали использовать углеводородное топливо для отопления жилых и промышленных объектов, при этом полностью отказавшись от использования угля. Китай также пробовал снизить потребление угля, заменив его на газ. Между тем, в районах с суровыми климатическими условиями эти изменения имели негативный результат [13–16]. Плюс ко всему, резкий скачок в потреблении газа привел к его нехватке, следовательно, цены на газ поползли вверх.

В провинции Хэбэй занятия со школьниками вынуждены были проводить под солнцем на улице, так как в зданиях школ было ужасно холодно. Такие последствия вызвали негодование жителей провинции, и правительству пришлось восстановить работу угольных электростанций. На сегодняшний день провинция Хэбэй является активным потребителем угля, который используется не только для отопления жилых зданий и сооружений, но и для обеспечения деятельности промышленных предприятий, в том числе и металлургических.

Очень сложным для Китая, а также для всего мира оказался 2020 год, когда все мировое сообщество охватила пандемия. После пандемийных локдаунов мировая экономика начала потихоньку восстанавливаться, резко возрос спрос на энергоносители, и цена на уголь достигла максимального значения – около 250 долларов за тонну. В итоге в некоторых провинциях электростанции не смогли закупать топливо в нужном объеме и вынуждены были прекратить свою работу. Электричества стало резко не хватать, стали останавливаться энергоемкие предприятия, в городах ввели веерное отключение света. Также на энергетический кризис в Китае оказали влияние проблемы с импортом угля. Основными поставщиками угля в Китай являются Австралия и Индонезия. Австралия продавала Китаю около 70 млн. тонн угля ежегодно, половина из него – это коксующийся уголь, который необходим для металлургического производства. Проблемы начались в октябре 2020 года, когда Китай отказался от ввоза угля из Австралии из-за осложнения отношений с ней. Для Австралии это был конечно удар по национальной экономике, так как там добывается около 540 млн. тонн энергетических и коксующихся углей, 75 % которых экспортируется. Если кризис затянется, то у Австралии возникнут серьезные проблемы, так как заместить китайский рынок сбыта на данный момент нечем. В связи со сложившейся ситуацией возросли поставки российского угля в Китай, но Россия тоже не может наращивать добычу в таком объеме, а также есть проблемы с пропускной способностью транспортных магистралей и загруженностью железнодорожных путей. В ряде же районов Китая, которые использовали австралийский уголь, это оказало негативное влияние на электростанции. В связи с этим в провинциях

Чжэцзян и Хунань были вынуждены ограничить использование электричества. При этом Китай направил все свои силы на увеличение объема производства угля и также увеличил импорт из Монголии и Индонезии. Чтобы быстрее и без особых потерь выйти из кризиса, Китаю необходимо вернуть добычу угля в том же объеме, но привлекая более технологичные решения. Одновременно, с увеличением добычи угля, необходимо снижать цены на него [17].

Таким образом, в Китае постепенно увеличивается количество отходов от сжигания угля с местных электростанций (золошлаковые отходы), которые транспортируются, складываются и хранятся в отвалах. Объем этих накопленных техногенных отходов постоянно увеличивается и занимает огромные площади земель, что загрязняет не только почву, но и атмосферу в результате пыления, а также ближайшие водоемы и грунтовые воды в результате размыва дождевыми и тальными водами. Также на содержание отвалов государство тратит немалые средства, а утрата плодородных земель, учитывая, что Китай не обладает большим земельным фондом, наносит огромный ущерб народному хозяйству. В целом все это оказывает негативное влияние на экологическую обстановку в стране. На данном этапе в приоритетной задаче у правительства стоит решение проблемы утилизации отходов сжигания угля.

Еще в 2010 году правительством Китая были введены налоговые льготы и дополнительное финансирование проектов, связанных с утилизацией золы-уноса, и к 2015 году показатель утилизации достиг 70 % от годового объема образования [18–22]. Структура использования золы-уноса в Китае представлена в таб. 1.

Таблица 1

### Основные направления использования золы-уноса в Китае

№ п/п	Направления использования	Процент использования, %
1.	Производство строительных материалов (многокомпонентные вяжущие и материалы, добавки в цемент, кирпич, керамзит, газозолобетон и др.)	35
2.	Дорожное строительство (битумные добавки для производства бетонов, материалы для покрытий, боковые насыпи и др.)	20
3.	Сельскохозяйственные цели (производство удобрений, улучшение качества земель и т. д.)	15
4.	Закладка шахт или инженерная засыпка	15
5.	Добавки в бетоны и строительные растворы	10
6.	Другие применения, например, извлечение алюминия и др.	5

Как видно из таблицы, порядка 80 % золы-уноса утилизируется в строительной отрасли.

Извлечение из золы-уноса алюминия на сегодняшний день является одним из перспективнейших направлений утилизации. Например, в углях из провинции Шаньси содержится до

40–50 % оксида алюминия [23]. С 2011 года в Китае действует государственная программа бюджетного субсидирования части капитальных затрат перерабатывающим предприятиям, которые были организованы для извлечения глинозема из золошлаковых отходов.

Китай постоянно стремится к росту утилизации золошлаковых отходов, чтобы выйти на 100 %-ный уровень, однако определяющим показателем несбалансированной утилизации является различный показатель развитости отдельных регионов Китая, а также различная география самих источников образования и потребления золы-уноса.

Например, в таких развитых районах, как Янцзы и Бохайя, показатель утилизации летучей золы может достигать и до 100 %, а в неразвитой части Китая уровень использования золы еле-еле достигает 30 %, хотя иногда и наблюдается ее дефицит. При этом дефицит наблюдается лишь высококачественной золы, а низкокачественная зола практически не подлежит утилизации. Это является еще одной из основных проблем применения золы-уноса. В целом, максимальный показатель утилизации золы-уноса достигает в тех районах, где наблюдается наибольшая концентрация строительных предприятий [24].

И как было показано ранее, зола-уноса все-таки имеет ограниченные области применения, в основном это строительный сектор и производство строительных материалов. В качестве добавки при производстве цемента и бетона с целью замены некоторых глинистых материалов летучая зола используется уже более 70 лет. Известны разработки по применению летучей золы в качестве одного из компонентов газобетонной смеси, из которой в последующем изготавливали газобетонные блоки. Это довольно перспективное направление применения золы, так как позволяет сократить расходы на термическую обработку.

При этом суровый климат и холодные зимы в некоторых районах Китая предопределяют необходимость применения высококачественных теплоизоляционных материалов. Одним из таких материалов и является газобетон. Это материал, который пользуется большой популярностью по всему миру, применяется как в гражданском, так и промышленном строительстве. Так как газобетон является хорошим теплоизоляционным материалом за счет пористой структуры, то в построенных из него домах обычно зимой тепло, а летом – не жарко. Из газобетона можно возводить уникальные здания и сооружения благодаря простоте его обработки: пиленю, сверлению и так далее. Газобетон достаточно водостоек и огнестоек, не подвергается гниению и воздействию плесени, достаточно долговечен и имеет меньшую радиоактивность по сравнению с тяжелым бетоном, помимо этого еще обладает и звукоизоляционными свойствами.

Применение эффективных теплоизоляционных материалов при строительстве зданий различного назначения позволяет уменьшить затраты на электроэнергию для отопления в несколько раз, что снизит негативное воздействие на окружающую среду. Также использование отходов производства в качестве основного или дополнительного сырья для выпуска новых строительных материалов, то есть так называемое вторичное производство, благоприятно отразится на экологии региона. Как было сказано ранее, наиболее крупнотоннажным отходом во многих регионах Китая является зола-унос. Применение ее в различных составах газобетонов на сегодняшний день является наиболее перспективным выбором, так как способствует уменьшению экологической нагрузки на окружающую среду, а также позволяет обеспечить эффективную тепло- и звукоизоляцию [25–32].

По итогам пятилетнего плана доля городского населения должна увеличиться до 65 %. Это значит, что за пять лет численность населения в городах вырастет примерно на 50 миллионов человек. Данные за 2019 год показывают, что эта величина была около 60 %. Соответственно, нужны будут дополнительные рабочие места, жилье и так далее, значительно возрастет плотность населения.

Одним из значительных раздражителей является шум антропогенного происхождения. На первом месте по шумовому загрязнению в городах находится автомобильный транспорт (60÷80 %). Следующий по уровню шума – это железнодорожный транспорт. Также генераторами шума служат: авиатранспорт, промышленные предприятия, автосигнализация, строительные и ремонтные работы и так далее. Шум был определен как один из негативных факторов, влияющих на человека. Проблема защиты человека от звукового воздействия неизбежно выходит на национальный уровень. Поддержание приемлемых условий окружающей среды имеет огромное значение для выживания и развития государства в целом. Итак, успешное решение этой проблемы является ключом к формированию отличного генфонда страны [33].

В современных условиях население мегаполисов подвергается постоянному воздействию шума. Эта проблема актуальна и для Китая, в котором плотность населения очень велика. Чтобы хоть как-то минимизировать воздействие шума в домах, офисах, квартирах в данных условиях используются современные звукоизоляционные материалы.

Звукоизоляционные материалы с такими свойствами, как звукопоглощение и звукоизоляция необходимы для защиты от определенных видов шумов.

На сегодняшний день для звукоизоляции используется множество различных материалов, например, стеклоштапельное волокно, акустический фибролит, материалы из каменной ваты в виде плит различной толщины, тонкие и эффективные звукоизоляционные мембраны, стекловолокнистый холст с битумной пропиткой и так далее. Вместе с тем, в связи с бурным развитием строительства и необходимостью сокращения сроков возведения зданий и сооружений на современном этапе более востребованными становятся звукоизоляционно-конструкционные материалы. Это могут быть блоки из ячеистого бетона, в частности газобетона, акустические гипсокартонные листы и шумоизоляционные панели КНАУФ, трехслойные сэндвич-панели и так далее [34–37].

Эффективные звукоизоляционные материалы, как было отмечено выше, должны поглощать и рассеивать звуковую волну. Это свойство характеризует так называемый «коэффициент шумопоглощения», значения которого лежат в интервале от 0 до 1. Если материал является звукоотражающим, то значение коэффициента стремится к 0, а если материал хорошо поглощает звук, то его значение ближе к 1. Другие значения показывают какой процент падающей энергии поглощается поверхностью (например, 0,4 – это 40 %). Согласно СНиП II-12-77 «Защита от шума» материалы, коэффициент у которых более 0,4 при частоте 1000 Гц, считаются шумопоглощающими. Данный коэффициент зависит от свойств строительных материалов, в частности от пористости. Например, газобетон, полученный в результате химического взаимодействия извести и алюминиевой пудры, имеет достаточно высокий коэффициент звукопоглощения за счет большого количества пор.

Одним из условий получения высокоэффективных звукопоглощающих свойств газобетона является наличие в его структуре крупных пор, при этом они должны быть открытыми и сообщающимися, чтобы попадающая звуковая волна плутала по системе пор, пока ее энергия совсем не угаснет, либо преобразуется в тепловую энергию [38–40]. Таким образом, в звукопоглощающем материале в результате внутреннего трения колебательная энергия переходит в тепловую, тем самым уменьшая шум. Вообще открытые сообщающиеся поры большого сечения увеличивают диффузию в структуре, обеспечивают глубокое проникновение в материал звуковых волн, а также поглощение их стенками пор [41].

Еще одним из важнейших показателей, характеризующих качественную звукоизоляцию, является «индекс звукоизоляции», который показывает степень отражения звука материалом. Измеряется он в децибелах. Индекс звукоизоляции у газобетонных блоков находится в пределах 43 – 44 дБ. Как было отмечено выше, индекс звукоизоляции зависит как от толщины, так и от структуры материала. Наиболее хорошим звукоотражающим эффектом обладают материалы с гладкой поверхностью, такие как, стекло, листы металла и другие.

В областных центрах и больших городах Китая за счет большой плотности населения уровень шума значительно превышает допустимые нормы, поэтому вопросы шумоизоляции стоят достаточно остро, так как современному человеку необходимы достаточно комфортные условия проживания.

**Выводы.** Анализируя все вышеизложенное, можно сделать вывод, что в настоящее время наметились предпосылки использования золы-уноса Китая во вторичном производстве. Как было отмечено выше, в дальнейшем производство качественных газобетонных смесей также будет занимать лидирующую позицию, так как именно они являются основой для получения теплоизоляционных и звукоизоляционных материалов.

Это актуальное направление для Китая, так как позволяет улучшить экологическую ситуацию путем утилизации образующихся отходов от сжигания угля. При этом использование газобетона в строительстве значительно снижает теплотери зданий, что немаловажно в суровых климатических условиях северного Китая. Также использование газобетона позволяет решить проблему звукоизоляции, которая в данный момент очень остро стоит в густонаселенных странах.

**Источник финансирования.** Исследование проводилось в рамках Государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации относительно выделения финансирования на создание новых лабораторий в 2021 году, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей национального проекта "Наука и университеты" название лаборатории "Ресурсосберегающие технологии, оборудование и комплексы", FZWN-2021-0014.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соболева К.А., Тулей М.Д., Гололобова М.А. Обеспеченность минеральными ресурсами стран Восточной Азии // Институты и механизмы инновационного развития: мировой опыт и российская практика. Сборник научных статей 9-й

Международной научно-практической конференции. 2019. С. 312–315.

2. Чжоу Ц., Мамий И.П. Экономический анализ добычи и потребления каменного угля в КНР в период с 2005-2017 гг. // Теоретическая экономика. 2019. № 3 (51). С. 108–112.

3. Растяникова Е.В. Страны БРИКС: Тренды экономического роста добывающей промышленности в XXI веке // Вопросы статистики. 2019. Т. 26. № 5. С. 43–52. doi: 10.34023/2313-6383-2019-26-5-43-52.

4. Wang F., Novikova O.V. Optimizing energy balance of China: Problems and Prospects // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics. 2019. Т. 12. № 2. С. 63–70. doi: 10.18721/JE.12206.

5. Жигулева В.В. Рынок энергетических ресурсов Китая: интересы и возможности России. М.: ИДВ РАН, 2011. 246 с.

6. Козлов А.В., Чжан Ся. Инновационный потенциал промышленных предприятий: методика определения и сравнительный анализ на примере угольной промышленности Китая // Вестник Забайкальского государственного университета. 2015. № 5 (120). С. 100–109.

7. Островский А.В., Афонасьева А.В., Каменнов П.Б. Перспективы развития науки, техники и инноваций в КНР // Восточная Азия: факты и аналитика. 2019. № 2. С. 6–28. doi: 10.24411/2686-7702-2019-10008.

8. Титаренко М.Л. Стратегия превращения Китая в супериндустриальное государство (1996-2050 гг.). М.: Памятники исторической мысли, 2002. 200 с.

9. Китай на пути к возрождению. К 80-летию академика М. Л. Титаренко. Сборник статей. М.: ИЛ Форум, 2014. 512 с.

10. Hossain Md S, Li B., Chakraborty S., Hossain Md R, Rahman Md T. A comparative analysis on China's energy issues and CO<sub>2</sub> emissions in global perspectives // Sustainable Energy 2015. № 1. Vol. 3. Pp. 1–8. doi: 10.12691/rse-3-1-1.

11. Чжоу Ц. Анализ структуры производства и потребления энергетических ресурсов стран-членов БРИКС // Инновации и инвестиции. 2020. № 7. С. 53–57.

12. Dudin M.N., Frolova E.E., Artemeva Yu.A., Bezbakh V.V., Kirsanov A.N. Problems and Perspectives of BRICS countries transfer to "Green Economy" and Low-Carbon Energy Industry // International Journal of Energy Economics and Policy. 2016. Т. 6. № 4. С. 714–720.

13. Богачева Т.М., Сурмин А.А. Сокращение вредного воздействия ТЭС на окружающую среду // Безопасность жизнедеятельности. 2017. № 12 (204). С. 34–39.

14. Высоцкий С.П., Титкова В.С. Экологические показатели использования возобновляемых ресурсов для генерации электрической и тепловой энергии // Вести Автомобильно-дорожного института. 2019. № 3 (30). С. 26–34.

15. Chang S., Zhuo J.-K., Meng S., Qin S., Yao Q. Clean coal technologies in China: current status and future perspectives // Engineering. 2016. № 2 (4). Pp. 447–459. doi: 10.1016/J.ENG.2016.04.015.

16. Chen W., Xu R. Clean coal technology development in China // Energy Policy. 2010. Vol.38(5). Pp. 2123–2130. doi:10.1016/j.enpol.2009.06.003.

17. Fang J., Xiao B., Weedon A. China's power supply is struggling as winter temperatures plunge. Is the ban on Australian coal to blame? // ABC. 18.12.2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.abc.net.au/news/2020-12-18/china-electricity-power-shortage-hunan-zhejiang-australia-coal/12993418> (дата обращения: 23.04.2021).

18. He Y., Luo Q., Hu H. Situation analysis and countermeasures of China's fly ash pollution prevention and control // Procedia Environmental Sciences. 2012. Т. 16. Pp. 690–696. doi: 10.1016/j.proenv.2012.10.095.

19. Золотова И., Ю. Бенчмаркинг зарубежного опыта утилизации продуктов сжигания твердого топлива угольных ТЭС // Инновации и инвестиции. 2020. № 7. С. 123–128.

20. Елистраткин М.Ю., Шапиро А.Э., Милькина А.С., Лесовик Г.А., Агеева М.С. Геоника. Геомиметика как основополагающее направление для развития строительной индустрии // Научные технологии и инновации. Электронный сборник докладов Международной науч.-практ. конф., посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. С. 125–129. doi: 10.12737/conferencearticle\_5cecedc20c87a3.92824648.

21. Елистраткин М.Ю., Глаголев Е.С., Котов И.В., Минакова А.В., Авад М.Н. Геоника. Геомиметика как ключ к реализации концепции «зеленого» строительства // Научные технологии и инновации. Электронный сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. С. 130–134. doi: 10.12737/conferencearticle\_5cecedc2186c63.96789296.

22. Fomina E.V., Lesovik V.S., Kozhukhova N.I., Chulenyov A.S. Role of solutions when metamorphic transformations in construction composites // Materials Science Forum. 2020. Т. 974 MSF. С. 168–174. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.168.

23. Ding J., Ma S., Shen S., Xie Z., Zheng S., Zhang Y. Research and industrialization progress of

recovering alumina from fly ash: A concise review // *Waste Management*. 2017. Т. 60. Pp. 375–387. doi: 10.1016/j.wasman.2016.06.009.

24. Luo Y., Wu Y., Ma S., Zheng S., Zhang Y., Chu P.K. Utilization of coal fly ash in China: a mini-review on challenges and future directions // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Pp. 1–14. doi: 10.1007/s11356-020-08864-4.

25. Юфенг С. Производство и применение автоклавного газобетона в Китае // *Технологии бетонов*. 2020. № 3-4 (164-165). С. 16–21.

26. Федюк Р.С., Тимохин Р.А., Смоляков А.К. Научное лидерство китайских ученых в области строительных технологий // *Россия и Китай: проблемы стратегического взаимодействия: сборник Восточного центра*. 2017. № 19. С.21–24.

27. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Voronov V.V., Absimetov M.V., Elistratkin M.Y. Non-autoclaved aerated concrete on the basis of composite binder using technogenic raw materials // *Materials Science Forum*. 2019. Т. 945 MSF. С. 205–211. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.205.

28. Makul N., Fediuk R., Amran H.M.M., Zeyad A.M., de Azevedo A.R.G., Klyuev S., Vatin N., Karelina M. Capacity to develop recycled aggregate concrete in south east asia // *Buildings*. 2021. Т. 11. № 6. 234. doi: 10.3390/buildings11060234.

29. Volodchenko A.A., Vorontsov V.M., Cherepanova I.A. Effective non-autoclave silicate blocks of casting molding process based on unconventional aluminosilicate raw materials // *Materials Science Forum*. 2019. Т. 974 MSF. С. 55–60. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.55.

30. Markov A.Y., Strokova V.V., Markova I.Y., Stepanenko M.A. Physico-chemical properties of fuel ashes as factor of interaction with cationic bitumen emulsion // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Т. 95. С. 294–300. doi: 10.1007/978-3-030-54652-6\_44.

31. Nelubova V., Strokova V., Fediuk R., Amran M., Vatin N., Vasilev Y. Effect of an aluminosilicate disperse additive on behaviors of autoclave silicate materials // *Buildings*. 2021. Т. 11. № 6. doi: 10.3390/buildings11060239.

32. Lesovik R.V., Ageeva M.S., Matyukhina A.A., Fomina E.V. On the issue of designing structures of composite binders // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Т. 95. С. 246–252. doi: 10.1007/978-3-030-54652-6\_37.

33. Пучка О.В., Лесовик В.С., Вайсера С.С. Тепло- и звукоизоляционные материалы как основа создания комфортной среды обитания человека // *Эффективные строительные композиты*.

Научно-практическая конференция к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН, доктора технических наук Баженова Юрия Михайловича. Сборник докладов. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2015. С. 537–542.

34. Евтушенко Е.В., Коняева Е.В., Ставчикова Л.Ф. Современные звукоизоляционные материалы // *Физика и современные технологии в АПК. Материалы международной молодежной научно-практической конференции*. 2016. С. 325–330.

35. Yao Y.F., Gao L., Yang Q.L., Zhou G., Fu Y.Q., Liu G.F. Sound insulation property of PVC matrix composite material filled with cenosphere fly ash // *Gaofenzi cailiao kexue yu gongcheng / polymeric materials science and engineering*. 2009. Т. 25. № 11. Pp. 61–64.

36. Sargianis J.J., Kim H.-I., Andres E., Suhra J. Sound and vibration damping characteristics in natural material based sandwich composites // *Composite Structures*. 2013. № 96. Pp. 538–544. doi: 10.1016/j.compstruct.2012.09.006.

37. Amran M., Fediuk R., Murali G., Vatin N., Al-Fakih A. Sound-Absorbing Acoustic Concretes: A Review // *Sustainability*. 2021. Т. 13. №19. 10712. doi: 10.3390/su131910712.

38. Федюк Р.С. Повышение эффективности неавтоклавных ячеистых бетонов с улучшенными звукопоглощающими характеристиками // *Строительное материаловедение: Настоящее и будущее. Сборник материалов I Всероссийской научной конференции, посвящённой 90-летию выдающегося учёного-материаловеда, академика РААСН Юрия Михайловича Баженова*. Москва, 2020. С. 199–204.

39. Федюк Р.С., Баранов А.В., Мугахед Амран Й.Х. Влияние пористой структуры на звукопоглощение ячеистого бетона // *Строительные материалы и изделия*. 2020. Т. 3. №2. С. 5–18.

40. Absimetov M.V., Elistratkin M.Y., Ageeva M.S. Structure formation features of non-autoclaved gas concrete matrix on the basis of composite binders with various mineral additives // *Materials Science Forum*. 2019. Т. 974 MSF. С. 249–254. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.249.

41. Потоцкий В.Н., Гречаников А.В., Козел А.С., Кононок А.А. Исследование параметров шума звукоизоляционных (звукопоглощающих) материалов // *54-ая международная научно-практическая конференция преподавателей и студентов. Материалы докладов в 2-х томах*. Витебск. 2021. С. 282–284.

#### Информация об авторах

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

**Лесовик Руслан Валерьевич**, доктор технических наук, профессор, проректор по международной деятельности. E-mail: ruslan\_lesovik@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Клюев Сергей Васильевич**, кандидат технических наук, доцент, начальник управления научно-исследовательских работ. E-mail: Klyuev@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Сяо Вэньсюй**, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Чжан Сюань**, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 10.12.2021 г.

© Лесовик Г.А., Лесовик Р.В., Клюев С.В., Вэньсюй С., Сюань Ч., 2022

*\*Lesovik G.A., Lesovik R.V., Klyuev S.V., Wenxu X., Xuan Zh.*

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

*\*E-mail: galina.lesovik@mail.ru*

## ABOUT THE PROSPECTS OF USING FLY ASH IN AERATED CONCRETE

**Abstract.** *The coal industry is leading in China. The further five-year development plan implies the coal industry capacities growth, but at the same time, it is planned to follow the path of “clean and efficient use of coal”. One of the priority areas is “green” construction. In this regard, the issue of disposal of coal burning waste is acute, the volume of which is constantly increasing, thereby polluting the soil, atmosphere and nearby reservoirs. Inefficient thermal insulation is the main reason for the large overspending of energy for heating buildings and structures. The harsh climate and cold winters in some areas of China predetermine the necessity of using high-quality heat-insulating materials. One of such materials is gas concrete. However, along with heat insulation it should also perform soundproofing function to minimize the noise exposure of big-city residents. It is noted that the production of aerated concrete mixes occupies a leading position, and the use of waste from fuel combustion as one of the components of aerated concrete allows not only to reduce the cost of its production, but also to reduce the environmental burden on the environment.*

**Keywords:** *environment, fly ash, heat-insulating and soundproofing gas concrete, coal combustion waste recycling, development priorities.*

### REFERENCES

1. Soboleva K.A., Tuley M.D., Gololobova M.A. Sufficiency of mineral resources in Eastern Asia countries [Obespechennost' mineral'nykh resursami stran Vostochnoj Azii]. Instituty i mekhanizmy innovacionnogo razvitiya: mirovoj opyt i rossijskaya praktika. Sbornik nauchnykh statej 9-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. 2019. Pp. 312–315. (rus)
2. Zhou C., Mamiy I.P. Economic analysis of coal mining and consumption in PRC in the period 2005–2017 gg. [Ekonomicheskij analiz dobychi i potrebleniya kamennogo uglja v KNR v period s 2005–2017 gg.]. Teoreticheskaya ekonomika. 2019. No. 3(51). Pp. 108–112. (rus)
3. Rastyannikova E.V. BRICS countries: Economic growth trends of extraction industry in the XXI century [Strany BRIKS: Trendy ekonomicheskogo rosta dobyvayushchej promyshlennosti v XXI veke]. Voprosy statistiki. 2019. Vol. 26. No. 5. Pp. 43–52. doi: 10.34023/2313-6383-2019-26-5-43-52. (rus)
4. Wang F., Novikova O.V. Optimizing energy balance of China: Problems and Prospects. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics. 2019. Vol. 12. No. 2. Pp. 63–70. doi: 10.18721/JE.12206.
5. ZHiguleva V.V., Energy resources market of China: interests and opportunities of Russia [Rynok energeticheskikh resursov Kitaya: interesy i vozmozhnosti Rossii]. M.: IDV RAN. 2011. 246 p. (rus)
6. Kozlov A.V., Zhang Xia. Innovative potential of industrial enterprises: methodology of determination and comparative analysis through the example of coal industry in China [Innovacionnyj potencial promyshlennykh predpriyatij: metodika opredeleniya i sravnitel'nyj analiz na primere ugol'noj promyshlennosti Kitaya]. Vestnik Zabajkal'skogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. No. 5 (120). Pp. 100–109. (rus)
7. Ostrovsky A.V., Afonasyeva A.V., Kamennov P.B. Prospects of science, technology and innovations development in PRC [Perspektivy

razvitiya nauki, tekhniki i innovacij v KNR]. *Vostochnaya Aziya: fakty i analitika*. 2019. No. 2. Pp. 6–28. doi: 10.24411/2686-7702-2019-10008. (rus)

8. Titarenko M.L. The strategy of China transformation into a super-industrial state (1996-2050) [Strategiya prevrashcheniya Kitaya v superindustrial'noe gosudarstvo (1996-2050 gg)]. M.: Pamyatniki istoricheskoy mysli. 2002. 200 p. (rus)

9. China on its way toward renaissance. For the 80th anniversary of academician M. L. Titarenko [Kitaj na puti k vrozozhdeniyu. K 80-letiyu akademika M. L. Titarenko]. *Sbornik statej*. M.: IL Forum. 2014. 512 p. (rus)

10. Hossain Md S, Li B., Chakraborty S., Hossain Md R, Rahman Md T. A comparative analysis on China's energy issues and CO<sub>2</sub> emissions in global perspectives. *Sustainable Energy*. 2015. No. 1. Vol. 3. Pp. 1–8. doi: 10.12691/rse-3-1-1.

11. Zhou C. Analysis of energy resources production and consumption patterns in BRICS countries [Analiz struktury proizvodstva i potrebleniya energeticheskikh resursov stran-chlenov BRIKS]. *Innovacii i investicii*. 2020. No. 7. Pp. 53–57. (rus)

12. Dudin M.N., Frolova E.E., Artemeva Yu.A., Bezbakh V.V., Kirsanov A.N. Problems and Perspectives of BRICS countries transfer to "Green Economy" and Low-Carbon Energy Industry. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2016. Vol. 6. No. 4. Pp. 714–720.

13. Bogacheva T.M., Surmin A.A. Reducing of thermal power plants' adverse impact on the environment [Sokrashchenie vrednogo vozdejstviya TES na okruzhayushchuyu sredu]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2017. No. 12 (204). Pp. 34-39. (rus)

14. Vysotsky S.P., Titkova V.S. Environmental indices of using renewable resources for electric and heat energy generation [Ekologicheskie pokazateli ispol'zovaniya vozobnovlyaemykh resursov dlya generacii elektricheskoy i teplovoj energii]. *Vesti Avtomobil'no-dorozhnogo institute*. 2019. No. 3 (30). Pp. 26–34. (rus)

15. Chang S., Zhuo J.-K., Meng S., Qin S., Yao Q. Clean coal technologies in China: current status and future perspectives. *Engineering*. 2016. No. 2 (4). Pp. 447–459. doi: 10.1016/J.ENG.2016.04.015.

16. Chen W., Xu R. Clean coal technology development in China. *Energy Policy*. 2010. Vol. 38(5). Pp. 2123–2130. doi:10.1016/j.enpol.2009.06.003

17. Fang J., Xiao B., Weedon A. China's power supply is struggling as winter temperatures plunge. Is the ban on Australian coal to blame? ABC. 18.12.2021. URL: <https://www.abc.net.au/news/2020-12-18/china-electricity-power-shortage-hunan-zhejiang-australia-coal/12993418> (date of treatment: 23.04.2021).

18. He Y., Luo Q., Hu H. Situation analysis and countermeasures of China's fly ash pollution prevention and control. *Procedia Environmental Sciences*. 2012. Vol. 16. Pp. 690–696. doi: 10.1016/j.proenv.2012.10.095.

19. Zolotova I.Yu. Benchmarking of foreign practices of coal-steam power plants' solid fuel combustion products recycling [Benchmarking zarubezhnogo opyta utilizacii produktov szhiganiya tverdogo topliva ugol'nyh TES]. *Innovacii i investicii*. 2020. No. 7. Pp. 123–128. (rus)

20. Elistratkin M.Yu., Shapiro A.E., Milkina A.S., Lesovik G.A., Ageeva M.S. Geonics. Geomimetics as a principal direction for building industry development [Geonika. Geomimetika kak osnovopolagayushchee napravlenie dlya razvitiya stroitel'noj industrii]. *Naukoemkie tekhnologii i innovacii. Elektronnyj sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 65-letiyu BGTU im. V.G. SHuhova*. 2019. Pp. 125–129. doi: 10.12737/conferencearticle\_5cecedc20c87a3.92824648. (rus)

21. Elistratkin M.Yu., Glagolev E.S., Kotov I.V., Minakova A.V., Avad M.N. Geonics. Geomimetics as a key to implementing the «green» construction concept [Geomimetika kak klyuch k realizacii koncepcii «zelenogo» stroitel'stva]. *Naukoemkie tekhnologii i innovacii. Elektronnyj sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 65-letiyu BGTU im. V.G. Shuhova*. 2019. Pp. 130–134. doi: 10.12737/conferencearticle\_5cecedc2186c63.96789296. (rus)

22. Fomina E.V., Lesovik V.S., Kozhukhova N.I., Chulenyov A.S. Role of solutions when metamorphic transformations in construction composites. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 974 MSF. Pp. 168–174. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.168.

23. Ding J., Ma Sh., Shen Sh., Xie Z., Zheng Sh., Zhang Y. Research and industrialization progress of recovering alumina from fly ash: A concise review. *Waste Management*. 2017. Vol. 60. Pp. 375–387. doi: 10.1016/j.wasman.2016.06.009.

24. Luo Y., Wu Y., Ma S., Zheng S., Zhang Y., Chu PK. Utilization of coal fly ash in China: a mini-review on challenges and future directions *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Pp. 1–14. doi: 10.1007/s11356-020-08864-4.

25. Youfeng S. Production and application of autoclaved gas concrete in China [Proizvodstvo i primeneniye avtoklavnogo gazobetonu v Kitae]. *Tekhnologii betonov*. 2020. No. 3-4 (164-165). Pp. 16–21. (rus)

26. Fedyuk R.S., Timokhin R.A., Smolyakov A.K. Scientific leadership of Chinese scientists in

construction technologies [Nauchnoe liderstvo kitajskih uchenyh v oblasti stroitel'nyh tekhnologij]. Rossiya i Kitaj: problemy strategicheskogo vzaimodejstviya: sbornik Vostochnogo centra. 2017. No. 19. Pp. 21–24. (rus)

27. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Voronov V.V., Absimetov M.V., Elistratkin M.Y. Non-autoclaved aerated concrete on the basis of composite binder using technogenic raw materials. Materials Science Forum. 2018. Vol. 945 MSF. Pp. 205–211. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.205.

28. Makul N., Fediuk R., Amran H.M.M., Zeyad A.M., de Azevedo A.R.G., Klyuev S., Vatin N., Karelina M. Capacity to develop recycled aggregate concrete in south east asia. Buildings. 2021. Vol. 11. No. 6. 234. doi: 10.3390/buildings11060234.

29. Volodchenko A.A., Vorontsov V.M., Cherepanova I.A. Effective non-autoclave silicate blocks of casting molding process based on unconventional aluminosilicate raw materials. Materials Science Forum. 2020. Vol. 974 MSF. Pp. 55–60. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.55.

30. Markov A.Y., Strokova V.V., Markova I.Y., Stepanenko M.A. Physico-chemical properties of fuel ashes as factor of interaction with cationic bitumen emulsion. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. Pp. 294–300. doi: 10.1007/978-3-030-54652-6\_44.

31. Nelubova V., Strokova V., Fediuk R., Amran M., Vatin N., Vasilev Y. Effect of an aluminosilicate disperse additive on behaviors of autoclave silicate materials. Buildings. 2021. Vol. 11. No. 6. doi: 10.3390/buildings11060239.

32. Lesovik R.V., Ageeva M.S., Matyukhina A.A., Fomina E.V. On the issue of designing structures of composite binders. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. Pp. 246–252. doi: 10.1007/978-3-030-54652-6\_37.

33. Puchka O.V., Lesovik V.S., Vaysera S.S. Heat-insulating and sound-insulating materials as the basis for creating comfortable living environment [Teplo- i zvukoizolyacionnye materialy kak osnova sozdaniya komfortnoj sredy obitaniya cheloveka]. Effektivnye stroitel'nye kompozity. Nauchno-prakticheskaya konferenciya k 85-letiyu zaslužennogo deyatelya nauki RF, akademika RAASN, doktora tekhnicheskikh nauk Bazhenova YUriya Mihajlovicha. Sbornik dokladov. Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova. 2015. Pp. 537–542. (rus)

34. Evtushenko E.V., Konyaeva E.V., Stavchikova L.F. Advanced sound-insulating materials [Sovremennye zvukoizolyacionnye materialy]. Fizika i sovremennye tekhnologii v APK. Materialy mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2016. Pp. 325–330. (rus)

35. Yao Y.F., Gao L., Yang Q.L., Zhou G., Fu Y.Q., Liu G.F. Sound insulation property of PVC matrix composite material filled with cenosphere fly ash. Gaofenzi cailiao kexue yu gongcheng polymeric materials science and engineering. 2009. No. 11. Pp. 61–64.

36. Sargianis J.J., Kim H.-I., Andres E., Suhra J. Sound and vibration damping characteristics in natural material based sandwich composites. Composite Structures. 2013. No. 96. Pp. 538–544. doi: 10.1016/j.compstruct.2012.09.006.

37. Amran M., Fediuk R., Murali G., Vatin N., Al-Fakih A. Sound-Absorbing Acoustic Concretes: A Review. Sustainability. 2021. Vol. 13. No. 19. 10712. doi: 10.3390/su131910712.

38. Fedyuk R.S. Improving the efficiency of non-autoclaved aerated concretes with the improved sound-absorbing characteristics [Povyshenie effektivnosti neavtoklavnyh yacheistyh betonov s uluchshennymi zvukopogloshchayushchimi harakteristikami]. Stroitel'noe materialovedenie: Nastoyashchee i budushchee. Sbornik materialov I Vserossijskoj nauchnoj konferencii, posvyashchyonnoj 90-letiyu vydayushchegosya uchyonogo-materialoveda, akademika RAASN YUriya Mihajlovicha Bazhenova. Moskva. 2020. Pp. 199–204. (rus)

39. Fedyuk R.S., Baranov A.V., Mugahed Amran Y.H. The influence of porous structure on sound absorption of aerated concrete [Vliyanie poristoj struktury na zvukopogloshchenie yacheistogo betona]. Stroitel'nye materialy i izdeliya. 2020. Vol. 3. No. 2. Pp. 5–18. (rus)

40. Absimetov M.V., Elistratkin M.Y., Ageeva M.S. Structure formation features of non-autoclaved gas concrete matrix on the basis of composite binders with various mineral additives. Materials Science Forum. 2020. Vol. 974 MSF. Pp. 249–254. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.249.

41. Pototsky V.N., Grechanikov A.V., Kozel A.S., Kononok A.A. Research of noise parameters of sound-proofing (sound-absorbing) materials [Issledovanie parametrov shuma zvukoizolyacionnyh (zvukopogloshchayushchih) materialov]. 54-aya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya prepodavatelej i studentov. Materialy dokladov v 2-h tomah. Vitebsk. 2021. Pp. 282–284. (rus)

#### Information about the authors

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

**Lesovik, Ruslan V.** DSc, Professor, Vice-Rector for International Affairs. E-mail: ruslan\_lesovik@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, St. Kostyukova 46.

**Klyuev, Sergey V.** PhD, Assistant professor. E-mail: Klyuyev@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, St. Kostyukova 46.

**Wenxu, Xiao.** Postgraduate student. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, St. Kostyukova, d. 46.

**Xuan, Zhang.** Postgraduate student. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, St. Kostyukova, d. 46.

---

*Received 10.12.2021*

**Для цитирования:**

Лесовик Г.А., Лесовик Р.В., Ключев С.В., Вэньсюй С., Сюань Ч. О перспективах использования золуноса в газобетоне // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 20–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-20-33

**For citation:**

Lesovik G.A., Lesovik R.V., Klyuev S.V., Wenxu X., Xuan Zh. About the prospects of using fly ash in aerated concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 10. Pp. 20–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-20-33

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-34-40

Юрьев А.Г., \*Панченко Л.А., Зинькова В.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: Panchenko.bstu@mail.ru

## СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

**Аннотация.** Характерными признаками несущей конструкции являются ее топология, геометрия и параметры элементов. Процесс создания конструкции проходит путь от проекта до его материального воплощения. Топология определяет контур противостояния нагрузке, которое окончательно проявляется в конфигурации и материале. Фундаментальное начало проекта конструкции составляет вариационный принцип структурного синтеза с энергетическим содержанием. Он обеспечивает минимальный расход материала. Его принципиальное распределение производится на этапе проектирования топологии как противостояние внешнему силовому полю. Геометрия в большей степени подчинена директивным установкам, связанным с характером нагрузки и функциональными назначениями конструкции. Параметры элементов завершают определение конфигурации, обеспечивая удовлетворение условиям прочности, жесткости и устойчивости равновесия. Использованы научные результаты, касающиеся учета влияния конфигурации на эксплуатационные качества конструкции и подхода к практической теории структурного синтеза. Для иллюстрации проектной методики избрана четырехстержневая система. Регулирование параметров прочности и жесткости можно эффективно вести при использовании композиционных материалов, в частности, фибробетона, поскольку изменение прочности соотносится с параметрами волокон и их процентным содержанием при незначительном изменении модулей материала.

**Ключевые слова:** Стержневые системы, синтез, топология, геометрия и конфигурация конструкции, оптимизация, энергетический критерий, минимум расхода материалов.

**Введение.** Создание несущей конструкции, которая в рамках обусловленных норм эффективно проявляет функциональные качества, является целью структурного синтеза.

Синтез конфигурации конструкции включает определение ее топологии, геометрии и параметров элементов. Под топологией подразумевается расположение узлов и способ их соединения для получения геометрически неизменяемой системы. Под геометрией подразумевается конкретное положение узлов, что обуславливает позиции элементов. Затем определяются параметры

элементов: размеры сечений стержней, толщины пластинок и оболочек и так далее.

Несущая конструкция по определению предназначена для восприятия конкретной нагрузки. Ее топология подчинена этой задаче. В рамках статически определимой задачи система с четырьмя узлами, из которых два опорные, имеет формально три варианта (рис. 1). Но в случае задания распределенной нагрузки на линии между нижними узлами вариант 1, б оказывается неприемлемым.

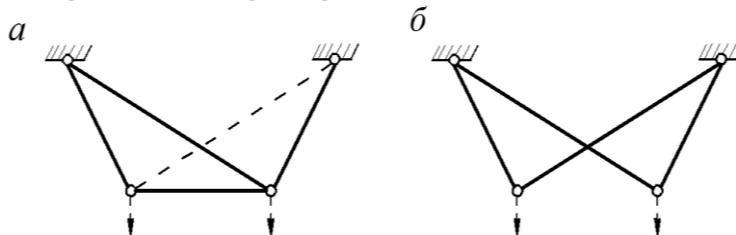


Рис. 1. Варианты топологии для системы с четырьмя узлами

Если же учесть, что ту же нагрузку может воспринять система, повернутая по отношению к системе, показанной на рис. 1, на  $180^\circ$ , то возник-

ает еще три варианта топологии (рис. 2). Напряженно-деформированное состояние в системах на рис. 1 и 2 будет различным из-за противоположности знаков усилий.

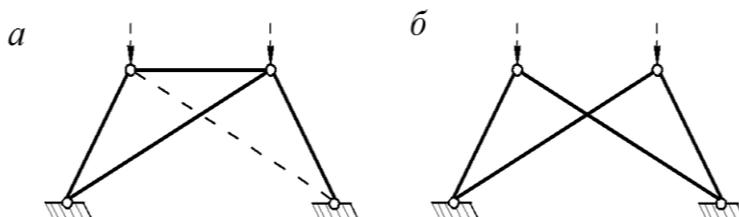


Рис. 2. Другие варианты топологии для системы с четырьмя узлами

Ввиду предопределенности положения нагрузки расстояние между нижними узлами на рис. 1, а (верхними узлами на рис. 2, а) будет директивным параметром. Такого же рода параметром является расстояние между линией опорных узлов и линией расположения нагрузки.

Воплощение теории структурного синтеза в практику включает анализ влияния топологии и геометрии конструкции на ее функциональное состояние. Из возможных вариантов конструктивных решений остается тот, в котором главные качества (прочность, жесткость и др.) достигаются за счет количественных изменений в отношении увеличения размеров элементов и применения более прочного материала, а прежде всего путем изменения конфигурации, то есть изменения структуры [1–3].

Принципы структурного синтеза инженерных конструкций неотделимы от объективных законов формирования природных систем [4]. Примером упомянутого качественного феномена служит архитектура ствола дерева. Простая цилиндрическая форма уступает место форме, близкой к конической. В нижней зоне дерево имеет не только больший диаметр (а, следовательно, и момент сопротивления), но и большую массу затвердевших тканей, что в целом создает достаточное сопротивление внешним воздействиям, имеющим характер сжатия с изгибом. К вершине дерева диаметр сечения уменьшается, ткани становятся эластичными, что в сочетании создает амортизацию действия ветровой нагрузки.

Топология играет немаловажную роль в рационализации природных конструкций. Прочность стеблей злаков, испытывающих большие ветровые нагрузки, достигается, прежде всего, за счет того, что изгибающие моменты, приходившиеся на сплошную стержень, перераспределяются за счет образования узлов, являющихся как бы встроенными шарнирами-демпферами.

В работе [5] представлен закон развития организма, в соответствии с которым максимум функциональной энергии соответствует минимуму материала. Биологическое раздражение вызывает усиление сопротивляемости локальной области посредством переноса веществ из отвлеченных, расслабленных областей.

Достаточное наполнение материей силового поля объясняет способность организмов приспосабливаться к длительным и многократным нагрузкам умеренной интенсивности посредством морфологической перестройки структуры. Природное структурообразование и такого же рода инженерное творчество предрасположены к единым законам и принципам.

**Методика.** Интерес к топологии стержневых конструкций проявился во второй половине XX века. В работе [6] рассмотрены три теоремы о структурных преобразованиях и их применение к совершенствованию топологии шарнирных систем.

Первостепенным условием для решения проблемы топологии несущих конструкций является наличие объективного критерия ее оптимальности и надлежащий отход от весовой оптимизации. Во главу угла поставлен минимум потенциальной энергии системы, ведущий к минимуму расхода материала [1, 7]. При весовой оптимизации этот показатель достигается лишь в частных случаях.

Совершенствование топологии континуальных систем наметилось в последние три десятилетия по мере роста производительности вычислительной техники [8].

В этой области широко используются численные методы. Обусловленная область делится на конечные элементы, вводится функция плотности материала. Оптимальное распределение ее по элементам ведется при ограничении на главные напряжения [9].

Однородное структурирование предложено в работе [10] и обобщено в монографии [11]. Уязвимой стороной метода является чередование областей с высокой и низкой плотностью материала, что вызывает трудности при практическом осуществлении проекта.

Прогресс в этом направлении предполагают симплекс-методы [12–15]. Для каждого конечного элемента вводится приемлемая плотность, которой соответствует модуль упругости материала со степенным законом. Определение топологии основано на минимуме потенциальной энергии системы (или перемещений узлов) при ограничении на объем материала. Такого рода постановка задачи соответствует вариационному принципу синтеза несущих конструкций.

Регулирование параметров прочности и жесткости можно эффективно вести при использовании композиционных материалов, в частности, фибробетона [16, 17], поскольку изменение прочности соотносится с параметрами волокон и их процентным содержанием при незначительном изменении модулей материала. Специфика нелинейных расчетов отражена в работах [18–20].

С точки зрения технологии строительства представляет интерес методология контроля сложности конструкций с оптимальной топологией [21]. Это ведет к экономии средств при производстве конструкций посредством уменьшения их сложности.

При совершенствовании топологии решетчатых рам можно использовать стержневые и континуальные конечные элементы [22], в том числе двухузловые балочные и четырехузловые четырехугольные конечные элементы.

**Основная часть.** Рассмотрим примеры оптимизации топологии четырехстержневых систем в рамках линейного физического закона [23, 24]. Поставленная во главу угла потенциальная энергия системы в данном случае равна по модулю потенциальной энергии деформации.

В частном случае ее выражение имеет вид:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{N_i^2 l_i}{2E\varphi_i^2 A_i}, \quad (1)$$

где  $n$  – число стержней длиной  $l_i$  с площадью поперечного сечения  $A_i$  и продольной силой  $N_i$ ,  $E$  – модуль продольной упругости материала,

$\varphi_i$  – коэффициент, корректирующий его расчетное сопротивление.

Для растянутых стержней принимаем значение  $\varphi_i = 1$ . Для сжатых стержней коэффициент задается в соответствии с нормативными требованиями к определенной категории стержней. При назначенной величине  $\varphi_i$  определяется гибкость стержня, которая в свою очередь приводит к минимальному радиусу инерции поперечного сечения  $i_{min}$ .

Объем материала вычисляется по формуле:

$$V = \sum_{i=1}^n A_i l_i. \quad (2)$$

Обратимся к системе на рис. 1, а и придадим ей конкретное содержание (рис. 3). Штрихами обозначен возможный вариант стержня 4.

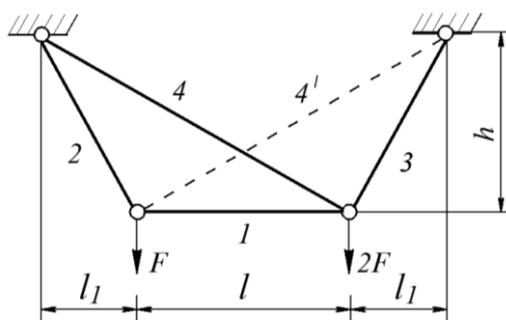


Рис. 3. Четырехстержневая система

Примем следующие исходные данные:  $l = 4$  м,  $l_1 = 1$  м,  $h = 3$  м,  $F = 700$  кН, материал – сталь с расчетным сопротивлением  $R_y = 240$  МПа и модулем продольной упругости  $E = 200$  ГПа.

Переход от первого (4) ко второму (4') варианту следует рассматривать как топологическое преобразование стержневой системы. Продольные силы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Продольные силы  $N_i$  для систем (рис. 3; 2, а)

Система	Вариант	$N_1$ , кН	$N_2$ , кН	$N_3$ , кН	$N_4$ , кН
рис.3	1	233	738	1353	227
„	2	467	861	1476	-227
рис.2, а	1	-233	-738	-1353	-227
„	2	-467	-861	-1476	227

При первом варианте топологии площади поперечных сечений стержней равны:  $A_1 = 9,72$  см<sup>2</sup>;  $A_2 = 30,74$  см<sup>2</sup>;  $A_3 = 56,36$  см<sup>2</sup>;  $A_4 = 9,45$  см<sup>2</sup>, потенциальная энергия деформации  $U = 5320$  Дж, объем материала  $V = 0,037$  м<sup>3</sup>. При втором варианте имеем:  $A_1 = 19,43$  см<sup>2</sup>;  $A_2 = 35,86$  см<sup>2</sup>;  $A_3 = 6,149$  см<sup>2</sup>;  $A_4 = 21,02$  см<sup>2</sup>;  $U = 7310$  Дж;  $V = 0,058$  м<sup>3</sup>.

Из табл. 1 видно, что при включении стержня 4 во всей системе имеет место растяжение, а при включении стержня 4' он оказывается сжатым, что потребовало обеспечения устойчивости его равновесия. Исходя из приемлемой гибкости стержня, равной 120, принимаем коэффициент  $\varphi = 0,45$ . При этом  $i_{min} = 583/120 =$

$=4,86$  см. Подбор профиля сечения и определение его размеров составляет отдельную задачу, выходящую за рамки данного исследования.

Преимущество в топологии оказалось на стороне первого варианта: потенциальная энергия деформации меньше на 37,4 %, а объем материала – на 56,8 %. Это можно связать с концентрацией материала в узле с большей нагрузкой.

Рассмотрим теперь систему на рис. 2, а при тех же геометрических параметрах и нагрузках (табл. 1). При включении стержня, показанного сплошной линией, во всей системе имеет место сжатие, а при включении стержня, показанного штрихами, – стержни 1, 2, 3 сжаты, а стержень 4'

растянут. Как и прежде коэффициент  $\phi$  принят равным 0,45.

Первому случаю соответствуют величины:  $A_1 = 21,6 \text{ см}^2$ ;  $A_2 = 68,31 \text{ см}^2$ ;  $A_3 = 125,24 \text{ см}^2$ ;  $A_4 = 21 \text{ см}^2$ ,  $U = 11822 \text{ Дж}$ ,  $V = 0,082 \text{ м}^3$ , второму случаю –  $A_1 = 43,18 \text{ см}^2$ ;  $A_2 = 79,69 \text{ см}^2$ ;  $A_3 = 136,64 \text{ см}^2$ ;  $A_4 = 9,45 \text{ см}^2$ ;  $U = 13150 \text{ Дж}$ ;  $V = 0,091 \text{ м}^3$ .

При сравнении вариантов прослеживается прежняя тенденция. В первом варианте величина  $U$  меньше на 11,2 %, а величина  $V$  на 11 %. Вме-

сте с тем оба варианта значительно уступают системе на рис. 3: в отношении  $U$  на 118,5 (79,9) %, в отношении  $V$  на 121,6 (56,9) %. Обеспечение устойчивости равновесия большого числа сжатых стержней потребовало дополнительного расхода материала.

На втором этапе проектирования конструкции определяем её геометрию. Отталкиваясь от системы на рис. 3, рассмотрим ее варианты (рис. 4).

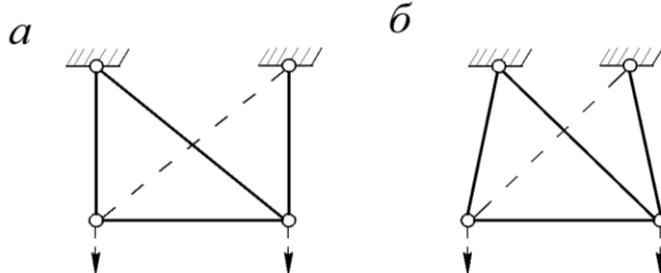


Рис. 4. Варианты геометрии для системы с четырьмя узлами

Принимая те же основные исходные данные, что и для системы на рис. 3, и сдвигая опоры на 1м (2м), вычислим продольные силы (табл. 2).

Характерные значения при величине  $\phi = 0,45$  даны в табл. 3.

Таблица 2

**Продольные силы  $N_i$  для систем (рис. 4)**

Система	Вариант	$N_1$ , кН	$N_2$ , кН	$N_3$ , кН	$N_4$ , кН
рис.4,а	1	0	700	1400	0
„	2	0	-700	-1400	0
рис.4,б	1	-233	738	1845	-495
„	2	-467	369	1476	495

Таблица 3

**Параметры и характеристики систем (рис. 4)**

Система	Вариант	$A_1$ , см <sup>2</sup>	$A_2$ , см <sup>2</sup>	$A_3$ , см <sup>2</sup>	$A_4$ , см <sup>2</sup>	$U$ , Дж	$V$ , м <sup>3</sup>
рис.4,а	1	*	29,17	58,33	*	3780	*
„	2	*	29,17	58,33	*	3780	*
рис.4,б	1	21,6	30,74	76,86	45,82	8940	0,062
„	2	43,2	15,38	61,5	20,63	7245	0,05

\*Площадь сечения назначается из конструктивных соображений.

Самым привлекательным вариантом оказалась схема, показанная на рис. 4, а. Ввиду идентичности противостоящих внешних и внутренних сил, усилия в горизонтальном и наклонном стержнях оказались нулевыми. С учетом использования для них швеллера № 5 объем материала составил 0,032 м<sup>3</sup>, что меньше, чем в варианте, показанном на рис. 3, на 15,6 %.

Дальнейшее сближение опор (на 2 м, рис. 4, б) привело к ухудшению деформационных ( $U$ ) и экономических ( $V$ ) показателей по сравнению со схемой на рис. 3 соответственно на 36 % и 35 %.

**Выводы.** Предложенная методика определения оптимальной несущей конструкции в отношении ее топологии и геометрии основывается

на энергетическом критерии, приводящем к минимуму расхода материала. При этом назначение площади и конфигурации поперечных сечений производится с учетом обеспечения прочности и устойчивости равновесия стержней.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2020. Том 15. Вып.1. С. 12–30. doi: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30.
2. Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Комплексный подход к топологической оптимизации судовых конструкций // Труды Крыловского гос.

науч. центра. 2020. №1. С. 95–108. doi: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-95-108.

3. Мищенко А.В. Оптимизация структурно-неоднородных стержневых конструкций на основе энергетического критерия // Известия вузов. Строительство. 2021. №6. С. 20–32. doi:10.32683/0536-1052-2021-750-6-20-32.

4. Юрьев А.Г. Естественный фактор оптимизации топологии конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №2. С. 46–48.

5. Roux W. Gesammelte Abhandlungen über Entwicklungsmechanik der Organismen. Bd 1-2. Leipzig, 1995. 1112 p.

6. Majid K.I. Optimum design of structures. London: Newnes-Butterworths, 1979. 238 p.

7. Ширалиев С.Д., Боинская А.А., Мищенко А.В. Исследование критериев рациональности многопролетных балок // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2020. №1. С. 9–14.

8. Сысоева В.В., Чедрик В.В. Алгоритмы оптимизации топологии силовых конструкций // Ученые записки ЦАГИ, 2011. Т.42. Вып.2. С. 1–12.

9. Bendsøe M.P., Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method // Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 1988. No 71 (2). Pp. 197–224.

10. Diaz A.R., Kikuchi N. Solutions to shape and topology eigenvalue optimization using a homogenization method // Int. J. Numer. Methods Eng. 1992. No. 35. Pp. 1487–1502.

11. Bendsøe M.P., Sigmund O. Topology optimization: theory, methods, and applications. Berlin: Springer, 2003. 376 p.

12. Bendsøe M.P. Optimal shape design as a material distribution problem // Structural Optimization. 1989. No. 1. Pp. 193–202.

13. Rozvany G.I.N. Structural design via optimality criteria. Dordrecht: Kluwer, 1989. 463 p.

14. Rozvany G.I.N., Zhou N., Sigmund O. Topology optimization in structural design // Advances

in design optimization. London: Adeli, 1994. Pp. 240–299.

15. Yang R.J., Chahande A.I. Automotive applications of topologie optimization // Structural Optimization. 1995. No. 9. Pp. 245–249.

16. Панченко Л.А. Строительные конструкции с волокнистыми композитами. Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. 184 с.

17. Панченко Л.А. Расчет фибробетонных конструкций с учетом физической нелинейности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. №1. С. 44–50. doi: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-44-50.

18. Юрьев А.Г., Смоляго Н.А., Яковлев О.А. Перемещения в стержневых системах за пределом упругости // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. №3. С. 25-31. doi: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-25-31.

19. Мищенко А.В. Расчетная модель нелинейного динамического деформирования составных многофазных стержней // Вестник МГСУ. 2014. №5. С. 35–43.

20. Мищенко А.В. Нелинейное термоупругое деформирование многофазных стержней // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. №4. С. 42–51.

21. Cardoso E.L., Fonseca J.S.O. Complexity control in the topology optimization of continuum structures // J. of the Bras. Soc. of Mech. Sci & Eng. 2003. Vol. 25. №3. Pp. 293–301.

22. Stromberg L.L., Beghini A., Baker W.F., Paulino G.H. Topology optimization for braced frames: Combining continuum and beam/column elements // Engineering Structures. 2012. No. 37. Pp. 106–124.

23. Зинькова В.А. Оптимизация топологии металлических ферм // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №2. С. 37–40.

24. Zinkova V.A., Yuriev A.G., Peshkova E.V. Designing of tube trusses without gusset plate with joint connections // Int. J. of Appl. Eng. Res. 2015. Vol.10. No. 5. Pp. 12391–12398.

#### Информация об авторах

**Юрьев Александр Гаврилович**, доктор технических наук, профессор. E-mail: yuriev\_ag@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

**Панченко Лариса Александровна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: panchenko.bstu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

**Зинькова Виктория Анатольевна**, начальник отдела создания и оценки объектов интеллектуальной собственности, старший преподаватель кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: vikzinkova@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

Поступила 01.07.2022 г.

© Юрьев А.Г., Панченко Л.А., Зинькова В.А., 2022

**Yuriev A.G., \*Panchenko L.A., Zinkova V.A.**

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

*\*E-mail: panchenko.bstu@mail.ru*

## CONSTRUCTIONS SYNTHESIS OF PIVOTAL SYSTEMS

**Abstract.** *The characteristic features of the supporting structure are its topology, geometry and parameters of the elements. The process of creating a structure goes from the project to its material embodiment. The topology defines the contour of the load resistance, which finally manifests itself in the configuration and material. The fundamental beginning of the design project is the variational principle of structural synthesis with energy content. It provides a minimum consumption of material. Its fundamental distribution is made at the stage of topology design as a confrontation with an external force field. Geometry is more subordinated to directive settings related to the nature of the load and the functional purposes of the structure. The parameters of the elements complete the definition of the configuration, ensuring satisfaction of the conditions of strength, rigidity and stability of equilibrium. The scientific results concerning the consideration of the influence of configuration on the operational qualities of the structure and the approach to the practical theory of structural synthesis are used. A four-rod system is chosen to illustrate the design methodology. The regulation of strength and stiffness parameters can be effectively carried out when using composite materials, in particular, fiber-reinforced concrete, since the change in strength is correlated with the parameters of the fibers and their percentage with a slight change in the modules of the material.*

**Keywords:** *rod systems, synthesis, topology, geometry and configuration of the structure, optimization, energy criterion, minimum consumption of materials.*

### REFERENCES

1. Tamrazjan A.G., Alexejtsev A.V. Modern methods of constructive decisions optimization for supporting systems of buildings and structures [Sovremennye metody optimizacii konstruktivnyh reshenij dlya nesushchih sistem zdaniy i sooruzhenij]. Bulletin of MGSU. 2020. Vol. 15. No 1. Pp. 12–30. doi: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30. (rus)
2. Kryzhevich G.B., Filatov A.P. Complex approach to topology optimization of vessel constructions [Kompleksnyj podhod k topologicheskoy optimizacii sudovyh konstrukcij]. Proceedings of the Krylov's State Scientific Center. 2020. No. 1. Pp. 95–108. doi: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-95-108. (rus)
3. Mishchenko A.V. Optimization of structural inhomogeneous pivotal systems on the basis of energetic criterion [Optimizaciya strukturno-neodnorodnyh sterzhnevnyh konstrukcij na osnove energeticheskogo kriteriya]. News of institutions of higher education. Building. 2021. No. 6. Pp. 20–32. doi: 10.32683/0536-1052-2021-750-6-20-32. (rus)
4. Yuriev A.G. Natural factor of constructions topology optimization [Estestvennyj faktor optimizacii topologii konstrukcij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No.2. Pp. 46–48. (rus)
5. Roux W. Gesammelte Abhandlungen über Entwicklungsmechanik der Organismen. Bd 1-2. Leipzig, 1995. 1112 p.
6. Majid K.I. Optimum design of structures. London: Newnes-Butterworths, 1979. 238 p.
7. Shiraliev S.D., Boinskaya A.A., Mishchenko A.V. Research of rationality criterions of multi-span beams [Issledovanie kriteriev racional'nosti mnogoproletnyh balok]. Housing Economy and Municipal Infrastructure. 2020. No. 1. Pp. 9–14. (rus)
8. Sysoeva V.V., Chedrik V.V. Algorithms for optimizing the topology of power structures [Algoritmy optimizacii topologii silovyh konstrukcij]. Scientific Notes of CAGI, 2011. Vol. 42. No. 2. Pp. 1–12. (rus)
9. Bendsøe M.P., Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 1988. No. 71 (2). Pp. 197–224.
10. Diaz A.R., Kikuchi N. Solutions to shape and topology eigenvalue optimization using a homogenization method. Int. J. Numer. Methods Eng. 1992. No. 35. Pp. 1487–1502.
11. Bendsøe M.P., Sigmund O. Topology optimization: theory, methods, and applications. Berlin: Springer, 2003. 376 p.
12. Bendsøe M.P. Optimal shape design as a material distribution problem. Structural Optimization. 1989. No. 1. Pp. 193–202.
13. Rozvany G.I.N. Structural design via optimality criteria. Dordrecht: Kluwer, 1989. 463 p.
14. Rozvany G.I.N., Zhou N., Sigmund O. Topology optimization in structural design. Advances in design optimization. London: Adeli, 1994. Pp. 240–299.
15. Yang R.J., Chahande A.I. Automotive applications of topologie optimization. Structural Optimization. 1995. No. 9. Pp. 245–249.
16. Panchenko L.A. Building structures with fiber composites. [Stroitel'nye konstrukcii s voloknistymi kompozitami]. Belgorod: Publishing

House of BSTU named after V.G. Shukhov, 2013. 184 p. (rus)

17. Panchenko L.A. Calculation of fiber-concrete constructions with regard to physical nonlinearity [Расчет фибробетонных конструкций с учетом физической нелинейности]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 1. Pp. 44–50. doi: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-44-50. (rus)

18. Yuriev A.G., Smolyago N.A., Yakovlev O.A. Displacements in pivotal systems over elasticity limit [Перемещения в стержневых системах за пределом упругости]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 3. Pp. 25–31. doi: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-25-31. (rus)

19. Mishchenko A.V. Designed model nonlinear dynamic deformation of component multiphase pivots [Расчетная модель нелинейного динамического деформирования составных многофазных стержней]. Bulletin of MGSU. 2014. No.5. Pp. 35–43. (rus)

20. Mishchenko A.V. Nonlinear thermoelastic deformation of multiphase pivots [Нелинейное

termouprugoe deformatsionnoye mnogofaznykh stержnej]. Structure Mechanics of engineering constructions. 2014. No.4. Pp. 42–51. (rus)

21. Cardoso E.L., Fonseca J.S.O. Complexity control in the topology optimization of continuum structures. J. of the Bras. Soc. of Mech. Sci & Eng. 2003. Vol. 25. No. 3. Pp. 293–301.

22. Stromberg L.L., Beghini A., Baker W.F., Paulino G.H. Topology optimization for braced frames: Combining continuum and beam/column elements. Engineering Structures. 2012. No 37. Pp. 106–124.

23. Zinkova V.A. Optimization of topology of metal trusses [Optimizatsiya topologii metallicheskih ferm]. Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. No.2. Pp. 37–40. (rus)

24. Zinkova V.A., Yuriev A.G., Peshkova E.V. Designing of tube trusses without gusset plate with joint connections. Int. J. of Appl. Eng. Res. 2015. Vol.10. No. 5. Pp. 12391–12398.

#### *Information about the authors*

**Yuriev, Alexandr G.** DSc, Professor. E-mail: yuriev\_ag@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shuhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostykova, 46.

**Panchenko, Larisa A.** PhD, Assistant professor. E-mail: panchenko.bstu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shuhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostykova, 46.

**Zinkova, Viktoriya A.** Senior lecturer. E-mail: vikzinkova@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shuhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostykova, 46.

---

*Received 01.07.2022*

#### **Для цитирования:**

Юрьев А.Г., Панченко Л.А., Зинькова В.А. Структурный синтез стержневых систем // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 34–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-34-40

#### **For citation:**

Yuriev A.G., Panchenko L.A., Zinkova V.A. Constructions synthesis of pivotal systems. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 10. Pp. 34–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-34-40

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-41-48

*\*Тарасова Е.В., Коротынская В.С.**Дальневосточный Федеральный университет**\*E-mail: korotynskaia.vs@students.dvfu.ru*

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗДУШНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА

**Аннотация.** Солнечная энергия является одним из источников возобновляемой энергии, однако на территории России в холодный период года использование солнечной энергии затруднено из-за низких температур наружного воздуха. Целью данной статьи является анализ возможности энергосбережения для индивидуального жилого дома в городе Владивостоке при использовании накопления солнечной энергии в пристройке-теплице и теплового насоса для передачи теплоты в систему отопления. Широта города  $43^\circ$ , однако, расчетная температура для проектирования отопления составляет  $-22^\circ\text{C}$ , что сильно затрудняет использование солнечной теплоты. Анализируется возможность накопления низкопотенциальной теплоты в специально оборудованной пристройке (теплице) для преобразования тепловым воздушно-водяным насосом, чтобы в дальнейшем использовать для нужд отопления. В качестве материала отделки пристройки были рассмотрены две конструкции: двухслойный поликарбонат с воздушной прослойкой и энергосберегающий стеклопакет. Расчет показал, что в самый холодный месяц – январь потенциал солнечной тепловой энергии составляет 14–37 % от необходимой потребности в теплоте в зависимости от применяемого в конструкции пристройки материала. В марте и апреле образуется излишек теплоты, который может быть использован для нужд горячего водоснабжения. Таким образом, для индивидуального жилого дома использование солнечной теплоты, аккумулированной в пристройке-теплице актуально в качестве дополнительного источника теплоты для системы отопления.

**Ключевые слова:** энергоэффективный дом, энергосбережение, солнечная радиация, пассивный дом, отопление.

**Введение.** Использование солнечной энергии для нагрева теплоносителя для удовлетворения потребности в отоплении становится все более популярным. Связано это в том числе со стремительным сокращением природных ресурсов планеты и, как следствие, ростом цен на ископаемое топливо [1]. Впервые нагреть воду с помощью солнца попытался швейцарский ботаник Орас Бенедикт де Соссюр в 1767 году [2]. С тех пор технология претерпела ряд изменений и была значительно улучшена. На сегодняшний день распространено использование солнечной энергии для строительства энергоэффективного или пассивного домов [3]. Примером такого дома может служить дом Норденрф. При его проектировании было учтено множество факторов, которые могут повлиять на его экономичность. Так, он ориентирован балконами и террасами на южную сторону, чтобы солнечное тепло могло максимально проникать внутрь, в то время как с северной стороны остекление весьма незначительное [4]. Существует множество примеров не только строительства новых пассивных домов, но и реконструкции старых неэкономичных зданий с применением основных принципов энергоэффективности по всему миру [5]. Довольно распространена практика использования воздушных солнечных коллекторов и других способов аккумулирования солнечной теплоты для повышения энергетической эффективности домов [6].

Однако, стоит отметить, что эффективность солнечного отопления напрямую зависит от угла падения солнечных лучей. Так, разработаны технологии, позволяющие следовать углу падения солнечных лучей в течение года [7] или суток [8].

Идея использовать дополнительные пристройки для накопления солнечного тепла и его дальнейшего использования в темное время суток давно описывается в научных работах [9, 10]. Также обязательным условием при проектировании пассивного дома является использование рекуперации [11]. Тепловые насосы позволяют собрать и сохранить максимум энергии, полученной от солнца [12]. Так, в научной работе был рассмотрен двухэтажный каркасный дом с пристроенной теплицей. Для передачи тепла от пристройки к северной стене используют систему труб с водой в качестве теплоносителя [13].

**Объект и задачи исследования.** В данной статье объектом исследования является частный жилой дом с возможностью частичного удовлетворения нужд отопления накопленной солнечной энергией, собираемой тепловым насосом в пристройке-теплице.

Поставлены следующие задачи: определить теплотехнические показатели исследуемого объекта; произвести расчет теплоступлений от солнечной радиации в теплицу для каждого ме-

сяца отопительного периода; оценить эффективности использования теплоты солнечной радиации.

**Методика.** Проводится анализ результатов расчета поступления солнечной радиации в объем пристройки и сравнение с расчетной нагрузкой по отоплению.

**Основная часть.** Описание объекта:

а) место строительства – г. Владивосток (зона влажности - нормальная);

б) назначение здания – жилое, температура внутреннего воздуха  $t_{в} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

в) высота здания – 8,2 м, количество этажей - 2, общая площадь – 95 м<sup>2</sup>;

д) расчетные параметры наружного воздуха, для проектирования отопления: температура воздуха наиболее холодной пятидневки обеспечен-

ностью 0,92  $t_{н}^5 = -22 \text{ }^\circ\text{C}$ , продолжительность периода со среднесуточной температурой  $\leq 8 \text{ }^\circ\text{C}$   $Z_{от.пер} = 199$  сут., средняя температура за этот период  $t_{от.пер} = -4,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

е) размеры теплицы 3×6,4 м, кровля имеет уклон 20°, высота в месте примыкания к дому  $h = 3,8$  м (рис. 1);

г) данные по плотности потока солнечной радиации в г. Владивостоке были получены из исследований NASA (табл. 1). На соответствующем сайте были заданы координаты города Владивостока и получены данные о рассеянной и суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность.

В качестве основного материала стен жилого дома принят полистиролбетон (рис. 2).

Таблица 1

Поверхностная плотность потока солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>

Параметр	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель
Поверхностная плотность потока прямой солнечной радиации	1680	1530	1870	2730	3270	3180
Поверхностная плотность потока рассеянной солнечной радиации	650	450	480	680	1180	1830

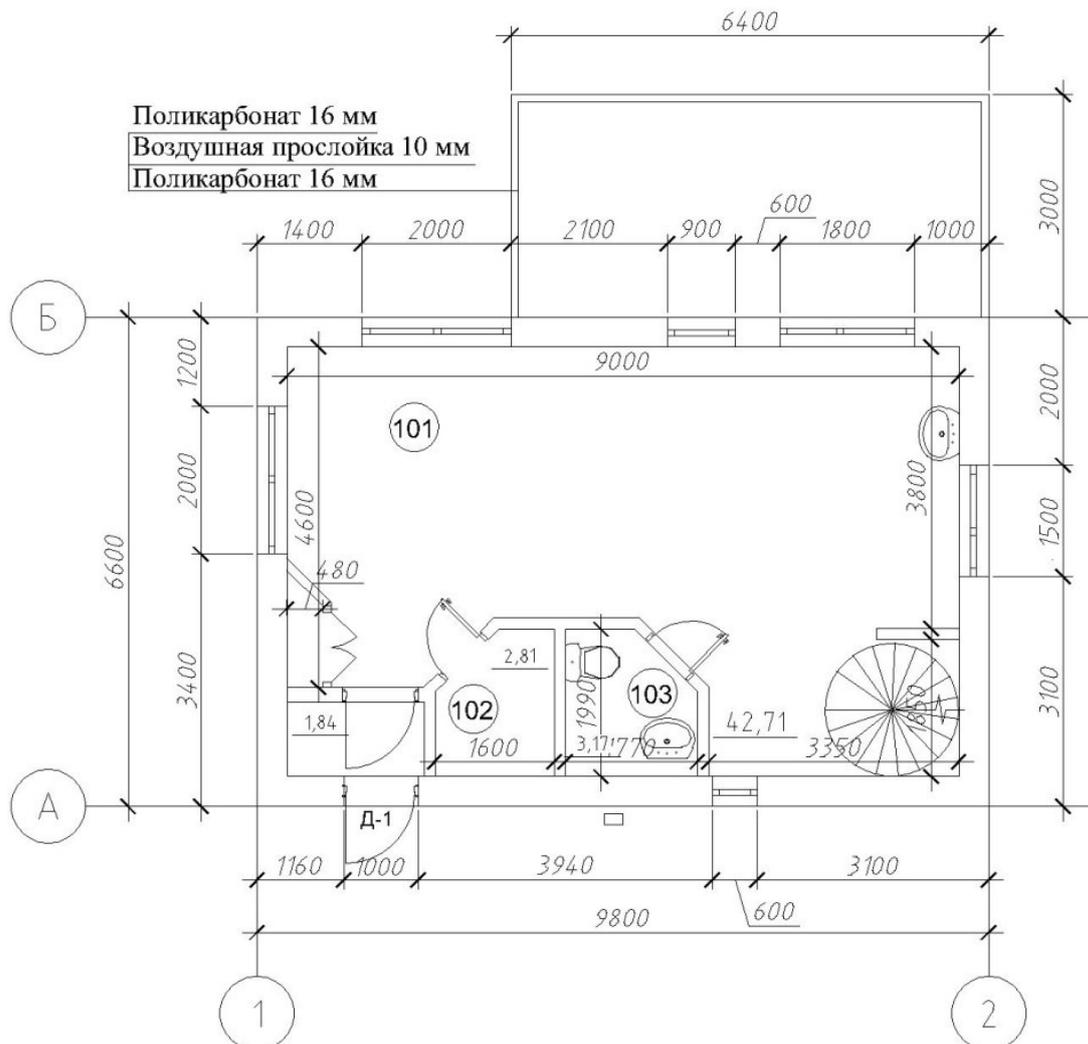


Рис. 1. План первого этажа с пристройкой

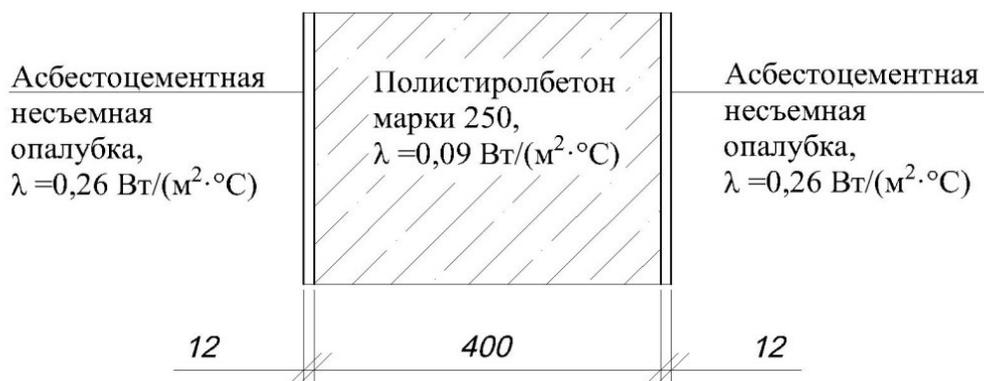


Рис. 2. Теплотехнические показатели проектируемого ограждения из полистиролбетона

Выполнен теплотехнический расчет стены с учетом неоднородностей. В качестве теплотехнических неоднородностей приняты элементы навесного вентилируемого фасада: саморезы длиной 70 мм и диаметром 4,2 мм, деревянный брус с размерами сечения 50×50 мм. На 1 м<sup>2</sup> стены приходится 4 элемента теплотехнической неоднородности. Требуемое сопротивление теплопередачи  $R_0^{TP} = 3,092 \text{ м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$ . Осредненное по площади условное сопротивление теплопередаче  $R_0^{Усл} = 4,74 \text{ (м}^2 \cdot \text{°С)/Вт}$ , приведенное сопротивление теплопередаче глухой (без проемов) стены с НФС  $R_0^{НФС} = 4,42 \text{ (м}^2 \cdot \text{°С)/Вт}$ , коэффициент теплотехнической неоднородности составил 0,93.

Произведен расчет теплопотерь для месяцев года со среднемесячной температурой ниже 8 °С (табл. 2). Теплопотери разделены на 2 части: через ограждающие конструкции –  $Q_{огр}$  и расход теплоты на нагрев вентиляционного воздуха  $Q_{вент}$ . При расчетной температуре  $t_{н} = -22 \text{ °С}$   $Q_{огр}$  составили 5460 Вт.

Потребность теплоты на подогрев вентиляционного воздуха определена при норме 3 м<sup>3</sup>/ч на м<sup>2</sup> жилой площади дома. Требуемый расход приточного вентиляционного воздуха – 241 м<sup>3</sup>/ч, минимально требуемый расход вытяжного воздуха 165 м<sup>3</sup>/ч. По балансу расход вытяжного воздуха

увеличен до 216 м<sup>3</sup>/ч. Система вентиляции принята механическая как наиболее надежная и обеспечивающая устойчивый воздухообмен. Для сокращения тепловой нагрузки на подогрев приточного воздуха принято использовать пластинчатый рекуператор в приточно-вытяжной установке как одно из наиболее эффективных решений по экономии энергоресурсов для жилых домов [14]. Подобрана приточно-вытяжная установка с мембранным рекуператором Royal clima серия SOFFIO Uno модель RCS-350-U. Максимальный расход воздуха 319 м<sup>3</sup>/ч. При минимальной эффективности рекуперации (из технических характеристик эффективность рекуператора составляет 68–84 %) при расчетной температуре расход тепла на подогрев приточного воздуха снизится с 3433 до 1128 Вт.

Удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию составляет 0,519 Вт/(м<sup>3</sup>·°С), и, соответственно, частный жилой дом отвечает требованиям энергетической эффективности зданий согласно приказу №1550/пр от 17 ноября 2017г. «Об утверждении Требований энергетической эффективности зданий, строений, сооружений».

Результаты расчетов также представлены на рисунке 3.

Таблица 2

Теплопотери через ограждающие конструкции и вентиляцию

Параметр	Месяц					
	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель
Среднемесячная температура, °С	-0,9	-9,5	12,6	-9,1	-2,1	4,8
$Q_{огр}$ , Вт	625,80	1263,61	1493,52	1233,94	722,41	185,06
$Q_{вент}$ без рекуперации, Вт	1708,2	2411,1	2664,5	2378,4	1806	1242,3
$Q_{вент}$ с рекуперацией, Вт	461,1	732,9	830,8	720,2	499,0	281,0
Эффективность рекуперации, Вт	1247,1	1678,2	1833,6	1658,2	1307,3	961,4

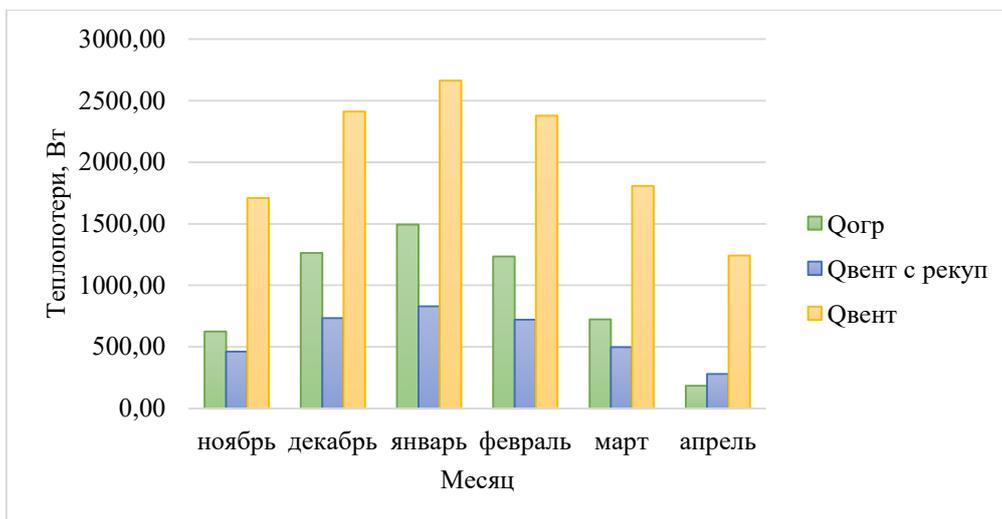


Рис. 3. Диаграмма, отражающая теплопотери через ограждающие конструкции и вентиляцию с применением и без применения рекуперации

**Расчет теплопоступлений от солнечной радиации в теплицу.** Пристройка представляет из себя прямоугольное в плане помещение, имеющее одну общую стену с домом. Остальные три стены и крыша выполнены из светопрозрачных конструкций. Размеры пристройки в плане 6,4×3 м. Высота: от 2,7 м до 3,8 м. Угол наклона крыши пристройки составляет 20°.

Рассмотрено два варианта конструкций:

- теплица из поликарбоната;
- теплица из энергосберегающего стеклопакета.

Сопротивление теплопередаче для поликарбоната составляет 0,727 м<sup>2</sup>·°C/Вт, для энергосберегающего стеклопакета 1,56 м<sup>2</sup>·°C/Вт.

Для расчета потока солнечной радиации на наклонную поверхность принята методика, основанная на общеизвестных зависимостях [15]. Вычислена прямая и рассеянная радиация за каждый час светового дня в каждом месяце года на горизонтальную и наклонную поверхности по четырем сторонам ориентации здания (по Ю-З, С-З, С-В и Ю-В направлениям). Интенсивность солнечной радиации у земли на произвольно наклоненную поверхность, Вт/м<sup>2</sup> [16]:

$$i_p = s_m [\cos \alpha \cdot (\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \Omega) + \sin \alpha \{ \cos \Psi_n [\operatorname{tg} \varphi \cdot (\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \Omega) - \sin \delta \cdot \sin \varphi] + \sin \Psi_n \cdot \cos \delta \cdot \sin \Omega \}], \quad (1)$$

где  $s_m$  – интенсивность солнечной радиации у земной поверхности на горизонтальную поверхность, Вт/м<sup>2</sup>, за расчетный час;  $\varphi$  – широта, рад.;  $\delta$  – склонение Солнца, рад.;  $\Omega$  – часовой угол Солнца в данный момент времени, отсчитываемый от момента истинного полудня, рад;  $\alpha$  – угол наклона солнечной поверхности к горизонту, рад (рис. 4).

$\Psi_n$  – азимут поверхности, измеряется как угол между нормалью к поверхности и направлением на юг, рад.

На рисунке 5 представлен график суммарного потока радиации на 1 м<sup>2</sup> теплицы по часам суток январь и март на стену и крышу под углом 20° в юго-западном направлении.

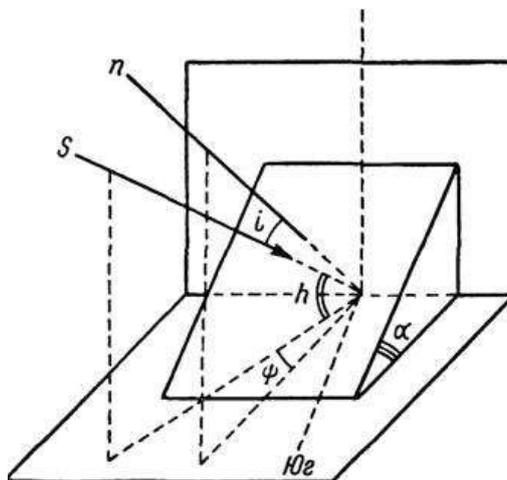


Рис. 4. Падение солнечного луча S на произвольно наклоненную поверхность

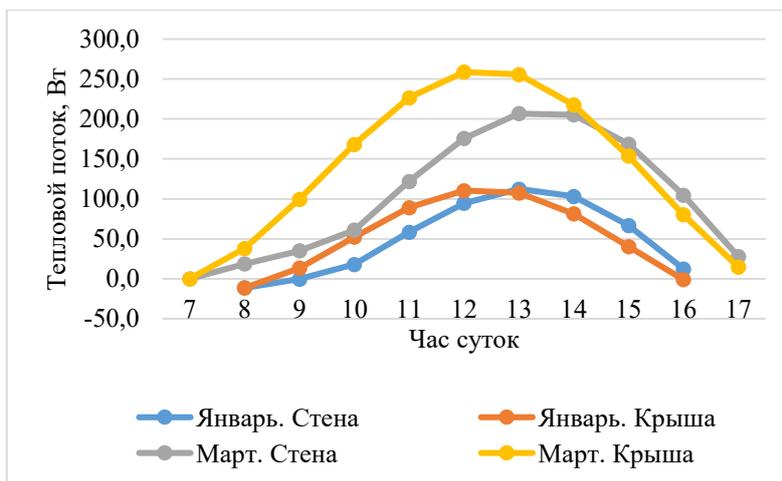


Рис. 5. График суммарного потока радиации на 1 м<sup>2</sup> теплицы по часам суток январь и март на стену и крышу под углом 20° в юго-западном направлении

Задача расчета теплового потока в теплицу зависит от множества факторов: аккумулирующей способности ограждающих конструкций и поверхностей, температурного режима работы теплового насоса, теплопоступлений от солнечной радиации в светлое время суток, теплопоступлений через стену дома от отапливаемых помещений, теплопотерь через светопрозрачные ограждения, распределения воздушных потоков внутри теплицы. Для упрощения задачи на данном этапе исследований, для зимних месяцев (декабрь, январь, февраль) температура внутри теплицы принята 0 °С для ноября, марта, апреля +5 °С, и тепловой поток через 1 м<sup>2</sup> светопрозрачных ограждающих конструкций рассчитан упрощенно, как суточная сумма теплопоступлений для каждого часа суток, Вт/м<sup>2</sup>:

$$Q = \epsilon_{\text{свет}} \cdot i_p \cdot \epsilon_{\text{загр}} + \frac{1}{R} \cdot (t_o - t_{\text{вн}}), \quad (2)$$

где  $i_p$  – количество суммарной солнечной радиации, падающей на 1 м<sup>2</sup> произвольно наклоненной ограждающей конструкции в расчетный час суток, Вт/м<sup>2</sup>;  $\epsilon_{\text{свет}}$  – светопроницаемость светопрозрачной ограждающей конструкции (принята 76 % для поликарбоната и 56 % для энергосберегающего стеклопакета);  $\epsilon_{\text{загр}}$  – коэффициент, учитывающий степень загрязнения светопрозрачной конструкции, принят 0,9;  $R$  – сопротивление теплопередаче, м<sup>2</sup>·°С/Вт;  $t_o$  – средняя температура наружного воздуха в расчетный месяц;  $t_{\text{вн}}$  – среднесуточная температура внутреннего воздуха в теплице: в зимний период – 0 °С, в межсезонье – 5 °С.

На рисунке 6 приведены результаты расчета теплового потока через 1 м<sup>2</sup> крыши теплицы.

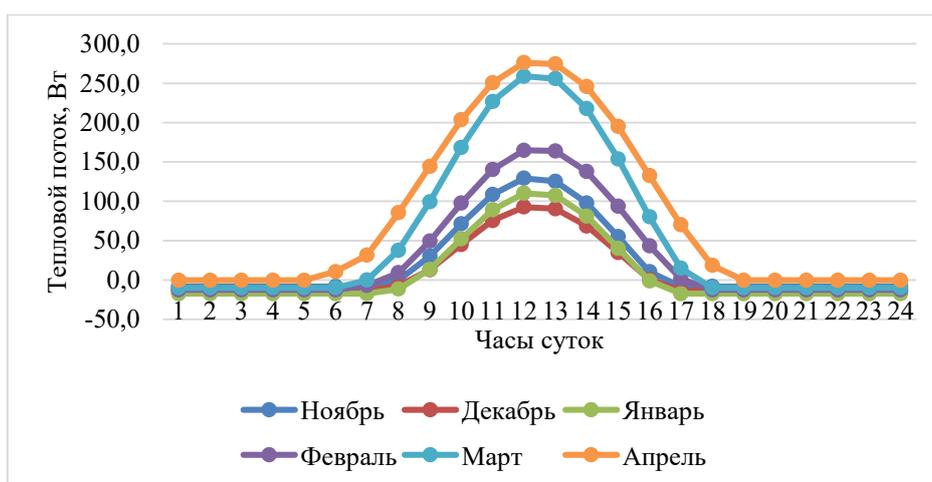


Рис. 6. График теплового потока через 1 м<sup>2</sup> крыши теплицы с ноября по апрель по часам в течение суток на наклонную поверхность в юго-западном направлении

Результаты расчета по оценке эффективности использования теплоты солнечной радиации, поступающей в теплицу-пристройку, для ограждающих конструкций из поликарбоната и энергосберегающего стеклопакета приведены в таблице 3.

дающих конструкций из поликарбоната и энергосберегающего стеклопакета приведены в таблице 3.

Таблица 3

## Оценка эффективности использования теплоты солнечной радиации

Параметр	Месяц					
	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель
Средняя температура за месяц, °С	-0,9	-9,5	-12,6	-9,1	-2,1	4,8
Теплопотери удельные без рекуперации, Вт	2334	3675	4158	3612	2529	1427
Теплопотери удельные с рекуперацией, Вт	1087	1996	2324	1954	1221	466
Теплопотери без рекуперации в сутки, Вт·сут	56016	88193	99792	86696	60688	34257
Теплопотери с рекуперацией в сутки, Вт·сут	26085	47915	55784	46900	29314	11184
Для поликарбоната						
Суммарные теплопоступления в теплицу, Вт·сут	23332	8909	8048	31473	58545	87001
Обеспечение отопления без применения рекуперации	42 %	10 %	8 %	36 %	96 %	254 %
Обеспечение отопления с применением рекуперации	89 %	19 %	14 %	67 %	200 %	778 %
Для энергосберегающего стеклопакета						
Суммарные теплопоступления в теплицу, Вт·сут	29433	18614	20903	40635	64931	87037
Обеспечение отопления без применения рекуперации, %	53 %	21 %	21 %	47 %	107 %	254 %
Обеспечение отопления с применением рекуперации, %	113 %	39 %	37 %	87 %	222 %	778 %

**Выводы.** Проанализирована возможность использования теплоты солнечной радиации, поступающей в пристройку-теплицу, для частного жилого дома в холодный период года. В месяц с самой низкой температурой – январь, при отсутствии рекуперации теплоты вентиляционного воздуха теплопоступления в теплицу составляют 14 % (стеклопакет) или 8 % (поликарбонат) от суточной потребности в теплоте для отопления дома, при использовании рекуперации – 37 % (стеклопакет) или 21 % (поликарбонат). Для марта и апреля теплопоступления от солнечной радиации полностью обеспечивают нужды отопления и имеющиеся излишки могут быть использованы для нагрева воды для ГВС. При использовании энергосберегающего стеклопакета и рекуперации теплоты теплопоступления в теплицу также обеспечивают нужды отопления в ноябре месяце. Использование рекуперации теплоты вытяжного воздуха существенно снижает нагрузку на отопление. С ноября по февраль потребность в теплоте может быть лишь частично удовлетворена солнечной энергией и требуется основной источник теплоты – котел.

Таким образом, использование энергосберегающего стеклопакета для накопления солнечной энергии более эффективно, однако стоимость одного квадратного метра энергосберегающего стеклопакета в среднем составляет около 6400 р., а два слоя прозрачного сотового поликарбоната толщиной 16 мм обойдутся примерно

в 2000 р. за кв. м., что существенно скажется на экономических показателях.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Hussain J., Khan A., Zhou K. The impact of natural resource depletion on energy use and CO<sub>2</sub> emission in Belt & Road Initiative countries: A cross-country analysis // *Energy*. 2020. Vol. 199. 117409
- Фрид С.Е., Мордынский А.В., Арсатов А.В. Солнечные водонагреватели аккумуляторного типа // *Теплоэнергетика*. 2012. Том 59. № 11. С. 874–880. doi: 10.1016/j.energy.2020.117409.
- Attia S. Evolution of Definitions and Approaches // *Net Zero Energy Buildings (NZEB)*. Butterworth-Heinemann, 2018. 400 p.
- Ламмаер Ф. Типовые проекты: энергосберегающие и пассивные дома. *Pro Passivhaus*, 2017. 42 с.
- Лисина О.В. Оценка потенциала инновационной концепции энергоэффективного экодевелопмента: новинки инженерного оборудования и технологии проектирования // *Управление устойчивым развитием*. 2016. № 2. С. 66–72.
- Towler F.B. *The Future of Energy*. Academic press, Queensland, 2014. 376 p.
- Пат. 171 845, Российская Федерация, МПК А01G 9/24, F24J 2/52. Система солнечного теплоснабжения / А. В. Бастрон; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение выс-

шего профессионального образования "Красноярский государственный аграрный университет". № 2014144390, заявл. 31.10.2014; опубл. 19.06.2017, Бюл. № 17.

8. Пат. 2 740 437, Российская Федерация, МПК H01L 31/02, H01L 31/054. Концентраторная солнечная энергетическая установка / Андреев В.М., Андреева А.В., Давидюк Н.Ю., Садчиков Н.А., Чекалин А.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. № 2020115244, заявл. 28.04.2020; опубл. 14.01.2021, Бюл. № 2.

9. Пат. 110823, Российская Федерация, МПК F24D 3/12. Устройство для обогрева загородного дома с пристенной теплицей / Долгополов В.Д., Рыбьякова М.В., Финаев А.В.; заявитель и патентообладатель Долгополов В.Д. № 2011131222/12. заявл. 26.07.2011; опубл. 27.11.2011, Бюл. № 33.

10. Пат. 2 606 891, Российская Федерация, МПК E04H1/00, F24D 5/10, E04B 1/76. Энергоэффективное отапливаемое здание с теплицей / Ризванов С.Ф.; заявитель и патентообладатель

Ризванов С.Ф. № 2015122787, заявл. 15.06.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.

11. Чуйков Д. А. Система энергосбережения путем рекуперации уходящего тепла // Научные исследования молодых учёных. Сборник статей XVI Международной научно-практической конференции. Пенза, 2022. С. 63–66.

12. Lazzarin R. Heat pumps and solar energy: A review with some insights in the future // International Journal of Refrigeration. 2020. Vol. 116. Pp. 146–160. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.03.031.

13. Mears D.R. Solar Heated Home Using an Attached Greenhouse and a Woodburning Stove. NAR ASAE Meeting. New jersey, 2004. 11 p.

14. Ma P.J., Lizarraga S., Piccolo-Perez A. Exergy Analysis and Thermoeconomics of Buildings. Butterworth Heinemann, 2020. 1069 p.

15. Кондратьев К.Я. Актинометрия. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1965, 693 с.

16. Назаров Б.И., Салиев М.А., Махмудов А.Н., Абдуллаев С.Ф. Расчёт потока суммарной радиации на наклонную плоскость солнечных приёмников в условиях аэрозольного Загрязнения атмосферы // Доклады академии наук республики Таджикистан. 2015. Том 58. №12. 8 с.

#### Информация об авторах

**Тарасова Елена Владимировна**, кандидат технических наук, доцент департамента энергетических систем. E-mail: tarasova.ev@dvfu.ru. Дальневосточный Федеральный университет. Россия, 690922, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, д. 10, корп. С, каб. 708.

**Коротынская Вероника Сергеевна**, студентка второго курса магистратуры, обучающаяся по направлению Строительство. Теплогазоснабжение и вентиляция. E-mail: korotynskaia.vs@students.dvfu.ru. Дальневосточный Федеральный университет. Россия, 690922, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, д. 10, корп. 7.1, комната 440.

Поступила 18.04.2022 г.

© Тарасова Е.В., Коротынская В.С., 2022

*\*Tarasova E.V., Korotynskaya V.S.*

*Far Eastern Federal University*

*\*E-mail: korotynskaia.vs@students.dvfu.ru*

## ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF SOLAR HEAT SUPPLY USING AN AIR SOURCE HEAT PUMP

**Abstract.** Solar energy is one of the sources of renewable energy. However, during the cold season in Russia, the use of solar energy is difficult due to low outdoor air temperatures. The purpose of this article is to analyze the possibility of energy saving when using solar energy for the heating system of an individual residential building in Vladivostok. The latitude of the city is 43 °, but the estimated temperature for the design of heating is -22 ° C. This greatly complicates the use of solar heat. The possibility of accumulation of low-potential heat in a specially equipped outhouse (greenhouse) for conversion by a thermal air-water pump is analyzed in order to use it for heating needs in the future. Two constructions are considered as the finishing material of the extension: a two-layer polycarbonate with an air layer and an energy-saving double-glazed window. The calculation shows that in the coldest month is January, the potential of solar thermal energy is 14 %–37 % of the required heat demand, depending on the material used in the construction of the extension. In March and April, excess heat is generated. It can be used for hot water supply needs. Thus, for an individual residential building, the use of solar heat accumulated in a greenhouse extension is relevant as an additional source of heat for the heating system.

**Keywords:** energy efficient house, energy saving, solar radiation, passive house, heating.

## REFERENCES

1. Hussain J., Khan A., Zhou K. The impact of natural resource depletion on energy use and CO<sub>2</sub> emission in Belt & Road Initiative countries: A cross-country analysis. *Energy*. 2020. Vol. 199. 117409
2. Frid S.E., Mordynskii A.V., Arsatov A.V. Integrated solar water heaters [Colnechnye vodonagrevateli akkumulyacionnogo tipa]. *Thermal engineering*. 2012. Vol. 59. No 11. Pp. 874–880. doi: 10.1016/j.energy.2020.117409. (rus)
3. Attia S. Evolution of Definitions and Approaches. *Net Zero Energy Buildings (NZEB)*. Imprint: Butterworth-Heinemann, 2018. 400 p.
4. Lammaier F. Typical projects: energy-saving and passive houses [Tipovye proekty: energosberegayushchie i passivnye doma]. *Pro Passivhaus*, 2017. 42 p. (rus)
5. Lisina O.V. Assessment of the potential of the innovative concept of energy-efficient eco-development: new items of engineering equipment and design technologies [Ocenka potenciala innovacionnoj koncepcii energoeffektivnogo ekodevelopmenta: novinki inzhenernogo oborudovaniya i tekhnologii proektirovaniya]. *Management of sustainable development*. 2016. No. 2. Pp. 66–72. (rus)
6. Towler F.B. *The Future of Energy*. Queensland, 2014. 376 p.
7. Bastron A.V. Solar heat supply system. Patent RF, no 2014144390, 2017.
8. Andreev V.M., Andreeva A.V., Davidyuk N.Yu., Sadchikov N.A., Chekalin A.V. Concentrator solar power plant. Patent RF, no 2020115244, 2021.
9. Dolgoplov V.D., Rybyakova M.V., Finaev A.V. Device for heating a country house with an attached greenhouse. Patent RF, no 2011131222/12, 2011.
10. Rizvanov S.F. Energy-efficient heated building with a greenhouse. Patent RF, no 2015122787, 2017.
11. Chuikov D.A. Energy saving system by recuperating outgoing heat [Sistema energosberezheniya putem rekuperacii uhodyashchego tepla]. *Scientific research of young scientists. Collection of articles of the XVI International Scientific and Practical Conference*. Penza, 2022. Pp. 63–66. (rus)
12. Lazzarin R. Heat pumps and solar energy: A review with some insights in the future. *International Journal of Refrigeration*. 2020. Vol. 116. Pp. 146–160. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.03.031.
13. Mears D.R. Solar Heated Home Using an Attached Greenhouse and a Woodburning Stove. *NAR ASAE Meeting*. New jersey, 2004. 11 p.
14. Ma P.J., Lizarraga S., Picallo-Perez A. *Exergy Analysis and Thermoeconomics of Buildings*. Butterworth Heinemann, 2020. 1069 p.
15. Kondratiev K.Y. *Actinometry [Aktinometriya]*. L.: Hydrometeorological Publishing House, 1965, 693 p. (rus)
16. Nazarov B.I., Saliev M.A., Makhmudov A.N., Abdullaev S.F. Calculation of the total radiation flux on the inclined plane of solar receivers under conditions of aerosol pollution of the atmosphere [Raschyot potoka summarnoj radiacii na naklonnuyu ploskost' solnechnyh priyomnikov v usloviyah aerol'nogo Zagryazneniya atmosfery]. *Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan* 2015. Vol. 58. No. 12. 8 p. (rus)

*Information about the authors*

**Tarasova, Elena V.** PhD, Associate Professor of the Department of Energy Systems. E-mail: tarasova.ev@dvfu.ru. Far Eastern Federal University. Russia, 690922, Vladivostok, Russkiy island, Ajax village, 10, building C, auditorium 708.

**Korotynskaya, Veronika S.** Graduate master student. E-mail: korotynskaia.vs@students.dvfu.ru. Far Eastern Federal University. Russia, 690922, Vladivostok, Russkiy island, Ajax village, 10, building 7.1, room 440.

---

*Received 18.04.2022*

**Для цитирования:**

Тарасова Е.В., Коротынская В.С. Оценка возможности солнечного теплоснабжения с использованием воздушного теплового насоса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 41–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-41-48

**For citation:**

Tarasova E.V., Korotynskaya V.S. Assessment of the possibility of solar heat supply using an air source heat pump. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 10. Pp. 41–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-41-48

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-49-58

Слободчиков Е.Г.

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

E-mail: egor-sakha@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

**Аннотация.** Тенденция роста индивидуального домостроения в стране решает социально-экономические задачи и жилищные вопросы населения. Развитие жилищного строительства в Якутии характеризуется обеспечением темпов строительства и различными социальными программами в сельской местности. В связи с географическими и транспортно-логистическими трудностями подключение многих поселений и микрорайонов к централизованным источникам энергоснабжения является затруднительным и несет большие бюджетные затраты. Вследствие этого, возрастает спрос на автономные источники тепловой генерации за счет использования доступного местного топлива. На рынке представлены различные твердотопливные теплогенераторы малой мощности (до 100 кВт) с верхним способом воспламенения топлива, использующие угольное и дровяное топливо. Практика показывает, что данные теплогенераторы и их дымоходные системы при эксплуатации в низких температурах наружного воздуха испытывают сложности, что отражается в образовании сажи на поверхностях нагрева и кислотного конденсата в дымоходах. Одной из причин является неудовлетворительный режим горения топлива из-за конструктивных особенностей топки котлоагрегата. Для изучения влияния климатических и внешних факторов на работу твердотопливного теплогенератора, в отопительный период выполнены измерения параметров работы топки котла и его дымоходной системы. Установлено, что при снижении объема топлива по мере выгорания в топке значительно снижаются показатели температуры горения и теплопроизводительности, что связано с увеличением коэффициента избытка воздуха.

**Ключевые слова:** твердотопливные котлы, горение твердого топлива, коэффициент избытка воздуха.

**Введение.** При эксплуатации зданий в условиях Севера России в целях обеспечения комфортности проживания возникают задачи по повышению надежности работы систем тепловой генерации. Согласно принятой Стратегии развития Арктической зоны (утвержден Указом Президента РФ от 26.10.2020 года № 645) в целях социально-экономического развития предусматривается увеличение объемов жилищного строительства и инженерной инфраструктуры в труднодоступных регионах с учетом природно-климатических особенностей Крайнего Севера. В этой связи ведущим трендом развития энергетики в России является широкое использование энергосберегающих технологий, в том числе с применением современных теплоизоляционных материалов, альтернативных источников энергии и местного топлива [1–3]. Одним из направлений является развитие энергетической инфраструктуры с использованием эффективных теплогенераторов.

При проектировании зданий и инженерных систем следует учитывать климатические особенности регионов на территории РФ [4–6]. Согласно СП 131.13330.2012, одной из характерных особенностей климата Якутии является большая годовая амплитуда температур, которая состав-

ляет от 50–127 °С. Суровость отопительного сезона характеризуется числом градусо-суток отопительного периода (ГСОП) [7, 8]:

$$\text{ГСОП} = (t_{\text{вн}} + t_{\text{от}}) \cdot z, \quad (1)$$

где ГСОП – градусо-сутки отопительного периода (°С·сут);  $t_{\text{вн}}$  – расчетная температура внутреннего воздуха, °С;  $t_{\text{от}}$  – средняя температура за отопительный период, °С;  $z$  – количество суток отопительного периода, ед.

На рисунке 1 представлены значения ГСОП для характерных городов России и Европы, а также населенных пунктов Якутии. Как видно из рисунка, суровость значений для Республики Саха (Якутия) значительно превышает значения городов России и составляет 8000–12000.

Значительная продолжительность отопительного периода, наличие вечномёрзлых грунтов, слабо развитая энергетическая инфраструктура, отсутствие логистики между населенными пунктами, в основном малонаселенными, создают особые трудности для строительства и обеспечения жизнедеятельности человека на Севере [9, 10].

Систему ЖКХ Якутии образуют объекты теплогенерации, транспортировки теплоносителя и инфраструктурные сооружения. Практиче-

ски во всех районах и городах республики отмечается высокий уровень износа инженерных систем, более 50 %, который не позволяет обеспечить нормальное функционирование систем теплоснабжения [11]. Северные регионы характеризуются малой плотностью населения, транспортной труднодоступностью, высокой стоимостью тепловой энергии централизованных источников

(около 5–8 раз по сравнению с газовым и твердым топливом) [12]. «Занятость лесами территории Якутии составляет 47,4 %, общая площадь земель лесного фонда на территории Республики Саха (Якутия) около 249 млн. га, что составляет 81 % от общей площади республики» [13]. Также местным топливом является бурый и каменный уголь.

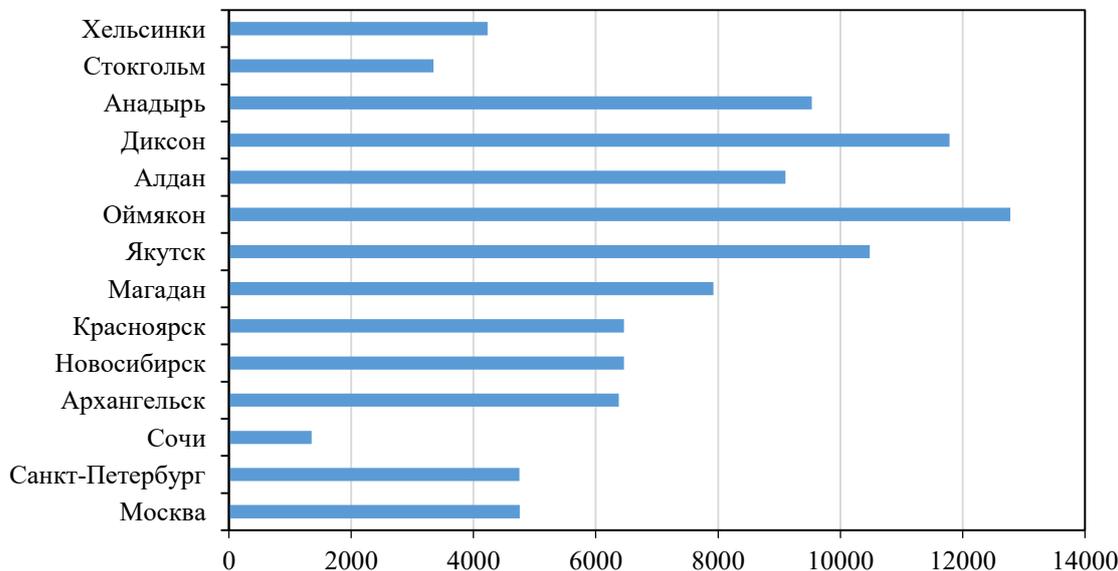


Рис. 1. Градусо-сутки отопительного периода для различных городов России и стран Европы

На рынке России существуют различные твердотопливные котлоагрегаты «нижнего» горения (Zota, Ураган, Теплодар, Kiturami) и «верхнего» горения (Липснеле, Стронува, Candle, Терморобот), кирпичные и самодельные печи водяного и конвекционного типа. Эффективность теплогенераторов определяет затраты и рентабельность производства тепловой энергии [14]. Теплогенерирующая установка является основным элементом системы отопления и горячего водоснабжения зданий. Обеспечение долговечности работы инженерных систем зависит от проработанности проектных решений в эксплуатируемых климатических условиях и апробации инженерного оборудования [15–17]. Преимуществами автономного теплоснабжения является снижение сроков строительства и капитальных затрат, исключение утечек при транспортировке тепловой энергии, низкая стоимость генерации энергии, возможность местного регулирования [18]. Особенности работы котельных установок и общие характеристики автономного теплоснабжения изложены в работах М.М. Щеголева, Ю.Л. Гусева, Г.Н. Делягина, П.А. Хаванова, Г.М. Климова, О.К. Мазуровой и других [19–23].

С начала 2010-х годов в Якутии активно начали внедряться твердотопливные котлы, использующие так называемый принцип верхнего

воспламенения топлива, когда горение осуществляется в вертикальной цилиндрической топке сверху-вниз. В настоящее время в республике эксплуатируется свыше 2500 единиц данных котлов, использующих данный принцип. Основным источником топлива для таких автономных систем является бурый уголь, дрова из лиственных пород дерева. «Отопительный котел «верхнего горения» представляет собой корпус цилиндрической формы, в котором размещена камера сгорания топлива, колосниковая решетка, емкость для загрузки теплоносителя, устройство для подачи и распределения воздуха» [24]. Отличием от других котлоагрегатов является то, что воспламенение и горение топлива происходит в вертикальном цилиндре по направлению сверху-вниз.

**Методы, оборудование, материалы.** Загрязнение внешних поверхностей нагрева при омывании их дымовыми газами происходит при работе теплогенераторов на твердом топливе, и зависит от протекающих в топке процессов. Процесс загрязнения наблюдается в виде осаждения частиц золы на поверхностях нагрева котлоагрегата. Наиболее интенсивно данные процессы протекают при наличии в топке полувосстановительной среды, снижающей температуру плавления золы по сравнению с температурами для

окислительной среды. Данные отложения ухудшают лучистый и конвективный теплообмен, прогрессирующие отложения в виде плотных структур могут привести к аварийной остановке котлоагрегата. Причиной 23 % аварийных остановок отечественных котлоагрегатов является золовой износ [25]. Также негативное влияние на эксплуатацию котлоагрегатов оказывает влияние продуктов горения твердого топлива на охлажденные металлические конструкции дымоходных систем в виде кислотной коррозии, увлажнения и процессов сажеобразования разной степени (рис. 2а и 2б). Кислотная коррозия происходит с конденсацией серной кислоты при проходе дымовыми газами низкотемпературных поверхностей в дымоходных системах и местах нагрева. При содержании в топливе более 3 % серы конденсат на стенках дымохода может быть в виде

серной кислоты с концентрацией до 70–80 %. [26]. Образование сажи по мере его накопления на поверхностях нагрева сопровождается его самопроизвольным возгоранием или забиванием отверстий для отвода продуктов сгорания, с последующим проникновением дымовых газов в жилые помещения. Установлено, что процессы образования кислотного конденсата наблюдаются в переходный период в межсезонье и приводят к быстрому разрушению дымоходных систем из-за агрессивной среды. Все эти процессы негативно сказываются на эксплуатации котлоагрегатов, снижают надежность во время отопительного сезона, могут привести к аварийным случаям. Одним из факторов их возникновения являются низкие параметры горения топлива и температуры продуктов сгорания.



а)



б)

Рис. 2. Фотографии натуральных наблюдений за работой твердотопливного котла «верхнего» горения: а) образование сажи в полости дымохода, б) выпадение кислотного конденсата на поверхности дымохода

В целях исследования были проведены экспериментальные измерения режимов работы теплогенераторов с верхним воспламенением котла марки «Липснеле Арктик», с паспортной мощностью 40 кВт, во время отопительного периода в г. Якутске. Схема расположения и установки измерительных приборов и оборудования показана на рис. 3.

Основными измеряемыми параметрами являлись температуры горения топлива, продуктов сгорания, теплоносителя и теплопроизводительность котлоагрегата. Данные фиксировались с шагом 60 сек в память логгера, а затем обрабатывались на компьютере. Испытуемый котлоагрегат содержит нагнетательный вентилятор, управляющий контроллер и термостатический элемент. Контроль работы вентилятора осуществляется контроллером, зависящей от параметров

теплоносителя в подающей линии теплогенератора. Измерения параметров работы отопительного котла производились при 2 режимах: с автоматическим поддувом воздуха через нагнетательный вентилятор и с механической ручной заслонкой без поддува воздуха, растопка производилась на дровах из лиственных пород дерева и на буре угля Кангаласского угольного месторождения.

**Основная часть.** Испытания производились в естественных условиях при температуре наружного воздуха в диапазоне  $-30$  до  $-40$  °С, что характеризует осенне-зимний период. Изучение параметров котлоагрегата в зависимости от массы топлива в топке (рис. 4 и 5) показало увеличение продолжительности горения на 10–44 % в режиме механического регулирования. Установлено увеличение часовой производительности тепловой энергии в режиме автоподдува на

выше 50–55 % по сравнению с механическим регулированием, что обусловлено увеличением количества воздуха в топке, ускоряющего окислительные процессы. Низкая часовая теплопроизводительность котла в режиме механического регулирования обусловлена недостатком воздуха, участвующего в горении и поддержании диффузионно-кинетического режима, с увеличением времени горения. При этом показатели суммарной тепловой производительности в обоих режимах при массе топлива 15-43 кг имеют между собой минимальные отклонения, составляющие 6-

7 %. Показатели суммарной тепловой производительности при количестве топлива 5–10–15 кг, что составляет 11–23–35 % от общей массы, при сравнении с полной растопкой (43 кг) составляют в режиме с механической терморегуляцией: 5 кг – 4,44 %, 10 кг – 22,2 %, 15 кг – 30%, в режиме автотопдува воздуха: 5 кг – 10,7 %, 10 кг – 26,75 %, 15 кг – 29,75 %. Сжигание малых объемов топлива (5-15 кг) в топке котлоагрегата данной конструкции не позволяет получить необходимое количество тепловой энергии и обеспечить длительность горения.

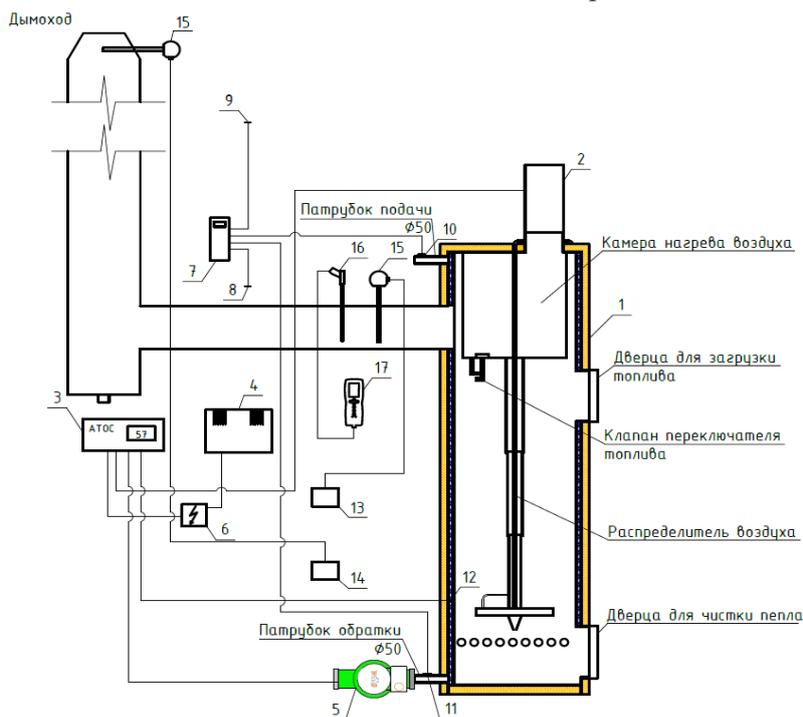


Рис. 3. Схема экспериментального стенда. Обозначения: 1 – твердотопливный котел; 2 – вентилятор поддува воздуха WPA 120; 3 – контроллер автоматики TAL RT-22; 4 – теплоинформатор Teplocom GSM; 5 – циркуляционный насос; 6 – блок питания; 7 – 4-х канальный измеритель температуры Center 309; 8 – датчик температуры внутреннего воздуха; 9 – датчик температуры наружного воздуха; 10 – датчик температуры подающей линии; 11 – датчик температуры обратной линии; 12 – термостат контроллера котла; 13, 14 – 1-канальные измерители EClerk-M-K; 15 – датчики температуры дымовых газов; 16 – зонд отбора проб дымовых газов и измерения тяги котла; 17 – газоанализатор Testo 340

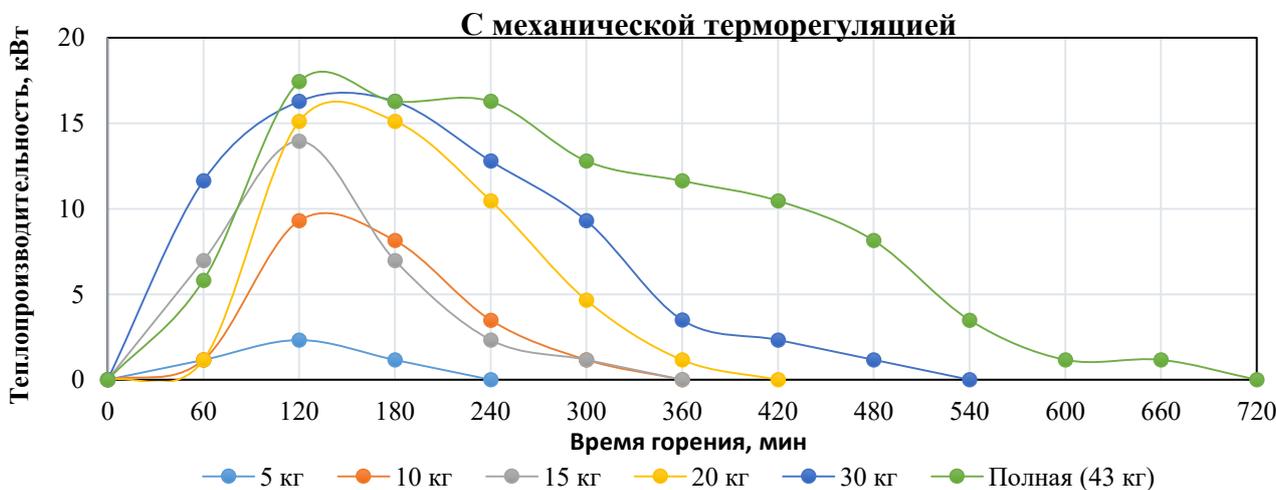


Рис. 4. Часовая теплопроизводительность котла при различной массе дровяного топлива в режиме механического регулирования количества воздуха

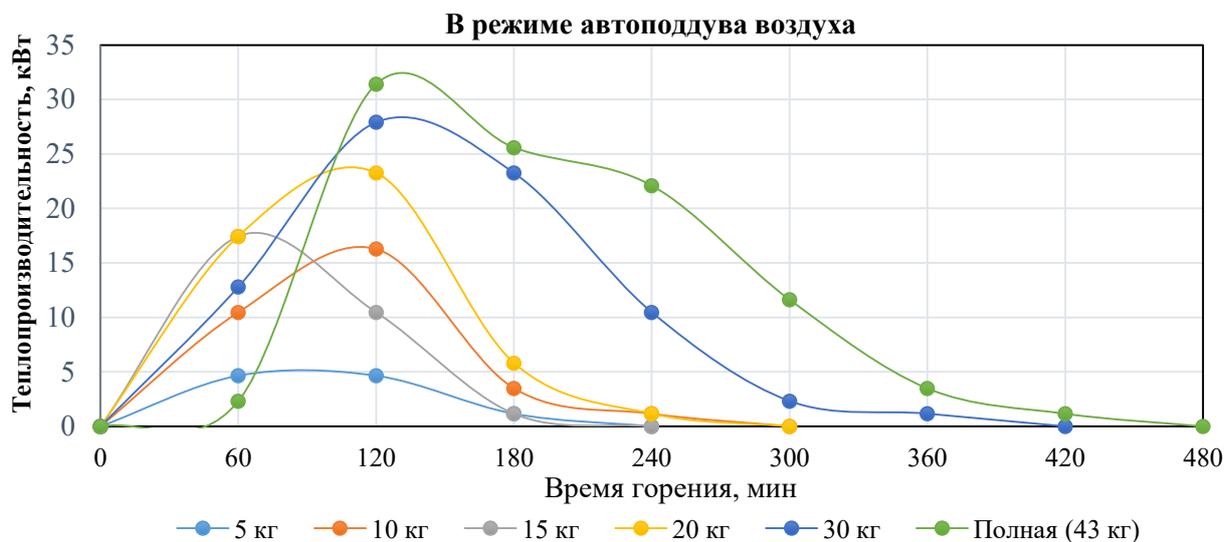


Рис. 5. Часовая теплопроизводительность котла при различной массе дровяного топлива в режиме автоподдува воздуха

Обеспечение высокой теплопроизводительности котлов и горения топлива производится бесперерывной подачей воздуха в топку и удаления продуктов сгорания, что возможно с применением автоматизированных установок. [26, 27]. Использование режима автоподдува в зимнее время является необходимым условием для компенсации тепловых потерь здания и достижения паспортных характеристик котла.

Измерение параметров работы топки котла и его дымоходной системы (рис. 6) в режиме автоподдува в зимнее время ( $t_n = -40,0 \dots -33,0$  °C) показало, что в «рабочем» режиме температура горения составляет 500–900 °C, с переменным затуханием при срабатывании терморегулятора. Как видно из графика изменение показателей температуры дымовых газов напрямую зависит от работы вентилятора поддува воздуха в камеру сгорания топлива, который срабатывает при понижении температуры теплоносителя подающей линии  $t_n < 65$  °C. Зоны процесса горения в зависимости от температуры горения разделены на зоны растопки, возгорания и горения топлива, начала затухания по мере выгорания и отсутствия горения. Разделение зон отсутствия горения топлива производилось по температуре пирогенного разложения сложных органических соединений с выделением летучих веществ равной 100 °C [28]. Зоны процесса горения указаны в следующем порядке для всех графиков: 1 – горения нет, укладка топлива, вынос шлака; 2 – начало растопки, возгорание; 3 – горение; 4 – медленное затухание по мере выгорания топлива. Установлено, что по мере уменьшения и сгорания топлива, в топке происходит процесс медлен-

ного устойчивого понижения показателей температуры горения и соответственно температуры дымовых газов, с последующим затуханием. Данный процесс наблюдается при постепенном прогорании и уменьшении количества топлива в топке ниже 30 % от общего объема. Установлено, что из-за конструктивных особенностей топочной камеры котлоагрегата с верхним воспламенением, увеличивается объем воздушного пространства топки – кислородной зоны, образуя избыточный воздух с увеличением объема топочных газов и снижением температуры горения и дымовых газов.

При увеличении количества избыточного воздуха показатели температур продуктов сгорания в верхней части в устье дымохода существенно разнятся с показателями температур на выходе из котла (рис. 6), и близки к образованию кислотного конденсата. Одним из основных недостатков при эксплуатации дымовых труб является их работа в непроектном режиме, связанная в первую очередь с большими перепадами наружных температур в отопительный сезон в регионах Севера.

Увеличение количества избыточного воздуха снижает тепловую эффективность котла (рис. 7), что показано на графике ниже. Длительность указанного процесса от начала понижения температуры горения до полного затухания из-за полного выгорания топлива составляет несколько часов, в среднем 2–3 часа. В период указанного процесса ухудшается тепловая работа топки котла и снижается температура теплоносителя системы отопления здания. Влияние избытка воздуха в топке увеличивает интенсивность теплопотерь, тем самым снижается КПД котлоагрегата.

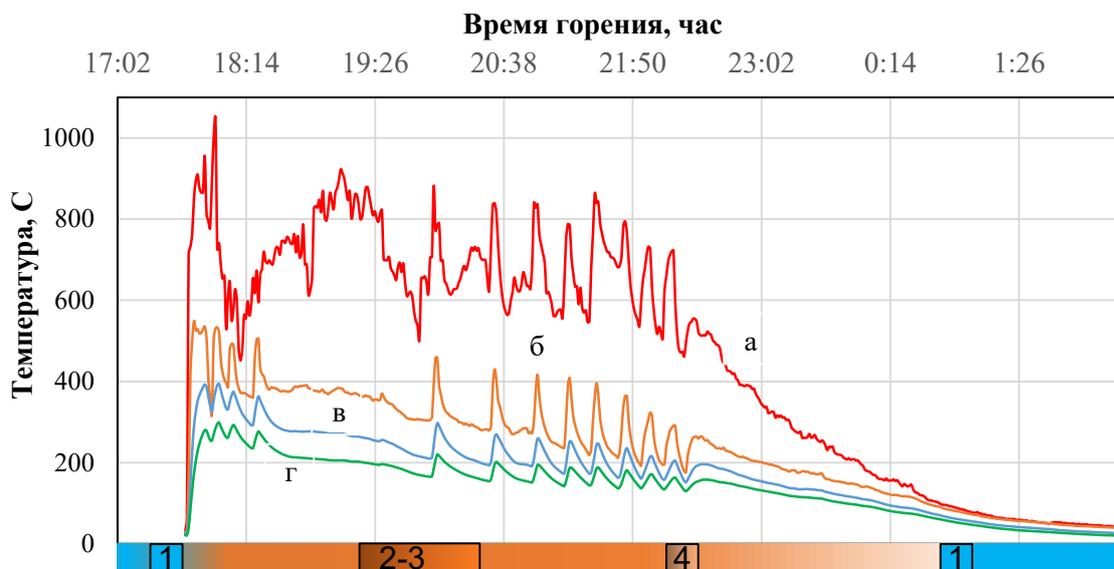


Рис. 6. Процесс горения котла на 1 закладке дровяного топлива:  
 а) температура горения дров в топке, на месте подачи воздуха, °С; б) температура дымовых газов на выходе с топки котла, °С; в) температура дымовых газов в середине дымохода, h=3,5 м, °С; г) температура дымовых газов в устье дымохода, h=7,0 м, °С



Рис. 7. Процесс горения котла на 1 закладке дровяного топлива:  
 а) тепловая производительность котла, кВт;  
 б) температура теплоносителя на подающей линии системы отопления, °С

Выявлена фаза перехода в процесс постепенного снижения температур внутреннего воздуха в помещении и теплоносителя в системе отопления (рис. 8), когда в топке котлоагрегата присутствует избыточный воздух. Это свидетельствует о том, что при переходе работы топки котла с повышенными коэффициентами избытка воздуха может снижаться надежность теплоснабжения и увеличивается риск аварийных случаев из-за замерзания теплоносителя.

Следует отметить, что в межсезонье происходит нерациональное использование топлива и

случаи снижения температуры теплоносителя из-за резких перепадов наружной температуры воздуха и сложностей в регулировании процессов горения в топке. В таких режимах эксплуатации не обеспечивается защита котлоагрегата от низких температур воды в обратной линии. Эти процессы приводят к интенсификации низкотемпературной коррозии, отложениям накипи, увеличению расхода топлива, сокращению срока службы котлоагрегата.

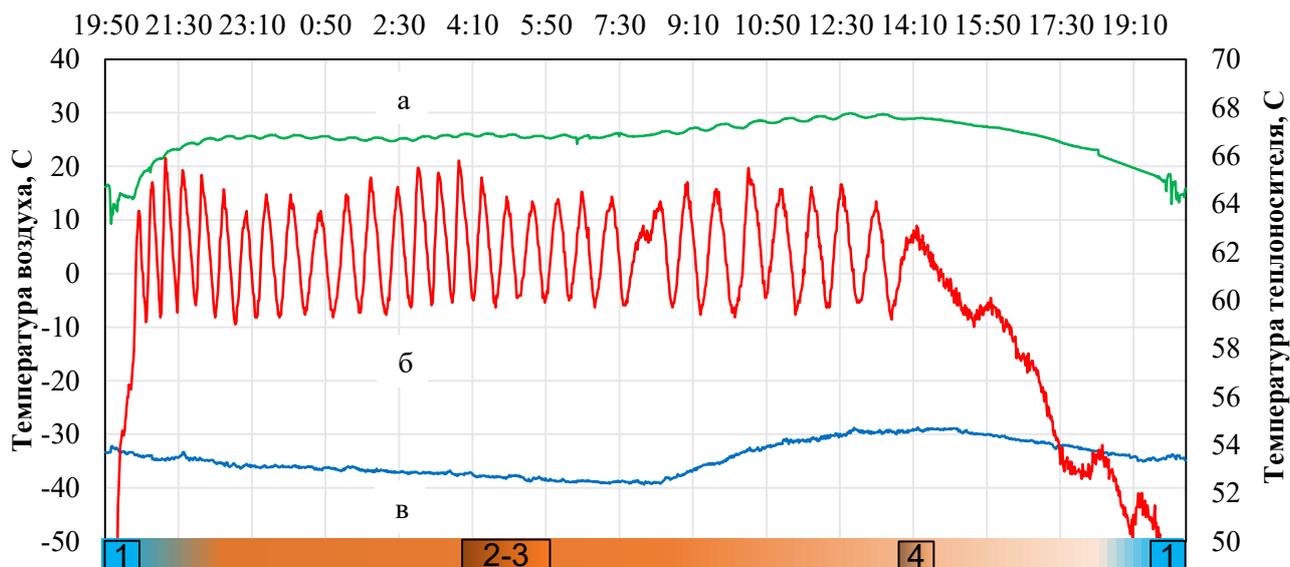


Рис. 8. Процесс горения котла на 1 закладке бурого угля:  
 а) температура внутреннего воздуха в отапливаемом помещении, °С; б) температура теплоносителя на подающей линии системы отопления, °С; в) температура наружного воздуха, °С

### Выводы.

1. При экстремально низких параметрах наружного воздуха низкая тепловая защита строительных конструкций снижает надежность эксплуатации котельного оборудования. При расчете мощности теплогенератора принимается во внимание его заводские характеристики, но как показывают исследования надежная работа отопительного аппарата и его дымоходной системы зависят от режимов горения топлива, конструктивных особенностей топки и климатических условий.

2. По результатам экспериментального исследования работы твердотопливных котлов длительного (верхнего) горения в климатических условиях Севера России определено, что при уменьшении количества топлива (ниже 30 %) по мере его прогорания наблюдается переходный момент, когда происходит постепенное ухудшение показателей котлоагрегата: температуры горения, дымовых газов, теплоносителя системы отопления и внутреннего воздуха в отапливаемом здании.

3. Установлено, что низкие показатели работы котлоагрегата вследствие избыточного количества воздуха в топке снижают теплопроизводительность котла и могут привести к образованию кислотного конденсата в дымоходной системе. Во время отопительного сезона возрастает риск аварийных случаев в системе теплоснабжения и снижается надежность отопления здания.

4. По итогам анализа полученных результатов возникает необходимость ограничения объема топочного пространства рассмотренной конструкции топки пределами кислородной зоны

при малых количествах топлива, в том числе перевод на нижнее или комбинированное воспламенение.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сулов Д.Ю., Рамазанов Р.С., Лобанов И.В. Исследование распределения газозвушной смеси в корпусе инжекционной горелки с тепловым рассекателем // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №10. С. 60–65. DOI: 10.34031/article\_5db3db3a9cb6a3.99321784.
2. Кочев А.Г., Соколов М.М., Кочева Е.А., Федотов А.А. Практическое использование альтернативных энергетических ресурсов в православных храмах // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. №7. С. 78–85. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-727-7-78-85.
3. Файст В. Основные положения по проектированию пассивных домов. 2-е издание. М.: Издательство АСВ, 2011. 148 с.
4. Малявина Е.Г., Маликова О.Ю., Фролова А.А. Строительная климатология: учеб.-метод. пособие. М.: Изд-во МИСИ–МГСУ, 2020. 47 с.
5. Гагарин В.Г., Неклюдов А.Ю. Учет теплотехнических неоднородностей ограждений при определении тепловой нагрузки на систему отопления здания // Жилищное строительство. 2014. №6. С. 3–7.
6. Кушев Л.А., Никулин Н.Ю., Овсянников Ю.Г., Алифанова А.И. Современные способы интенсификации работы кожухотрубных теплообменных аппаратов систем теплоснабжения // Технические науки. Строительство. 2019. №9. С. 82–90. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2227-2917-2018-2-130-140>.

7. Богословский В.Н. Тепловой режим зданий. М.: Стройиздат, 1979. 248 с.
8. Полежаев Ю.В., Юрьевич Ф.Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 392 с.
9. Карауш С.А., Хуторной А.Н. Теплогенерирующие установки систем теплоснабжения: учеб. пособие. Томск: ТГАСУ, 2003. 161 с.
10. Местников А.Е., Кардашевский А.Г. Энергоэффективное малоэтажное строительство в Якутии // II Всерос. науч. конф. с международным участием «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий». Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2015. С. 39–41.
11. Государственная программа Республики Саха (Якутия) «Обеспечение качественными жилищно-коммунальными услугами и развитие электроэнергетики на 2020-2024 годы»: Постановление Правительства РС (Я) от 15 сентября 2021 №345 // Приказ Министерства ЖКХ и энергетики РС (Я) 2022. №182-ОД.
12. Федоров В.Т., Кокоев М.Н. Альтернативное теплоснабжение северных поселков городского типа // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 8. С. 65–73. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.08.65-73.
13. Гаврильева Н.К., Николаева Ф.В., Старостина А.А., Гоголева Н.И. Мониторинг земельных ресурсов Республики Саха (Якутия) // Московский экономический журнал. 2020. №7. С. 45–57. DOI: 10.24411/2413-046X-2020-10524.
14. Иванов В.Н., Иванова А.В. Энергоэффективность газовых теплогенераторов малой мощности в условиях Крайнего Севера: учеб. пособие. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2019. 376 с.
15. Лицкевич В.К. Жилище и климат: монография. М.: Стройиздат, 1984. 288 с.
16. Михеев А.П., Береговой А.М., Петрянина Л.Н. Проектирование зданий и застройки населенных мест с учетом климата и энергосбережения: учеб. пособие. М.: АСВ, 2002. 192 с.
17. Иванов В.Н., Иванова А.В., Тихонов В.С. О надежности эксплуатации газовых котлов малой мощности в условиях Северо-Востока России // Промышленное и гражданское строительство. 2013. №8. С. 51–53. DOI: 10.33622/0869-7019.
18. Петрова А.И., Гордеев М.А. Значение малой энергетики в энергоснабжении районов Крайнего Севера // XVI междунар. межвуз. науч.-практ. Конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности». М.: МГСУ, 2013. С. 606–608.
19. Щеголев М.М., Гусев Ю.Л., Иванова М.С. Котельные установки: учеб. для вузов. 2-е изд. М.: Стройиздат, 1972. 384 с.
20. Делягин Г.Н., Лебедев В.И., Пермяков Б.А., Хаванов П.А. Теплогенерирующие установки: учеб. для вузов. 2-е изд. М.: ООО «ИД Бастет», 2010. 624 с.
21. Хаванов П.А. Источники теплоты автономных систем теплоснабжения: монография. М.: МГСУ, 2014. 208 с.
22. Климов Г.М. Децентрализованные системы водяного отопления индивидуальных жилых зданий: учеб.-метод. пособие. Электронный ресурс. URL: <https://www.iprbookshop.ru/80892.html> (дата обращения: 19.07.2022).
23. Мазурова О.К., Кузнецов Н.В., Бутенко А.Н. Автономное теплоснабжение: учеб. пособие. Ростов-на-Дону: РГСУ, 2011. 143 с.
24. Пат. 187524 Российская Федерация, МПК F23B 101/00. Универсальный отопительный аппарат верхнего и нижнего горения / И.П. Жирков, Е.Г. Слободчиков, П.С. Тимофеев; заявитель и патентообладатель ООО «Саха Липснеле», № 2018127787; заявл. 27.07.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 8.
25. Герасимова Н.П. Золовой износ поверхностей нагрева котлоагрегатов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. №3 (152). С. 596–605. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-3-596-605.
26. Ельшин А.М., Ижорин М.Н., Жолудов В.С., Овчаренко Е.Г. Дымовые трубы. М.: Стройиздат, 2001. 296 с.
27. Шишков И.А., Лебедев В.Г., Беляев Д.С. Дымовые трубы энергетических установок. М.: Энергия, 1976. 176 с.
28. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Ч.1. Топливо: учеб. пособие. СПб.: СПбГТУРП, 2011. 84 с.

#### Информация об авторах

**Слободчиков Егор Гаврильевич**, старший преподаватель кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция». E-mail: egor-sakha@mail.ru. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Инженерно-технический институт. Россия, 677013, г. Якутск, ул. Белинского, д. 58.

Поступила 01.08.2022 г.

© Слободчиков Е.Г., 2022

**Slobodchikov E.G.**

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University

E-mail: egor-sakha@mail.ru

**RESEARCH OF THE OPERATION OF LOW-POWER SOLID-FUEL HEAT GENERATORS UNDER THE CLIMATIC CONDITIONS OF THE NORTH**

**Abstract.** The growth trend of individual housing construction in the country decides the socio-economic role in solving the housing issue of the population. The development of housing construction in Yakutia is characterized by ensuring the pace of construction and various social programs in rural areas. Due to geographic and transport and logistics difficulties, connecting many settlements and microdistricts to centralized power supply sources is difficult and incurs large budget costs. On the market there are various solid fuel heat generators of low power (up to 100 kW) with an upper fuel ignition method, using coal and wood fuel. Practice shows that these heat generators and their chimney systems experience difficulties when operating at low outdoor temperatures, which is reflected in the formation of soot on heating surfaces and acid condensate in chimneys. One of the reasons is the unsatisfactory mode of fuel combustion due to the design features of the boiler furnace. To study the influence of climatic and external factors on the operation of a solid fuel heat generator, during the heating period, measurements were made of the operation parameters of the boiler furnace and its chimney system. It has been established that with a decrease in the volume of fuel as it burns out in the furnace, the combustion temperature and heat output are significantly reduced, which is associated with an increase in the excess air coefficient.

**Keywords:** solid fuel boilers, solid fuel combustion, excess air ratio.

**REFERENCES**

1. Suslov D.Yu., Ramazanov R.S., Lobanov I.V. Investigation of the distribution of the gas-air mixture in the body of an injection burner with a thermal splitter [Issledovanie raspredeleniya gazovozdushnoj smesi v korpuse inzhekcionnoj gorelki s teplovym rassekatelem]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 10. Pp. 60–65. (rus). DOI: 10.34031/article\_5db3db3a9cb6a3.99321784.
2. Kochev A.G., Sokolov M.M., Kocheva E.A., Fedotov A.A. Practical use of alternative energy resources in Orthodox churches [Prakticheskoe ispol'zovanie al'ternativnyh energeticheskikh resursov v pravoslavnyh hramah]. News of higher educational institutions. Construction, 2019. No. 7. Pp. 78–85. (rus). DOI: 10.32683/0536-1052-2019-727-7-78-85.
3. Fajst V. Basic provisions for the design of passive houses. 2nd edition. [Osnovnye polozheniya po proektirovaniyu passivnyh domov. 2-e izdanie]. M.: Publishing House of the ASV, 2011. 148 p. (rus)
4. Malyavina E.G., Malikova O.Yu., Frolova A.A. Building climatology: a teaching aid [Stroitel'naya klimatologiya: ucheb.-metod. posobie]. M.: Publishing House of MISI - MGSU, 2020. 47 p. (rus)
5. Gagarin V.G., Neklyudov A.Yu. Accounting for thermal inhomogeneities of fences when determining the heat load on the heating system of a building [Uchet teplotekhnicheskikh neodnorodnostej ograzhdenij pri opredelenii teplovoj nagruzki na sistemu otopeniya zdaniya]. Housing construction, 2014. No. 6. Pp. 3–7. (rus)
6. Kushchev L.A., Nikulin N.Yu., Ovsyannikov Yu.G., Alifanova A.I. Modern methods of intensifying the operation of shell-and-tube heat exchangers of heat supply systems [Sovremennye sposoby intensivirovaniya raboty kozhuhotrubnyh teploobmennyh apparatov sistem teplosnabzheniya]. Technical science. Construction, 2019. No. 9. Pp. 82–90. (rus). DOI: 10.21285/2227-2917-2018-2-130-140.
7. Bogoslovskij V.N. Thermal regime of buildings. [Teplovoj rezhim zdaniy]. M.: Stroyizdat, 1979. 248 p. (rus)
8. Polezhaev Yu.V., Yur'evich F.B. Thermal protection. [Teplovaya zashchita]. M.: Energy, 1976. 392 p. (rus)
9. Karaush S.A., Hutornoj A.N. Heat generating installations of heat supply systems: a tutorial. [Teplogeneriruyushchie ustanovki sistem teplosnabzheniya]. Tomsk: TGASU, 2003. 161 p. (rus)
10. Mestnikov A.E, Kardashevskij A.G. Energy-efficient low-rise construction in Yakutia [Energoeffektivnoe maloetazhnoe stroitel'stvo v Yakutii]. II Vseros. nauch. konf. s mezhdunarodnym uchastiem «Energ- i resursoeffektivnost' maloetazhnyh zhilyh zdaniy». Novosibirsk: Institut teplofiziki SO RAN. 2015. Pp. 39–41. (rus)
11. State program of the Republic of Sakha (Yakutia) "Providing high-quality housing and communal services and developing the electric power industry for 2020-2024": Decree of the Government of the Republic of Sakha (Yakutia) dated September 15, 2021 No. 345 [Gosudarstvennaya programma Respubliki Saha (Yakutiya) «Obespechenie kachestvennymi zhilishchno-kommunal'nymi uslugami i razvitie elektroenergetiki na 2020-2024 gody»: Postanovlenie Pravitel'stva RS (YA) ot 15 sentyabrya 2021 №345]. Order of the Ministry of Housing and Public Utilities and Energy of the RS (Y) 2022. No. 182-OD.
12. Fedorov V.T., Kokoev M.N. Alternative heat supply for northern urban-type settlements [Al'ternativnoe teplosnabzhenie severnyh poselkov gorodskogo tipa]. Industrial and civil construction,

2020. No. 8. Pp. 65–73. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.08.65-73. (rus)

13. Gavril'eva N.K., Nikolaeva F.V., Starostina A.A., Gogoleva N.I. Monitoring of land resources of the Republic of Sakha (Yakutia) [Monitoring zemel'nykh resursov Respubliki Saha (Yakutiya)]. Moscow Economic Journal, 2020. No. 7. Pp. 45–57. (rus). DOI: 10.24411/2413-046X-2020-10524.

14. Ivanov V.N., Ivanova A.V. Energy efficiency of low power gas heat generators in the Far North [Energoeffektivnost' gazovykh teplogenerirov maloj moshchnosti v usloviyah Krajnego Severa: ucheb. posobie]. Yakutsk: Publishing House of NEFU named after M.K. Ammosov, 2019. 376 p. (rus)

15. Lickevich V.K. Housing and climate: monograph. [ZHilishche i klimat: monografiya]. M.: Stroyizdat, 1984. 288 p. (rus)

16. Miheev A.P., Beregovoj A.M., Petryanina L.N. Design of buildings and development of populated areas, taking into account climate and energy saving: a textbook. [Proektirovanie zdaniy i zastroyki naselennykh mest s uchetom klimata i energosberezheniya: ucheb. posobie.]. M.: ASV, 2002. 192 p. (rus)

17. Ivanov V.N., Ivanova A.V., Tihonov B.S. On the reliability of operation of gas boilers of low power in the conditions of the North-East of Russia [O nadezhnosti ekspluatatsii gazovykh kotlov maloj moshchnosti v usloviyah Severo-Vostoka Rossii]. Housing construction, 2013. No. 8. Pp. 51–53. (rus). DOI: 10.33622/0869-7019.

18. Petrova A.I., Gordeev M.A. The importance of small-scale power generation in the energy supply of the regions of the Far North [Znachenie maloj energetiki v energosnabzhenii rajonov Krajnego Severa]. XVI mezhdunar. mezhvuz. nauch.-prakt. Konf. studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh «Stroitel'stvo – formirovanie sredy zhiznedeyatel'nosti». M.: MGSU. 2013. Pp. 606–608. (rus)

19. Shchegolev M.M., Gusev Yu.L., Ivanova M.S. Boiler plants: a textbook for universities. 2nd

ed. [Kotel'nye ustanovki: ucheb. dlya vuzov. 2-e izd.]. M.: Stroyizdat, 1972. 384 p. (rus)

20. Delyagin G.N., Lebedev V.I., Permyakov B.A., Havanov P.A. Heat generating installations: a textbook for universities. 2nd ed. [Teplogeneriruyushchie ustanovki: ucheb. dlya vuzov. 2-e izd.]. M.: LLC "ID Bastet", 2010. 624 p. (rus)

21. Havanov P.A. Heat sources of autonomous heat supply systems: monograph. [Istochniki teploty avtonomnykh sistem teplosnabzheniya: monografiya]. M.: MGSU, 2014. 208 p. (rus)

22. Klimov G.M. Decentralized water heating systems for individual residential buildings: teaching aid [Decentralizovannye sistemy vodyanogo otopeniya individual'nykh zhilykh zdaniy: ucheb. – metod. posobie]. Electronic resource. URL: <https://www.iprbookshop.ru/80892.html> (date of treatment: 19.07.2022).

23. Mazurova O.K., Kuznecov N.V., Butenko A.N. Autonomous heat supply: a tutorial. [Avtonomnoe teplosnabzhenie: ucheb. posobie]. Rostov-on-Don: RSSU, 2011. 143 p. (rus)

24. Zhirkov I.P., Slobodchikov E.G., Timofeev P.S. Universal heating apparatus of upper and lower combustion. Patent RF, no. 2018127787, 2018

25. Gerasimova N.P. Ash wear of heating surfaces of boilers [Zolovoj iznos poverhnostej nagreva kotloagreatov]. Bulletin of the Irkutsk State Technical University, 2020. No. 3 (152). Pp. 596–605. (rus)

26. El'shin A.M., Izhorin M.N., ZHoludov V.S., Ovcharenko E.G. Smoke pipes. [Dymovye trubyy]. M.: Stroyizdat, 2001. 296 p. (rus)

27. SHishkov I.A., Lebedev V.G., Belyaev D.S. Chimneys of power plants. [Dymovye trubyy energeticheskikh ustanovok]. M.: Energy, 1976. 176 p. (rus)

28. Belousov V.N., Smorodin S.N., Smirnova O.S. Fuel and combustion theory. Part I Fuel: study guide. [Toplivo i teoriya goreniya. CH.I. Toplivo: ucheb. posobie]. St. Petersburg: SPbGTURP, 2011. 84 p. (rus)

#### Information about the authors

**Slobodchikov, Egor G.** Senior lecturer of the department "Heat and gas supply and ventilation". E-mail: [egor-sakha@mail.ru](mailto:egor-sakha@mail.ru). M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Institute of Engineering and Technology. Russia, 607013, Yakutsk, st. Belinskogo, 58.

Received 01.08.2022

#### Для цитирования:

Слободчиков Е.Г. Исследование работы твердотопливных теплогенераторов малой мощности в климатических условиях севера // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 49–58. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-49-58

#### For citation:

Slobodchikov E.G. Research of the operation of low-power solid-fuel heat generators under the climatic conditions of the nort. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 10. Pp. 49–58. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-49-58

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-59-69

**Бойцова Д.В.**

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: boytsova.dv@yandex.ru

## ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРЫ ТУРИСТИЧЕСКИХ ВИЗИТ-ЦЕНТРОВ ПРИ ЗАГОРОДНЫХ ПАРКАХ

**Аннотация.** В статье рассмотрены предпосылки появления визит-центра как нового типа общественного здания, реализующего функции туризма. Выделены основные типы парков и условия, с учетом которых возникает целесообразность создания визит-центров. Определены функциональные отличия визит-центров от других типов общественных зданий, которые формируются при загородных парках различной тематической направленности и величины. Проанализирован функциональный состав визит-центров и нюансы его формирования в зависимости от типа парка, при котором он создается. Приведены аспекты формирования генерального плана и благоустройства визит-центра. Рассмотрена зависимость построения функциональной структуры визит-центра от фактора сезонности, характерного для туристической деятельности. Предложена классификация визит-центров по параметру общей площади и вместимости, с учетом особенностей функционального состава и специфики организации пространств. Определены принципы архитектурно-планировочной организации центров с учетом колебания спроса на туристические услуги. Проанализированы и выявлены особенности их объемно-пространственной организации и архитектурных решений. Выделена роль коммуникационных пространств и эксплуатируемой кровли центра, как специфического фактора интеграции здания в природный контекст. Приведены рекомендации, которые целесообразно использовать при архитектурном формировании концепции визит-центра.

**Ключевые слова:** визит-центр, природный парк, археологический парк, общественные здания, архитектурная типология, инфраструктура туризма.

**Введение.** Туристический визит-центр представляет собой визитную карточку района (региона) путешествия и является связующим элементом между туристами и субъектами туристической сферы [1]. Целостность и непрерывность выставочного пространства, простые, но, одновременно, оригинальные архитектурные и дизайнерские решения, разнообразие постоянных и временных экспозиций, широкое использование интерактивных экспонатов и игровых элементов, дающих возможность не только увидеть, но и активно включиться в мир познания природы, разнообразие форм и методов работы с посетителями – все это существенно повышает туристскую привлекательность, научно-образовательную значимость, эффективность и финансово-экономическую устойчивость парка [2]. Визит-центр является относительно новым типом общественного здания, основное назначение которого состоит в организации деятельности посетителей при парковых структурах. Термин «визит-центр» впервые был введен в США в 1950-х годах в рамках реализации национальной программы «Миссия 66» [3]. Цель программы отражала актуальную и на сегодняшний день потребность в поиске и удержании баланса между использованием наследия (культурного, природного и так далее) в туризме и обеспечением его сохранности [4]. Старт программы также был обусловлен возросшей посещаемостью парков США с 3,5 млн до 30 млн человек ежегодно.

Появление визит-центра как типа здания стало результатом эволюции исторически сложившихся музейно-административных зданий, функциональную основу которых составляли залы постоянных экспозиций и блок административных помещений, часто с включением научно-исследовательской функции. Изменение социальных потребностей определило необходимость модернизации инфраструктуры туризма с учетом его развития, растущей динамики посещаемости и характера деятельности посетителей. Исследования в метапредметной области взаимодействия психологии и архитектуры выявили высокую потребность в установлении интеллектуальной и эмоциональной связи между интересами посетителя и значениями ресурса (парка) [5].

Важной задачей в определении нового типа являлось формирование критериев и признаков, определяющих целесообразность создания визит-центров при парках различного масштаба, его функциональный состав и оптимальную вместимость помещений, особенности размещения, специфические характеристики архитектурно-планировочных и объемно-пространственных решений. С развитием технологий и экологического направления в архитектуре, немаловажным критерием в формировании визит-центров стала их ориентированность на энергоэффективность в эксплуатации [6].

Аспектам формирования визит-центров посвящены научные труды и публикации многих

отечественных и зарубежных ученых. Так, например, проблемы оптимизации функций визит-центров, их сравнение с музеями и особенностями организации туристской деятельности на особо охраняемых территориях рассмотрены в трудах Сартаковой А.В. [6]. Проблеме территориального планирования эко-туристических учреждений, а также теоретическому моделированию характеристик визит-центров, посвящены работы Астанина Д.М. [7]. Функционально-планировочные особенности визит-центров рассмотрены в статьях Поморова С.Б. [8].

За рубежом исследование визит-центров и вопросов их эксплуатации ведется более интенсивно. Среди множества работ можно выделить труды Карра И., посвященные социологическим и историческим аспектам формирования визит-центров [9]. Эволюция в проектировании визит-центров стала центральным вопросом в работах Палмера Д. и Кристалла Д. [10]. Типологические признаки визит-центров и их роль в определении туристской среды рассмотрены в работах Кархёльма М. [11]. Практике интерпретации научных материалов в структуре и архитектуре визит-центров уделено внимание в трудах Пирса Ф. [12].

Тем не менее, остаются малоизученными вопросы, связанные с современными тенденциями формирования визит-центров, их архитектурно-планировочной организацией; не сформулированы основные принципы проектирования многофункциональных центров с доминированием обслуживающей функции при парковых структурах различного типа; отсутствует классификация визит-центров по ключевым параметрам.

Цель настоящего авторского исследования состоит в выявлении основных характеристик современных визит-центров и базовых принципов их архитектурного формирования. Достижение цели исследования возможно путем решения следующих задач:

1) Изучение хронологии типологической эволюции объектов туристской инфраструктуры при загородных парках.

2) Выявление типологических признаков визит-центров и их функциональных отличий от других многофункциональных учреждений, расположенных в загородных парках различных типов.

3) Проведение комплексного анализа опыта формирования и эксплуатации визит-центров.

4) Выявление отличий в функциональной структуре визит-центров, расположенных при парках различной тематической направленности.

5) Определение способов оптимизации пространств визит-центров, ориентированных на решение проблемы сезонного колебания туристического спроса.

6) Предложение классификации визит-центров по величине на основании изученного опыта и специфики их функциональной организации.

7) Выявление факторов, способствующих увеличению потребительского спроса на туристические услуги, включая аспект архитектурных решений.

Объектом исследования являются специализированные многофункциональные центры при загородных парках, которые реализуют функции обслуживания туристов, а также выставочной, научной и образовательной деятельности.

**Материалы и методы.** Методика исследования основана на изучении библиографических и графических материалов, проектных предложений и опыта строительства визит-центров. Выявленные особенности архитектурного формирования данного типа зданий были подвергнуты комплексному анализу, результат которого позволил сформулировать базовые принципы организации визит-центров. Систематизация некоторых количественных и качественных показателей позволила сформировать их классификацию по ряду признаков.

**Основная часть.** Визит-центр как тип общественного здания является результатом социального заказа, следовательно, его архитектура формируется под воздействием оптимизации социальных сценариев, на которые оказывает влияние множество факторов. Можно сказать, что визит-центр идеологически находится на стыке потребностей общества и охраны материального наследия от воздействия того же общества [13]. Эта особенность определяет его главенствующую функцию – регулятивную.

Целесообразность создания визит-центра зависит от местоположения парка, его типа, статуса и площади занимаемой территории [14]. Типология парков довольно обширна, однако не все из них нуждаются в развитии специализированной инфраструктуры, включающей здание визит-центра. Анализ отечественного и зарубежного опыта показал, что необходимость формирования туристской инфраструктуры возникает при парках, площадью более 5 га, с продолжительностью экскурсионных и иных мероприятий более 1,5 часов и транспортной удаленностью от населенных пунктов с развитой инфраструктурой более 20 минут. Данные характеристики наиболее соответствуют природным, археологическим, этнографическим (историко-культурным) паркам, расположенным за пределами населенных пунктов городского типа.

Стоит подробнее рассмотреть функциональное отличие визит-центров от других типов зданий и комплексов, которые создаются при парках различных типов и величины. Обобщение изученного опыта выявило типы центров, которые организуются на прилегающих к таким паркам территориях: музеи, центры интерпретации, визит-центры, научно-исследовательские центры, научно-практические, культурно-туристические центры [15]. Выявленные типы центров близки по реализуемым функциям, но имеют ряд отличий в части их доминирования, вместимости и функционально-планировочной организации.

Для музеев характерно развитие выставочной функции, представленной совокупностью залов постоянной экспозиции и временных выставок. Центры интерпретации в основе своей структуры имеют специализированные залы (в том числе медиа залы), имитирующие пещеры, жилища, крепости и другие пространства, воспроизведённые с достоверной точностью. Для них также характерно наличие открытых площадок для организации массовых мероприятий (исторические реконструкции, фестивали, концерты и другие) и направленность на краткосрочные образовательные мероприятия. Научно-исследовательские центры ориентированы на проведение полевых работ и экспонирование артефактов для небольшой аудитории посетителей. Научно-практические центры имеют образовательную направленность и рассчитаны на длительное пребывание посетителей. Культурно-туристические центры могут включать в себя несколько типов центров, но обязательным элементом являются средства размещения туристов (гостиница, кемпинг, этническая деревня и другие).

Визит-центры отличаются от представленных типов доминированием обслуживающей функции [16]. В структуре центра организуют выставочные пространства, как правило, они включены в состав многофункционального вестибюля или являются отдельным помещением существенно меньшей вместимости в сравнении с помещениями музеев. Основу обслуживающего блока составляют предприятия питания (буфет, кафе, ресторан), информационный центр, зоны досуга и отдыха [17].

Необходимость оптимизации пространств с целью повышения рентабельности учреждений и снижения эксплуатационных затрат во многом обусловлена сезонным колебанием спроса на туристические мероприятия [18]. В отличие от учреждений при городских парках, загородные визит-центры не могут в полной мере отвечать потребностям местного населения в непопулярный туристический период и при этом сохранять

стабильный уровень посещаемости. Данная особенность эксплуатации продиктовала применение ряда принципов формирования генерального плана, архитектурно-планировочной и функциональной организации визит-центров.

Визит-центры стараются размещать на прилегающих территориях к охранным зонам парков, с возможностью удобного подъезда и временного хранения личного, общественного и экскурсионного транспорта [19]. При наличии достаточной площади часто организуют круговые или петлеобразные подъезды к главному входу для удобства доступа маломобильных групп посетителей и экстренных служб. Количество парковочных мест определяется вместимостью парка и прогнозируемыми параметрами посещаемости [20]. При расположении парка на достаточном удалении от населенных пунктов ориентируются на усредненную вместимость туристических автобусов, которая оказывает прямое влияние на количественный состав участников экскурсионных групп и возможность их одновременного обслуживания. Наличие альтернативных видов транспорта (железная дорога, водные виды) может значительно увеличить показатели спроса на туристические услуги, без необходимости увеличения количества парковочных мест.

Важная роль визит-центра – организация деятельности туристов, в том числе, распределение потоков посетителей и контроль за их передвижением. В связи с этим, внутреннее пространство здания чаще всего является началом экскурсионного маршрута, что учитывается при выборе участка под застройку. Немаловажным критерием при генеральном планировании территории визит-центра является наличие значимых видовых перспектив, которые не только оказывают влияние на ценностные характеристики архитектурного решения, но и способствуют формированию системы элементов интуитивной навигации посетителей.

Пик туристической активности приходится на летние месяцы, что обуславливает организацию и использование открытых общественных пространств, предназначенных для ожидания и сбора туристических групп. В зависимости от климатических условий местности, площадки могут иметь навесы или являться частью полуоткрытого дворового пространства визит-центра. В расчете на длительное пребывание посетителей и расширения спектра проводимых мероприятий, возможна организация детских и универсальных площадок. Такая тенденция позволяет сокращать площадь вестибюля визит-центра с целью оптимизации его структуры.

Формирование функционального состава визит-центра и распределение удельного веса его

функциональных блоков и зон во многом зависит от возможности использования существующей инфраструктуры в пешеходной или легкой транспортной доступности, тематической ориентации парка и его туристических ресурсов [21]. Природные парки отличаются значительным охватом территории, посещаемостью малыми туристическими группами и ориентацией на активные виды отдыха, что определяет интенсивность использования информационной зоны, предприятий общественного питания (буфетного типа), мест для организации досуговых программ, пунктов хранения личных вещей и проката инвентаря.

В визит-центрах при археологических парках особое место занимает постоянная экспозиция артефактов и материалов исследований, востребованы временные выставки в пространстве транзитных зон, магазины сувениров и книгопечатной продукции, предприятия общественного питания (буфет, кафе, ресторан). В зависимости от длительности программы посещения археологического парка, в структуру визит-центра могут быть включены помещения универсального использования, предназначенные для проведения массовых образовательных мероприятий (лекции, кинопоказы, мастер-классы).

Визит центры, ориентированные на организацию мероприятий этнографической направленности, имеют в своем составе значительный вспомогательный блок, реализующий функцию хранения инвентаря и реквизита. Структура таких центров учитывает массовый характер мероприятий, в связи с чем, особое внимание уделяется местам сбора участников и возможности единовременного увеличения помещений за счет трансформации ограждающих конструкций и последующего присоединения к ним прилегающих открытых площадок.

Выбор используемого типа предприятия общественного питания во многом зависит от наличия и количества подобных учреждений в легкой доступности, специфики и длительности отдыха в парке. Возможность организации пикника на территории парка делает нецелесообразным включение в структуру визит-центра полноценного кафе или ресторана. И наоборот, отсутствие поблизости предприятия общественного питания, определяет необходимость его организации в составе центра. Исключение могут составлять уникальные тематические кафе и рестораны, которые являются самостоятельными объектами притяжения туристов.

Величина визит-центров обуславливается динамикой туристического спроса, определяется функциональным составом и вместимостью основных помещений зоны посетителей. Исследование зарубежных объектов выявило характерные границы их вместимости и прямую корреляцию между параметрами величины центра и местоположением парка как взаимосвязанного объекта. Всё множество визит-центров можно дифференцировать по общей площади и вместимости на микро (<800 кв. м, <150 чел.) (рис. 1), малые (800–1500 кв. м, 150–250 чел.) (рис. 2) и средние центры (>1500 кв. м, > 250 чел.) (рис. 3). Более крупным центрам, как правило, присущи типологические признаки музеев и центров интерпретации за счёт существенного развития выставочных, образовательных и событийных пространств. Микро визит-центры обладают минимальным набором помещений и функциональных зон (вестибюль со стойкой информационного центра, предприятие сувенирной торговли, зона обслуживания, служебная зона). Малые центры, в дополнение к основным помещениям, могут иметь в своем составе отдельное помещение временных выставок, предприятие питания и возможность многофункционального использования вестибюля. Средние по величине визит-центры отличаются расширенным функциональным составом, включающим дополнительно образовательные зоны, представленные лекционными и универсальными залами. Возможно включение помещений для проведения научных исследований и хранения артефактов.

Местоположение парка и характеристики его аттрактивности во многом определяют величину визит-центра. Выделены следующие аспекты расположения, способствующие увеличению вместимости: удаленность от населенных пунктов с развитой инфраструктурой в пределах комфортной транспортной доступности (20–40 мин); наличие альтернативных мест досуга и отдыха в пределах пешеходной доступности (до 3 км); относительная близость к крупным транспортным магистралям (< 3 км); ценностные и визуальные характеристики природного окружения.

Аттрактивность парка определяет уровень его популяризации. Данный критерий является изменяемым, поэтому влияет на величину визит-центра в меньшей степени. Тем не менее, прогноз посещаемости при наличии стратегии развития парка даёт представление о количественных характеристиках объектов инфраструктуры туризма.



Территориальное планирование

Расположение относительно пам.археологии	Удаленность от населенного пункта	Удаленность от мест рекреации	Транспортная доступность	
<b>&lt; 100 м</b>	<b>на окраине г. Камараса</b>	<b>в составе эко-туристического кластера</b>	<b>легкая транспортная</b>	

Характеристика памятника археологии

	Историко-культурная значимость	Степень сохранности	Территориальная масштабность	Степень исследованности
	<b>Национальная</b>	<b>Удовлетв.</b>	<b>500 кв.м</b>	<b>активная</b>

Функционально-планировочная структура

	Основные функциональные блоки	Основные помещения	Уд.вес блоков	Вмест.	
	<b>Выставочный</b>	Выставочный зал	30%	120 чел.	
	<b>Универсальный</b>	Многофункциональное помещение	<b>45%</b>		
	<b>Обслуживание</b>	Магазин сувениров, книжный магазин, инфоцентр	25%		

Рис. 1. Визит-центр (микро вместимости) при археологическом парке *Espai Origins*. Испания, г. Камараса, арх. *Lluís De La Fuente Pascual*, 2012 г. п.

Важным критерием рентабельности визит-центра является гибкость его функционально-планировочной структуры, учитывающая изменяемые потребности общества и фактор развития территории. Так, например, появление новых общественных центров в пешеходной доступности, строительство и модернизация путей транспортного сообщения, развитие парковой структуры, определяют необходимость увеличения площади посетительской части визит-центра и интеграцию дополнительных функций. Гибкость архитектурно-планировочного решения обеспечивается применением принципа многофункциональности и трансформативности, который заключается в формировании пространств, учитывающих возможность одновременного проведения мероприятий, легкой адаптации геометрических характеристик помещений под необходимые формы организации программ. Как показывают

исследования посетительских предпочтений, важным элементом аттрактивности является оригинальное архитектурное решение визит-центра [22]. Стоит отметить, что данный аспект оказывает положительное влияние на динамику общей посещаемости взаимосвязанного парка и ближайших населенных пунктов. При выборе цветовых решений ориентируются на варианты взаимодействия с окружающим контекстом. Используются приглушенные тона, если они свойственны местным строительным материалам. Цветовые акценты проявляются преимущественно для выявления входной группы и с целью организации вспомогательных ориентиров для слабовидящих посетителей. Прием использования контрастных текстур отделочных материалов встречается в архитектуре многих визит-центров. В экстерьере такой подход позволяет выделить доминирующие элементы (отражающие или

поглощающие естественный свет), поддержать качество визуального и тактильного восприятия. В интерьере подобные вариации цветов и текстур

выявляют тематические различия и функциональное зонирование в формируемых пространствах.



Территориальное планирование

Расположение относительно пам. археологии	Удаленность от населенного пункта	Удаленность от мест рекреации	Транспортная доступность	
< 500 м	20 км от г. Ренне	в составе экотуристического кластера	легкая транспортная	

Характеристика памятника археологии

	Историко-культурная значимость	Степень сохранности	Территориальная масштабность	Степень исследованности
	<b>Национальная</b>	<b>Хорошая</b>	<b>2 га</b>	<b>завершено</b>

Функционально-планировочная структура

Основные функциональные блоки	Основные помещения	Уд. вес блоков	Вмест.	
<b>Универсальный</b>	Многофункциональный вестибюль с выставочным пространством, лекционный зал	45%	180 чел.	
<b>Обслуживание</b>	Магазин сувениров, книжный магазин, кафе/террас, информационный центр	55%		

Рис. 2. Визит-центр (малой вместимости) в природном парке *Hammershus*. Дания, о. Борнхольм, арх. Arkitema Architects, 2018 г. п.

**Выводы.** Системный подход к исследованию позволил сформулировать перечень основных характеристик визит-центра как типа общественного здания и общих принципов, которые целесообразно использовать на стадии формирования концепции проекта:

1. Необходимыми функциональными элементами посетительской зоны визит-центра являются: многофункциональный вестибюль, включающий информационный центр; предприятия сувенирной торговли и питания; выставочное пространство; зону досуга и отдыха; зону обслуживания. При этом совокупный удельный вес предприятий обслуживания является доминирующим.

2. Распределение потоков посетителей – важнейшая задача архитектурно-планировочной

организации визит-центра, решение которой возможно путем определения оптимального сценария движения посетителей, исключая конфликтные зоны.

3. Дизайн внутреннего пространства и благоустройства территории должны способствовать интуитивной навигации посетителей.

4. При расчете вместимости целесообразно учитывать норму площади посетительской зоны 3–4 кв. м/чел. Величина прогнозируемой посещаемости зависит от степени популярности парка и его физических качеств, удаленности от населенного пункта с развитой инфраструктурой, наличием альтернативных мест досуга и отдыха. Классификация визит-центров по общей площади и вместимости позволяет скорректировать функциональный состав визит-центра.



Территориальное планирование

Расположение относительно пам. археологии	Удаленность от населенного пункта	Удаленность от мест рекреации	Транспортная доступность	
<b>&lt; 500 м</b>	<b>3.2 км от г. Эймсбери</b>	<b>в составе эко-туристического кластера</b>	<b>легкая транспортная</b>	

Характеристика памятника археологии

	Историко-культурная значимость	Степень сохранности	Территориальная масштабность	Степень исследованности
	<b>ЮНЕСКО</b>	<b>Удовлетв.</b>	<b>7 га</b>	<b>завершено</b>

Функционально-планировочная структура

	Основные функциональные блоки	Основные помещения	Уд. вес блоков	Вмест. 350 чел.	
	<b>Выставочный</b>	Выставочный зал	30%		
	<b>Универсальный</b>	Многофункциональное помещение, лекционный зал	10%		
	<b>Обслуживание</b>	Магазин сувениров, книжный магазин, инфоцентр	<b>60%</b>		

Рис. 3. Визит-центр (средней вместимости) в природном парке (памятник Stonehenge). Великобритания, г. Эймсбери, арх. Denton Corker Marshall, 2013 г. п.

5. Целесообразна строгая дифференциация посетительской и служебной зоны. Последняя, в свою очередь, может быть разделена на зону для персонала и зону проведения научных исследований.

6. Ввиду частой удаленности парков и, следовательно, визит-центров от населенных пунктов при формировании генерального плана и архитектурно-планировочного решения необходимо обеспечить охраняемые меры. Помимо использования технологического оборудования, важно предусматривать проницаемость и просматриваемость пространств, минимизировать количество входов, как на территорию визит-центра, так и в самом здании. Помещения для хранения ценных экспонатов и артефактов целесообразно размещать в подвальной этаже.

7. Природные парки часто имеют выраженный рельеф, что диктует необходимость архитектурного ответа путем интеграции здания в естественную среду с минимальным изменением ландшафта. Такие парки наиболее уязвимы к техногенной нагрузке, что требует тщательного подхода к организации приема и размещения автотранспорта. Целесообразно размещать открытые площадки для паркинга на относительно ровных площадках, на расстоянии не далее 100 м от визит-центра, с учетом его просматриваемости, удобства доступа и восприятия наиболее значимых элементов здания и естественной среды.

8. Необходимо предусматривать различные режимы эксплуатации здания с учетом периодов минимальной и максимальной посещаемости. Для достижения данной цели возможно выделе-

ние функционального ядра центра, эксплуатируемого круглогодично, и сепарация функциональных элементов сезонного использования.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кондрашова Е.В., Старкова И.И., Пинюгина В.А. Туристические визитно-информационные центры как стратегический ресурс развития туризма // Вестник Бурятского государственного университета. Экономика и менеджмент. 2017. № 3. С. 111–122.
2. Калюжная И.Ю. Визит-центры как основной элемент инфраструктуры ООПТ: зарубежный опыт // Сб. материалов международной научно-практической конференции «Объекты природного наследия и экотуризм». Улан-Удэ – п. Гремячинск, 25–27 августа 2014 г. Москва: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Издательский Дом, 2014. С. 279–286.
3. Allaback S. Mission 66 Visitor Centers: History of a Building Type. Washington D.C. Government Printing Office. 2000. 310 p.
4. Carr E. Mission 66: Modernism and the National Park Service Dilemma. Amherst: University of Massachusetts Press. 2007. 424 p.
5. Gross M., Zimmerman R. Park and Museum Interpretation: Helping Visitors Find Meaning. Curator: The Museum Journal. 2012. Vol. 45. Pp. 265–276.
6. Сартакова А.В. Музеи и визит-центры при ООПТ: к постановке проблемы. Наследие – музей – туризм: мифы и современные реалии: Межрегиональный молодежный форум с международным участием, Улан-Удэ, 20–24 июня 2016 года // Восточно-Сибирский государственный институт культуры, 2016. С. 284–292.
7. Астанин Д.М. Моделирование главной темы информационного визит-центра территорий экологического туризма (градостроительная апробация концепции социального поля П. Бурдые) // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2021. № 10. С. 68–80. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-10-68-80.
8. Поморов С.Б., Вдовин Н.Ф., Морозова Н.В. Концепция базового многофункционального мониторингового и рекреационного визит-центра в природном парке "Ая" // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова. 2006. № 1. С. 36–37.
9. Carr E., Retondo-Jackson E., Warner L. The Mission 66 Era of National Park Development, 1945-1972. Draft Multiple Property Documentation Form. Oakland, CA: National Park Service. January 2006.
10. Zube E., Ervin H., Crystal J.H., Palmer J.F. for the U.S. Department of the Interior, National Park Service, Denver Service Center, "Visitor Center Design Evaluation," April 1976, IME Report No. R-76-5.
11. Kärholm M. In search of building types: On visitor centers, thresholds and the territorialization of entrances. Journal of Space Syntax. 2016. Vol. 7. Pp. 55–70.
12. Pearce P., Moscardo G. An Action Research Appraisal of Visitor Center Interpretation and Change. Journal of Interpretation Research. 2007. Vol. 12(2). Pp. 29–50. DOI: 10.1177/109258720701200103.
13. Torcellini P., Long N., Pless S., Judkoff R. Evaluation of the Low-Energy Design and Energy Performance of the Zion National Park Visitors Center. National Renewable Energy Laboratory. 2005. 156 p.
14. Pearce P.L. The Functions and Planning of Visitor Centres in Regional Tourism // The Journal of Tourism Studies. 2004. 15(1). Pp. 8–16.
15. Бойцова Д.В. Аспекты формирования современных объектов туристской инфраструктуры при археологических парках // Сб. науч. трудов по рез. I и II Круглых столов за 2020–2021 годы «Современные подходы и методики научно-исследовательской работы в архитектуре». Санкт-Петербург. 2021. С. 3–12.
16. Бойцова Д.В. Современные тенденции развития научно-туристических центров археологии // Перспективы науки. Тамбов: ТМБпринт. 2021. № 3 (138). С. 207–214.
17. Нельзина О.Ю., Окоороков А.В., Поляков Т. П. Тематические парки как учреждения музейного типа: проблемы и перспективы. М.: Институт Наследия, 2019. 288 с.
18. Логвина Е.В. Проблемы сезонности в туризме и пути их преодоления в условиях санкционной политики в Крыму // Геополитика и геодинамика регионов. Симферополь: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского. 2018. Т. 4 (14). № 2. С. 108–116. DOI: 10.37279/2309-7663.
19. Вавилова Т.Я. Функционально-планировочные особенности объектов инфраструктуры познавательного туризма для национальных парков. Визит-центры // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и дизайн: сборник статей. Самарский государственный архитектурно-строительный университет. Самара: ФГБОУ ВПО "Самарский государственный архитектурно-строительный университет", 2016. С. 44–48.
20. Немчинов Д.М. Совместное использование парковочных мест для объектов капитального строительства различного функционального

назначения // Проектирование автомобильных дорог: Сборник докладов 77-й научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 29–30 января 2019 года. Москва: ООО "А-проджект", 2019. С. 55–65.

21. Копьева А.В., Масловская О.В., Петрова Е.С., Иванова О.Г. Формирование модели функционально-пространственной организации экологического маршрута в структуре националь-

ного парка // Ойкумена. Регионоведческие исследования. 2021. № 2(57). С. 74–81. DOI: 10.24866/1998-6785.

22. Казакова С.А. Архитектурная среда: вопросы туристской аттрактивности // Сервис в России и за рубежом. 2014. № 6(53). С. 3–13. DOI: 10.24412/1995-042X.

#### Информация об авторах

**Бойцова Дарья Владимировна**, старший преподаватель кафедры архитектурного проектирования. E-mail: boytsova.dv@yandex.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4.

Поступила 10.05.2022 г.

© Бойцова Д.В., 2022

**Boytsova D.V.**

*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*

*E-mail: boytsova.dv@yandex.ru*

## GENERAL PRINCIPLES OF FORMING THE ARCHITECTURE OF TOURIST VISIT CENTERS AT COUNTRY PARKS

**Abstract.** *The article discusses the prerequisites for the appearance of a visit center as a new type of public building that implements the functions of tourism. The main types of parks and conditions that make it expedient to create visit centers are highlighted. Functional differences of visit centers from other types of public buildings, which are formed at country parks of various thematic orientation and size, are determined. The functional composition of the visit centers and the nuances of its formation depending on the type of park in which it is created are analyzed. The aspects of the formation of the master plan and improvement of the visit center are given. The dependence of the construction of the functional structure of the visitor center on the seasonality factor characteristic of tourist activity is considered. The classification of business centers according to the parameter of total area and capacity is proposed, considering the features of the functional composition and the specifics of the organization of spaces. The principles of the architectural and planning organization of the centers are determined. Fluctuations in demand for tourist services are determined. The features of its spatial organization and architectural solutions are analyzed and identified. The role of communication spaces and the exploited roof of the center is highlighted as a specific factor in the integration of the building into the natural context. It is advisable to use in the architectural formation of the concept of a visit center.*

**Keywords:** *visitor center, nature park, archaeological park, public buildings, architectural typology, tourism infrastructure.*

### REFERENCES

1. Kondrashova E.V., Starkova I.I., Pinyugina V.A. Tourist visiting and information centers as a strategic resource for tourism development [Turisticheskie vizitno-informacionnye centry kak strategicheskij resurs razvitiya turizma]. Vestnik Bur'yatskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika i menedzhment. 2017. No 3. Pp. 111–122. (rus)

2. Kalyuzhnaya I.Yu. Visit centers as the main element of the infrastructure of protected areas: foreign experience [Vizit-centry kak osnovnoj element

infrastruktury OOPT: zarubezhnyj opyt]. Sb. materialov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Ob"ekty prirodnoogo naslediya i ekoturizm». Ulan-Ude. p. Gremyachinsk, 25–27 august 2014. Moscow: Lomonosov Moscow State University Publishing House, 2014. Pp. 279–286. (rus)

3. Allaback S. Mission 66 Visitor Centers: History of a Building Type. Washington D.C.: Government Printing Office. 2000. 310 p.

4. Carr E. Mission 66: Modernism and the National Park Service Dilemma. Amherst: University of Massachusetts Press. 2007. 424 p.

5. Gross M., Zimmerman R. Park and Museum Interpretation: Helping Visitors Find Meaning. Curator: The Museum Journal. 2012. Vol. 45. Pp. 265–276.
6. Sartakova A.V. Museums and visitor centers in specially protected natural areas [Музеи и визит-центры при ООПТ: к постановке проблемы]: towards the formulation of the problem. «Nasledie – muzej – turizm: mify i sovremennye realii». Mezhhregional'nyj molodezhnyj forum s mezhdunarodnym uchastiem. Ulan-Ude, 20–24 June 2016. East-Siberian State Institute of Culture, 2016. Pp. 284–292.
7. Astanin D.M. Modeling of the main topic of the information visit center of ecotourism territories (urban planning approbation of the concept of P. Bourdieu's social field) [Modelirovanie glavnoj temy informacionnogo vizit-centra territorij ekologicheskogo turizma (gradostroitel'naya aprobaciya koncepcii social'nogo polya P. Burd'e)]. Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 2021. Vol. 10. Pp. 68–80. DOI: 10.34031/2071–7318-2021-6-10-68–80.
8. Pomorov S.B., Vdovin N.F., Morozova N.V. The concept of a basic multifunctional monitoring and recreational visitor center in the Aya Nature Park [Koncepciya bazovogo mnogofunkcional'nogo monitoringovogo i rekreacionnogo vizit-centra v prirodnom parke "Aya"]. Bulletin of Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. 2006. No. 1. Pp. 36–37.
9. Carr E., Retondo-Jackson E., Warner L. The Mission 66 Era of National Park Development, 1945-1972. Draft Multiple Property Documentation Form. Oakland, CA: National Park Service: January 2006.
10. Zube E., Ervin H., Crystal J.H., Palmer J.F. for the U.S. Department of the Interior, National Park Service, Denver Service Center, "Visitor Center Design Evaluation," April 1976, IME Report No. R-76-5.
11. Kärrholm M. In search of building types: On visitor centers, thresholds and the territorialization of entrances. Journal of Space Syntax. Vol.7.2016. Pp. 55–70.
12. Pearce P., Moscardo G. An Action Research Appraisal of Visitor Center Interpretation and Change. Journal of Interpretation Research. 2007. Vol. 12(2). Pp. 29–50. DOI: 10.1177/109258720701200103.
13. Torcellini P., Long N., Pless S., Judkoff R. Evaluation of the Low-Energy Design and Energy Performance of the Zion National Park Visitors Center. National Renewable Energy Laboratory. 2005. 156 p.
14. Pearce P.L. The Functions and Planning of Visitor Centres in Regional Tourism. The Journal of Tourism Studies. 2004. 15(1). Pp. 8–16.
15. Boytsova D.V. Aspects of the formation of modern tourist infrastructure facilities at archaeological parks [Aspekty formirovaniya sovremennykh ob'ektov turistskoj infrastruktury pri arheologicheskikh parkah]. Sb. nauch. trudov po rez. I i II Kruglyh stolov za 2020–2021 «Modern approaches and methods of research work in architecture». Saint-Peterburg. 2021. Pp. 3–12. (rus)
16. Boytsova D.V. Modern trends in the development of scientific and tourist centers of archeology [Sovremennye tendencii razvitiya nauchno-turisticheskikh centrov arheologii]. Science prospects. Tambov: TMBprint. 2021. No. 3 (138). Pp. 207–214. (rus)
17. Nel'zina O.Yu., Okorokov A.V., Polyakov T.P. Theme parks as museum-type institutions: problems and prospects [Tematicheskie parki kak uchrezhdeniya muzejnogo tipa: problemy i perspektivy]. M.: Institut Naslediya, 2019. 288 p. (rus)
18. Logvina E.V. Problems of seasonality in tourism and ways to overcome them in the context of sanctions policy in Crimea [Problemy sezonnosti v turizme i puti ih preodoleniya v usloviyah sankcionnoj politiki v Krymu]. Geopolitika i geodinamika regionov. Simferopol: V.I. Vernadsky Crimean Federal University. 2018. Vol. 4 (14). No 2. Pp. 108–116. DOI: 10.37279/2309-7663. (rus)
19. Vavilova T.Ya. Functional and planning features of educational tourism infrastructure facilities for national parks. Visit centers [Funkcional'no-planirovocnyye osobennosti ob'ektov infrastruktury poznavatel'nogo turizma dlya nacional'nykh parkov. Vizit-centry]. Traditions and innovations in construction and architecture. Architecture and design. Samara State Academy of Architecture and Civil Engineering. Samara: FGBOU VPO "Samara State Academy of Architecture and Civil Engineering", 2016. Pp. 44–48.
20. Nemchinov D.M. Joint use of parking spaces for capital construction projects of various functional purposes [Sovmestnoe ispol'zovanie parkovocnykh mest dlya ob'ektov kapital'nogo stroitel'stva razlichnogo funkcional'nogo naznacheniya]. Road design: sbornik dokladov 77-j nauchno-issledovatel'skoj konferencii MADI, Moscow, 29–30 January 2019. Moscow: OOO "A-project", 2019. Pp. 55–65. (rus)
21. Kop'eva A.V., Maslovskaya O.V., Petrova E.S., Ivanova O.G. Formation of a model of the functional and spatial organization of the ecological route in the structure of the National Park [Formirovanie modeli funkcional'no-prostranstvennoj organizacii ekologicheskogo marshruta v strukture nacional'nogo parka]. Ojkumena. 2021. No. 2(57). Pp. 74–81. DOI: 10.24866/1998-6785 (rus)

22.Kazakova S.A. Architectural environment: issues of tourist attraction [Arhitekturnaya sreda: voprosy turistskoj attraktivnosti]. Service in Russia and abroad. 2014. No. 6(53). Pp. 3–13. (rus). DOI: 10.24412/1995-042X.

*Information about the authors*

**Boysova, Darya V.** Senior Lecturer. E-mail: boysova.dv@yandex.ru. Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, 2-nd Krasnoarmeiskaia St. 4.

*Received 10.05.2022*

**Для цитирования:**

Бойцова Д.В. Общие принципы формирования архитектуры туристических визит-центров при загородных парках // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 59–69. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-59-69

**For citation:**

Boysova D.V. General principles of forming the architecture of tourist visit centers at country parks. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 10. Pp. 59–69. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-59-69

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-70-78

*\*Димитренко Н.В., Обыденнова А.А.**Пензенский государственный университет архитектуры и градостроительства**\*E-mail: ninadim@yandex.ru*

## ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ РАЗВИТИЯ ЖИЛОГО РАЙОНА ШУИСТ В ГОРОДЕ ПЕНЗЕ

**Аннотация.** В статье рассматривается вопрос обеспечения градостроительными средствами устойчивого развития территории жилого района Шуист в г. Пензе с учетом анализа функционально-планировочной структуры, определения основных направлений территориально-пространственного развития и реконструктивных мероприятий с целью преобразования пространственной организации городской территории, обеспечивающей ее комплексное развитие и устойчивое функционирование в системе города. Задачи комплексного развития территорий направлены на качественное преобразование городской среды, опираясь на ее функциональные, транспортно-коммуникационные, эколого-ландшафтные, композиционно-пространственные характеристики, формирующие в своей совокупности сложную, взаимосвязанную систему. Цель устойчивости – в сохранении положительных эффектов от проведенных мероприятий по развитию территорий. Актуальность темы исследования продиктована необходимостью преобразования и обновления ранее сформированной планировочной структуры, выявлением дополнительных градостроительных ресурсов и активизации функциональных процессов в целях устойчивого развития основных подсистем исследуемой территории и в соответствии с современными требованиями к организации городского пространства. При проведении исследования изучена ранее разработанная градостроительная документация, включая генеральные планы г. Пензы разных периодов, проект детальной планировки жилого района Шуист. Проанализированы интенсивность использования исследуемой и сопредельных территорий, их взаимовлияние, сложившийся в них транспортный и пешеходный каркас, социальная обслуженность территории, влияние природно-ландшафтных и экологических характеристик, которые носят определяющее значение для принятия проектных решений по дальнейшему развитию городского пространства. Выявлены особенности и потенциальные градостроительные ресурсы исследуемой территории, даны рекомендации по реорганизации основных элементов планировочной структуры города с целью повышения ее социальной эффективности.

**Ключевые слова:** территориальные ресурсы, комплексная оценка территории, градостроительный анализ, интенсификация территории, жилой район, градостроительный потенциал территории.

**Введение.** Современные задачи преобразования городских территорий с учетом интенсивности происходящих урбанизационных процессов диктуют необходимость рационального и комплексного подхода к существующим территориальным ресурсам города [1, 2]. Условия сбалансированного развития урбанизированных территорий возможны на основе наблюдения, анализа, оценки и управления существующей градостроительной ситуацией и прогнозируемыми градостроительными процессами [3, 4].

Однако поиск внутренних территориальных ресурсов города в условиях его дальнейшего территориально-пространственного развития приводит к возникающим противоречиям между постоянно развивающимися социальными и экономическими требованиями и сложившейся планировочной структурой города.

Наиболее распространены ситуации, когда участок городской территории со временем приобретает деградирующий характер за счет упадка промышленного производства, либо за счет низкого эстетического качества жилой застройки с

высокой степенью износа и низким уровнем благоустройства, что значительно снижает его градостроительный потенциал [5, 6]. Поэтому в течение последних двадцати лет в России интенсификация сложившихся функционально-планировочных структур города является одним из наиболее востребованных способов развития и уплотнения городского пространства, поскольку позволяет перейти к современной модели компактного города, ориентированной на создание высококачественной среды обитания [7].

В настоящее время пространственное развитие города активно преобразует левобережную часть городского пространства с учетом требований стратегии социально-экономического развития, нарушая тем самым целостное устойчивое формирование и развитие планировочной структуры г. Пензы. Смещая фокус развития интенсивных социально-экономических процессов в данном территориальном направлении, происходит «замирание» функционально-планировочных возможностей развития остальных районов города, включая жилой район Шуист, нарастает процесс стратификации городских территорий,

что заметно сказывается на неоднородности планировочной структуры города в целом, нарушении единства его пространственной организации и связей, и как следствие, снижения инвестиционного интереса к «отстающим» территориям.

*Целью* исследования является поиск и определение градостроительных средств и решений в формировании устойчивого развития территории района Шуист в г. Пензе, отвечающего современным социальным, экологическим и градостроительным требованиям и повышению его градостроительной и экономической значимости для города.

*К задачам исследования*, раскрывающим основные проблемы участка проектирования, были отнесены: обеспечение устойчивого развития территории в соответствии с ее градостроительной ценностью; учетом развитости и доступности системы общественных центров и объектов обслуживания населения; структурирование транспортных и пешеходных связей; организация развитой системы озеленения и благоустройства, что в свою очередь положительно отразится на экономической и инвестиционной привлекательности [8].

*Объект исследования* – территория жилого района Шуист в г. Пензе, ограниченной ул. Чапаева, Долгорукова, Чаадаева.

**Материалы и методы.** В процессе исследования были использованы методы системного анализа и комплексной оценки территории, изучены проектные предложения генеральных планов города 1973, 2008, 2019 годов, проект детальной планировки жилого района Шуист 1975 г. с целью выявления преимущественного функционального предназначения исследуемой территории в качестве градостроительного резерва и ее дальнейшего территориально-пространственного развития.

**Основная часть.** Территория жилого района Шуист расположена в северо-восточной части срединной зоны города, на правобережной части реки Суры и обладает хорошей транспортной доступностью, поскольку размещена вдоль магистрали общегородского значения ул. Чаадаева (рис. 1). Основной вид застройки исследуемой территории представлен индивидуальными жилыми домами, строительство которых началось с 1930 г. и велось стихийным образом. В период массового жилищного строительства началось освоение небольшого участка северо-восточной части, предназначенной для развития будущего микрорайона №4 Шуист, перспективное строительство которого так и осталось незавершенным, сформировав только периметральный фронт ул. К. Цеткин [9].

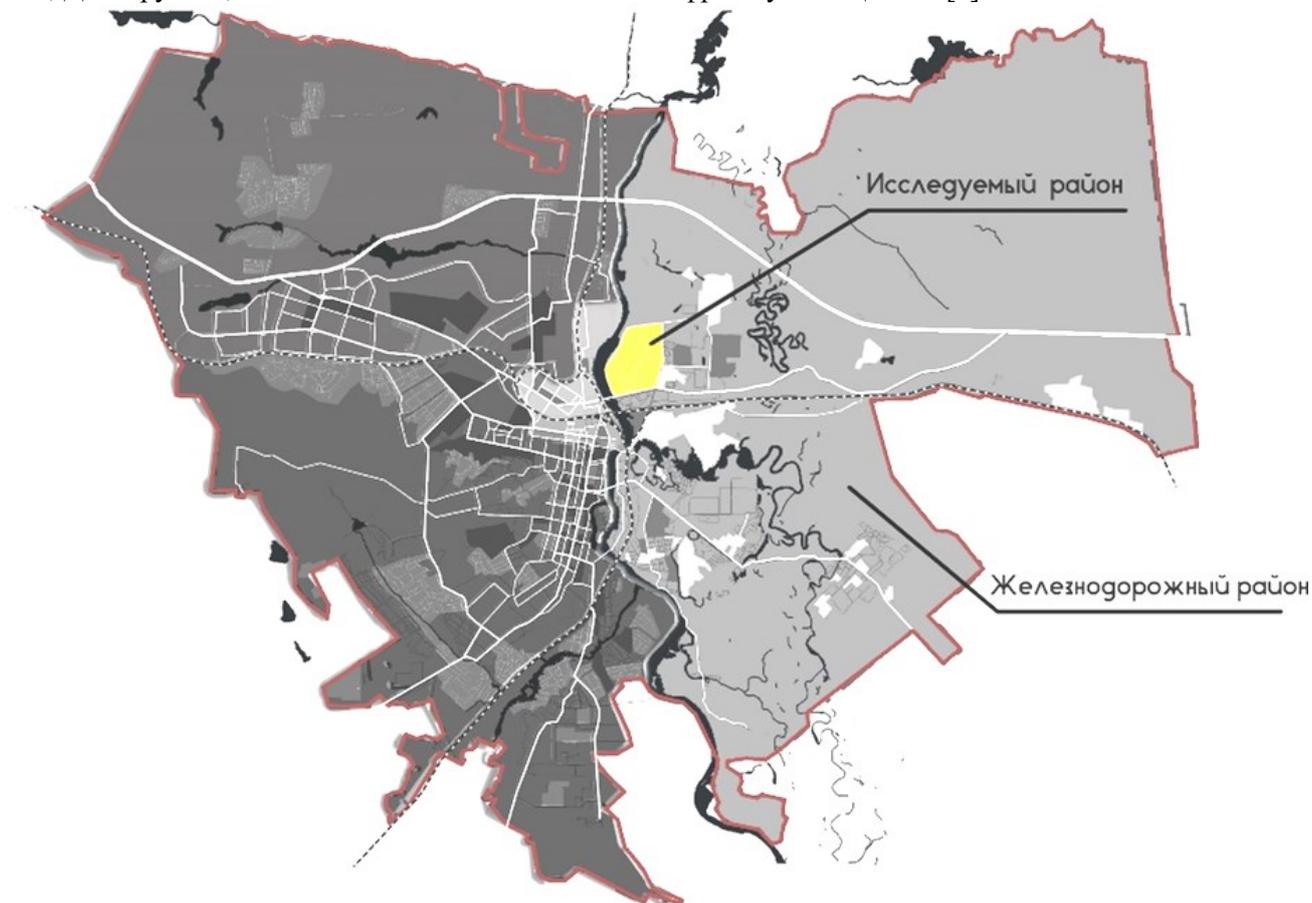


Рис. 1. Схема размещения территории в структуре города

Анализ современной градостроительной ситуации выявил отсутствие функционально-пространственной «связности» территории с застройкой района по ул. К. Цеткин, Светлая, Дружбы; низкую плотность существующей жилой застройки с высоким процентом износа; отсутствие основных функциональных центров (мест притяжения населения) и общественных пространств; неудовлетворительное состояние прибрежной зоны р. Суры (рис. 2) [10].

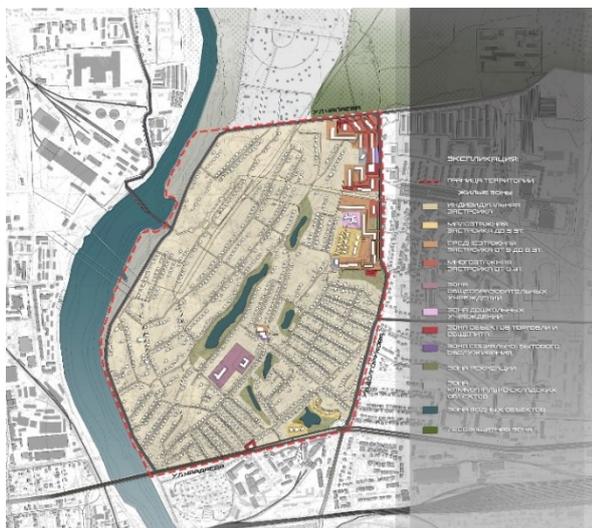


Рис. 2. Схема функционального зонирования

Анализ рельефа показал низкий перепад высот с юга на север к прибрежной части территории – р. Суры, гидрогеологические условия пониженного участка свидетельствуют о высоком уровне стояния грунтовых вод и заболоченности территории (рис. 3).



Рис. 3. Схема планировочных ограничений

Дальнейшие исследования территории определили минимальный уровень обеспеченности социально-значимыми объектами обслуживания населения, отсутствие комплексной организации транспортно-пешеходного каркаса внутри района и объектов рекреационного назначения, что

характеризует данную территорию как нерационально используемую и малопривлекательную в градостроительном отношении (рис. 4) [11].



Рис. 4. Схема размещения объектов культурно-бытового обслуживания

Структурно жилой массив «Шуист» состоит из 3 территориальных образований, объединенных между собой транспортной магистралью районного значения меридионального направления – ул. Долгорукова, которая в свою очередь примыкает к магистрали общегородского значения – ул. Чаадаева, являющейся одновременно композиционной осью широтного направления и транспортно-коммуникационным коридором, связывающим левобережье с восточной частью города (рис. 5).



Рис. 5. Схема транспортного каркаса и озеленения

Несмотря на это, в жилом районе Шуист до сих пор отсутствует активно сформированный общественный центр. Территория отличается слабой функциональной насыщенностью и ин-

тенсивностью социально-территориальных связей. Система существующего обслуживания носит «рыхлый» характер и характеризуется дисперсными включениями предприятий социального, культурного, бытового обслуживания и предприятий торговли [12]. На территории смежных районов присутствует незначительное количество торгово-административных объектов, но их доступности и возможностей удовлетворения потребностей населения на сегодняшний день недостаточно. Поэтому для комплексного развития территории важно рассматривать территорию в увязке с сопредельными участками, учитывая взаимовлияние функциональных процессов [13]. Характер размещения объектов общественного обслуживания определяется направлениями функционально-планировочных связей, их интенсивностью, что находит отражение в их пространственно-композиционной и архитектурно-ландшафтной организации [14].

В процессе исследования данной территории были проанализированы и проектные предложения ранее разработанной градостроительной документации. Согласно проектным решениям генплана г. Пензы 1973 г. намечался интенсивный выход города на правобережные территории, включая развитие жилого района Шуист в северном и северо-восточном направлении. Активное градостроительное преобразование района предусматривалось за счет значительного сноса малоэтажного жилого фонда, и как следствие, укрупнения планировочной структуры, уплотнения жилой застройки, организации общественного ядра района и его подцентров, совершенствования транспортной инфраструктуры, активного развития рекреационных территорий в прибрежной зоне р. Суры.

Развитие улично-дорожной сети включало не только реконструкцию и расширение существующих магистралей, но организацию новых транспортных направлений с учетом перспективного территориально-пространственного развития жилого района и связей его с другими городскими территориями. Улица Долгорукова проектировалась как магистраль общегородского значения, связывающая район Шуист с северным промрайоном города и другими районами правобережной части города. В исследуемом районе вдоль прибрежной части р. Суры предусматривался крупный участок общественно-парковой зоны. Жилая застройка, в свою очередь, формировалась в микрорайоны за счет активного сноса малоэтажного жилого фонда, с организацией развитой системы объектов обслуживания районного и микрорайонного значения [15, 16].

Последующие проектные предложения развития территории, отраженные в «ПДП жилого

района Шуист» в 1975 г. носили уточняющий характер. На рассматриваемой территории предполагался полный снос малоэтажной жилой застройки с формированием трех новых микрорайонов высокоплотной застройки с развитой системой социально значимых объектов обслуживания. По периметру территории намечалось размещение многоэтажных паркингов, вдоль р. Суры организовывалась парковая зона и общественные пространства.

Усиливалось транспортно-коммуникационное и композиционное значение ул. Долгорукова, которая меняла свой статус на магистраль общегородского значения с выходом на северо-восточную часть города, примыкая к федеральной трассе «М-5» Урал». Магистраль становилась главной композиционной осью района. В пересечении ул. Долгорукова – ул. К. Цеткин с учетом проектной интенсивности транспортного потока предусматривалось устройство развязки в разных уровнях. Существующие старицы р. Старая Сура активно включались в развитую систему общественных пространств, благоустраивались, функционально и композиционно связывая рекреационную зону прибрежной территории р. Суры с остальным пространством жилого района. Организация выраженных пешеходных связей предусматривала объединение перспективной жилой и общественной застройки, формируя тем самым социально-территориальные связи и функционально интенсифицируя общественное и жилое пространство района Шуист.

По материалам генплана г. Пензы 2008 г. развитие жилого района Шуист предусматривалось в северном и северо-западном направлении от проектных границ, определенных градостроительной документацией 70-х гг., с организацией общественного ядра, которое включало в себя ряд объектов социально-культурного профиля районного значения [17]. Исследуемая территория в границах улиц Чапаева, Долгорукова, Чаадаева не подвергалась существенным изменениям. Проектом сохранялась значительная часть существующей индивидуальной жилой застройки вдоль ул. Долгорукова, многоэтажная застройка в границах пересечения ул. Чапаева – К. Цеткин не находила дальнейшего развития, оставаясь в прежних границах. Общественные функции предполагалось развить в пересечениях ул. Чапаева – К. Цеткин и ул. Чаадаева с ул. Долгорукова, которая повышала свой транспортный статус до магистрали общегородского значения с непрерывным движением, запланированной еще генпланом 1973 г. и проектом детальной планировки 1975 г. (рис. 6).



Рис. 6. Фрагмент генерального плана г. Пензы 2008 г. [17]

Территории в перспективе отводился транзитный характер, поскольку организация новой общегородской магистрали правобережья направления «север-юг» по улице ул. Долгорукова, позволяла соединить северную и южную часть города с выходом на федеральную трассу М5-Урал, примыкая к ней сложной транспортной развязкой в нескольких уровнях.

Проектом предусматривалось сохранение существующих планировочных ограничений, охранного коридора ЛЭП, не предусмотренной к выносу.

Кроме того, основополагающими решениями генерального плана 2008 г., наряду с повсеместной расчисткой прибрежных территорий всех городских водотоков, являлось максимальное сохранение правобережных пойменных урочищ и урочищ пологонаклонных водораздельных плато р. Суры и ее притоков, с формированием так называемых экологических коридоров и включением их в рекреационную и природоохранную деятельность. Так, прибрежные территории р. Суры и сохранившиеся старицы русла р. Ст. Сура, расположенные в границах исследуемой территории, предлагались к расчистке пойменных участков, озеленению, благоустройству, что согласуется с основными экологическими и водоохранными требованиями. Данные мероприятия позволяли композиционно восстановить пространственную непрерывность и взаимосвязь объектов природно-рекреационного комплекса путем формирования разветвленной системы зеленых «связок», объединяющих территорию жилого района Шуист с существующими водными объектами (р. Сура, старицы р. Старая Сура) и лесным массивом, расположенным в северной части района (лесопарк «Боры»).

На границе с существующим лесопарком, расположенным севернее исследуемой территории и р. Суры, предусматривалась организация рекреационной зоны с размещением спортивного ядра (стадиона), которая позволяла органично вписать его в городской ландшафт.

Внесенные в 2019 г. изменения в генплан 2008 г, направленные в целом на выполнимые для города и реализуемые в ближайшее время перспективы, исключили организацию правобережной связующей магистрали «север-юг», лишив тем самым активно развивать в дальнейшем территорию жилого района Шуист, насыщая ее столь необходимой системой общественных пространств и объектов социальной инфраструктуры (рис. 7) [18].



Рис. 7. Фрагмент генерального плана г. Пензы 2019 г. [18]

В настоящее время исследуемая территория по-прежнему остается в нетронутом состоянии, заметно отставая в градостроительных преобразованиях от других территорий города. Градостроительные преобразования коснулись сопредельных территорий в северо-восточном направлении (территория бывшего золоотвала), развивающихся под социальное жилье и территорий, расположенных в северном направлении, примыкающих к ул. Чапаева, развитие которых осуществляется в соответствии с проектными решениями нового генплана как индивидуальная жилая застройка.

Расположение территории в структуре города, ее приближенность к въездной зоне города в западном направлении, хорошая транспортная доступность к трассе ФАД М-5 Урал обозначают

необходимость поступательных градостроительных преобразований в данном жилом районе:

– развитие планировочной структуры территории жилого района Шуист должно осуществляться комплексно, с учетом совершенствования и оптимизации функциональных и социальных процессов, характерных для данной территории; а также основных функционально-планировочных связей с городом;

– совершенствование транспортного каркаса, пешеходных связей, организации общественных пространств должно осуществляться на основе анализа взаимосвязей функциональной структуры рассматриваемой территории и сложившихся природно-рекреационных территорий;

– развитие системы общественных территорий и объектов социальной инфраструктуры должно отвечать современным требованиям формирования городской среды, что позволит функционально оживить территорию района, создав городской подцентр с развитыми социально-культурными и общественно-деловыми функциями;

– перспективное развитие жилых территорий должно осуществляться с учетом современных стандартов, предъявляемых к качеству и комфорту жилой среды, используя средовой подход в организации благоустройства жилых территорий;

– архитектурно-планировочными методами восстановить пространственную непрерывность природного комплекса путем формирования разветвленной системы зеленых «связок», объединяющих отдельные территории города с существующими лесными массивами, водными объектами;

– сохранение и развитие ландшафтно-рекреационных функций должно быть ориентировано на формирование открытых озелененных пространств, непрерывную систему зеленых насаждений, объединяющих отдельные территории жилого района Шуист с существующими лесными массивами и прибрежной зоной р. Суры;

– расположение территории в контактной зоне с главной природной осью города р. Сурой диктует необходимость расчистки и озеленения прибрежных территорий р. Суры, организации и благоустройства набережной с организацией публичных пространств;

– учитывая панорамность восприятия исследуемой территории, необходимо учесть сохранение визуальных связей правобережной и левобережной территории, а также регулирование высотных режимов и сохранение визуальных коридоров восприятия застройки.

**Выводы.** В результате проведенного исследования проанализирована существующая градостроительная ситуация, выявлены основные сдерживающие факторы в функционально-планировочном развитии жилого района Шуист, исследованы и сопоставлены проектные предложения ранее разработанной утвержденной градостроительной документации, выделены потенциальные градостроительные ресурсы для преодоления инерции в градостроительном развитии исследуемой территории.

С целью адаптивного включения в динамические процессы пространственных преобразований в масштабе всего города предложен комплекс градостроительных мероприятий, направленных на дальнейшее развитие исследуемой территории и ее потенциала в планировочной структуре города.

Таким образом, реализация приведенных выше градостроительных решений позволит не только максимально интенсифицировать использование данной городской территории в соответствии с основными аспектами, характеризующими устойчивость и комфортность городской среды, но и комплексно развить территорию жилого района, обеспечив реальную возможность достижения ее высокой социальной привлекательности и активности, и как следствие, высокой экономической эффективности и инвестиционной привлекательности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Городское планирование для руководителей городов. Программа ООН по населенным пунктам // ООН Хабитат. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <http://unhabitat.ru/publications/> (дата обращения 06.05.2022 г.).
2. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29 декабря 2004 г. №190-ФЗ (ред. 30.12.2021) // Собрание законодательства РФ. 2005. №1, ч. 1. 16 с.
3. Есаулов Г.В., Лежава И.Г., Любовный В.Я., Юсин Г.С. Градостроительная доктрина Российской Федерации. М.: Эконинформ, 2014. 30 с.
4. Voroncova O.N., Ajukasova L.K., Lekareva N.A. Typology of depressive communal areas in a Russian town // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 775. 012061. Pp. 1–5. doi: 10.1088/1757-899X/775/1/012061.
5. Перькова М.В. Пути решения проблем деградирующих территорий в г. Шебекино // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 58–63.

6. Димитренко Н.В., Литвинова Я.В. Проблема архитектурно-градостроительной организации территории въездной зоны города // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2018. №1(14). С.1 99–209.
7. Головин А. Компактный город как система управляемого развития // Уфа: взгляд в будущее: отчет о результатах рабочей сессии по стратегии развития города 2013. URL: <http://urbanbairam.ru/2013> (дата обращения 07.05.2022 г.).
8. Ахмедова Е.А., Лекарева Н.А. Градо-экономические аспекты оценки городских земель с позиций инвестиционной привлекательности // Приволжский научный журнал. 2016. № 4(40). С. 149-154.
9. Ахмедова Е.А. Современные требования к включению уплотнительной застройки в композиционно – планировочную структуру крупнейшего города // Innovative Project. 2016. Т. 1. № 1(1). С. 44–47. doi:10.17673/ip.2016.1.01.7.
10. Бобрышев Д.В., Вершинина С.Э. Интеграция прибрежных территорий в функционально-планировочную структуру города как необходимое условие их устойчивого развития // Вестник ИргТУ. 2014. №12 (95). С. 103–107.
11. Лекарева Н.А., Заславская А.Ю. Территориально-пространственные ресурсы. Градостроительные стратегии города // LAP LAMBERT Academic Publishing. 2014. 104 с.
12. Димитренко Н.В., Литвинова Я.В. Особенности градостроительного развития жилого района Кривозерье г. Пензы // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2019. №2(21). С. 192–201.
13. Лекарева Н.А., Заславская А.Ю. Комплексный подход к реконструкции жилых и промышленных зон города // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Градостроительство. Сборник статей. Изд-во СамГТУ. Самара, 2018. С. 124–128.
14. Мубаракшина М.М., Воронцова О.Н., Лекарева Н.А. Оценка качества городской среды на примере города Оренбурга // Вестник гражданских инженеров. 2020 №2(79). С. 22–28.
15. Постановление Совета Министров РСФСР от 30.11.1973 г. N 596 «О генеральном плане г. Пензы» (вместе с «Основными положениями генерального плана г. Пензы») [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения 12.05.2022 г.).
16. Попрядухин, Р.Н. Делать город не просто. Пенза.: Типография ИП Поповой М.Г. «Копи-Ризо», 2012. 300 с.
17. Решение Пензенской городской Думы от 28 марта 2008 г. N 916-44/4 «Об утверждении Генерального плана города Пензы» (с изменениями и дополнениями). URL: [https://penza-gorod.ru/line\\_of\\_activity/town-planning/urban-planning/general-plan/2009/](https://penza-gorod.ru/line_of_activity/town-planning/urban-planning/general-plan/2009/) (дата обращения 12.05.2022 г.).
18. Генеральный план города // Официальный сайт администрации города Пензы.. URL: [https://penza-gorod.ru/line\\_of\\_activity/town-planning/urban-planning/general-plan/](https://penza-gorod.ru/line_of_activity/town-planning/urban-planning/general-plan/) (дата обращения: 12.05.2022 г.).

*Информация об авторах*

**Димитренко Нина Васильевна**, старший преподаватель кафедры «Градостроительство». E-mail: [ninadim@yandex.ru](mailto:ninadim@yandex.ru). Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Россия, 440028, Пенза, ул. Г. Титова, 28.

**Обыденнова Анастасия Александровна**, магистрант кафедры «Градостроительство». E-mail: [n\\_lily\\_2007@mail.ru](mailto:n_lily_2007@mail.ru). Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Россия, 440028, Пенза, ул. Г. Титова, 28.

---

Поступила 15.05.2022 г.

© Димитренко Н.В., Обыденнова А.А., 2022

**\*Dimitrenko N.V., Obydenнова A.A.**

*Penza State University of Architecture and Construction*

*\*E-mail: [ninadim@yandex.ru](mailto:ninadim@yandex.ru)*

## URBAN DEVELOPMENT POTENTIAL OF THE SHUIST RESIDENTIAL AREA IN THE CITY OF PENZA

---

**Abstract.** *The article deals with the issue of providing means of urban planning for sustainable development of the territory of Shuist residential area in Penza. The analysis of the functional planning structure is taken into account, determining the main directions of spatial development and reconstructive measures in*

---

order to transform the spatial organization of the urban area, which ensures its comprehensive development and sustainable functioning in the city system. The tasks of the territories comprehensive development are aimed at a qualitative transformation of the urban environment, based on its functional, transport, ecological, landscape and spatial characteristics. Jointly they form a complex, interconnected system. The goal of sustainability is to maintain the positive effects of the measures taken to develop the territories. The relevance of the study topic is dictated by the necessity to transform and update previously formed planning structure, identify additional urban planning resources and activate functional processes for sustainable development of the main subsystems of the researched area and in accordance with modern requirements for urban space organization. During the research, the previously developed urban planning documentation is studied. It includes the general plans of Penza of different periods, the detailed planning project for Shuist residential area. Authors have analyzed the use intensity of the studied and adjacent territories, their mutual influence, transport and pedestrian framework that has developed in them, the social service of the territory, influence of natural landscape and environmental characteristics, which have major importance for making design decisions for the further development of the urban space. The features and potential urban resources of the studied area have been identified, recommendations are given for reorganization of the main elements of the city's planning structure in order to increase its social efficiency.

**Keywords:** territorial resources, complex territory assessment, urban planning analysis, territory intensification, residential area, urban planning potential of the territory.

## REFERENCES

1. Urban planning for city authorities. United Nations Human Settlements Program [Gorodskoe planirovanie dlya rukovoditelej gorodov. Programma OON po naselennym punktam]. UN Habitat. Adobe Acrobat Reader. URL: <http://unhabitat.ru/publications/> (date of treatment: 06.05.2022).
2. Town Planning Code of the Russian Federation dated December 29, 2004 No. 190-FZ (as amended on December 30, 2021) [Gradostroitel'nyj kodeks Rossijskoj Federacii ot 29 dekabrya 2004 g. No 190-FZ (red. 30.12.2021)]. Compendium of legislation of the Russian Federation. 2005. No. 1, vol. 1. Pp. 16. (rus)
3. Esaulov G.V., Lezhava I.G., Lyubovnyj V.YA., Yusin G.S. Urban planning doctrine of the Russian Federation [Gradostroitel'naya doktrina Rossijskoj Federacii]. Moscow. Econinform. 2014. 30 p. (rus)
4. Voroncova O.N., Ajukasova L.K., Lekareva N.A. Typology of depressive communal areas in a Russian town. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 775. 012061. Pp. 1–5. doi: 10.1088/1757-899X/775/1/012061.
5. Perkova M.V. Ways to solve the problems of degrading territories in Shebekino [Puti resheniya problem degradiruyushchih territorij v g. Shebekino]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 6. Pp. 58–63. (rus)
6. Dimitrenko N.V., Litvinova Ya.V. The problem of architectural and urban planning organization of the entrance zone territory of the city [Problema arhitekturno-gradostroitel'noj organizacii territorij v "ezdnoj zony goroda]. Education and science in the modern world. Innovations. 2018. No. 1. Pp. 199–209. (rus)
7. Golovin A. Compact city as a system of managed development [Kompaktnyj gorod kak sistema upravlyaemogo razvitiya]. Ufa: a look into the future: a report on the results of the working session on the city development strategy 2013. URL: <http://urbanbairam.ru/blog/2015/11/golovin-compact> (date of treatment: 07.05.2022).
8. Akhmedova E.A., Lekareva N.A. Urban economic aspects of land assessment from the point of investment attractiveness [Gradoekonomicheskie aspekty ocenki gorodskih zemel' s pozicij investicionnoj privlekatel'nosti]. Privolzhsky scientific journal. 2016. No. 4(40). Pp. 149–154. (rus)
9. Akhmedova E.A. Modern requirements for the inclusion of compact building in the compositional and planning structure of the largest city [Sovremennye trebovaniya k vklyucheniyu uplotnitel'noj zastrojki v kompozicionno – planirovochnuyu strukturu krupnejshego goroda]. Innovative Project. 2016. Vol. 1. No. 1(1). Pp. 44–47. (rus) doi:10.17673/ip.2016.1.01.7.
10. Bobryshev D.V., Vershinina S.E. Integration of coastal territories into functional and planning structure of the city as a necessary condition for their sustainable development [Integraciya pribrezhnyh territorij v funkcional'no-planirovochnuyu strukturu goroda kak neobhodimoe uslovie ih ustojchivogo razvitiya]. Bulletin of ISTU. 2014. No 12 (95). Pp. 103–107. (rus)
11. Lekareva N.A., Zaslavskaya A.U. Territorial-spatial resources. Urban planning strategies of the city [Territorial'no-prostranstvennyye resursy. Gradostroitel'nye strategii goroda]. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2014. 104 p.
12. Dimitrenko N.V., Litvinova Ya.V. Features of urban development of Krivozerye residential area, Penza [Osobennosti gradostroitel'nogo razvitiya zhilogo rajona Krivozer'e g. Penzy]. Education and science in the modern world. Innovations. 2019. No. 2(21). Pp. 192–201. (rus)

13. Lekareva N.A., Zaslavskaya A.U. An integrated approach to the reconstruction of residential and industrial areas of the city [Kompleksnyj podhod k rekonstrukcii zhilyh i promyshlennyh zon goroda]. Traditions and innovations in construction and architecture. Urban planning. Collection of articles ed. M.V. Shuvalov. SamGTU. Samara. 2018. Pp. 124–128. (rus)

14. Mubarakshina M.M., Vorontsova O.N., Lekareva N.A. Assessment of quality of the urban environment on the example of Orenburg city [Ocenka kachestva gorodskoj sredy na primere goroda Orenburga]. Bulletin of Civil Engineers. 2020. No. 2(79). Pp. 22–28. (rus)

15. Decree of the Council of Ministers of the RSFSR of November 30, 1973 No 596 “On the General Plan of Penza town” (with the “Basic Provisions of the General Plan of Penza town”) [Postanovlenie Soveta Ministrov RSFSR ot 30.11.1973 g. N 596 «O general'nom plane g. Penzy» (vmeste s «Osnovnymi polozheniyami general'nogo plana g. Penzy»)].

URL: <http://www.consultant.ru/> (date of treatment: 12.05.2022).

16. Popryadukhin R.N. It is not easy to build a city [Delat' gorod ne prosto]. Penza: Printing house of Popova M.G. «Copy-Rizo». 2012. 300 p. (rus)

17. Decision of Penza Town Duma dated March 28, 2008 No. 916-44/4 “On Approval of the General Plan of Penza town” (with amendments and additions) [Reshenie Penzenskoj gorodskoj Dumy ot 28 marta 2008 g. N 916-44/4 «Ob utverzhdenii General'nogo plana goroda Penzy» (s izmeneniyami i dopolneniyami)]. URL: [https://penza-gorod.ru/line\\_of\\_activity/town-planning/urban-planning/general-plan/2009/](https://penza-gorod.ru/line_of_activity/town-planning/urban-planning/general-plan/2009/) (date of treatment: 12.05.2022).

18. General plan of town. Official site of the administration of Penza. URL: [https://penza-gorod.ru/line\\_of\\_activity/town-planning/urban-planning/general-plan/](https://penza-gorod.ru/line_of_activity/town-planning/urban-planning/general-plan/) (date of treatment: 12.05.2022).

#### *Information about the authors*

**Dimitrenko, Nina V.** Senior lecturer. E-mail: [ninadim@yandex.ru](mailto:ninadim@yandex.ru). Penza State University of Architecture and Construction. Russia, 440028, Penza, German Titov str., 28.

**Obydenova, Anastasia A.** Master student. E-mail: [n\\_lily\\_2007@mail.ru](mailto:n_lily_2007@mail.ru). Penza State University of Architecture and Construction. Russia, 440028, Penza, German Titov str., 28.

*Received 15.05.2022*

#### **Для цитирования:**

Димитренко Н.В., Обыденнова А.А. Градостроительный потенциал развития жилого района Шуист в городе Пензе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 70–78. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-70-78

#### **For citation:**

Dimitrenko N.V., Obydenova A.A. Urban development potential of the shuist residential area in the city of penza. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 10. Pp. 70–78. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-70-78

# ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-79-86

\**Коновалов В.М., Мошков И.П., Федоров А.С., Гостев Н.С., Гончаров А.А.**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*\*E-mail: *konovalov52@mail.ru*

## СЖИГАНИЕ RDF-ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КИСЛОРОДНОГО ДУТЬЯ

**Аннотация.** Цементная промышленность располагает уникальными возможностями решения вопросов утилизации техногенного сырья и коммунальных отходов. Проблема использования альтернативных видов топлива в технологическом процессе производства цемента обусловлена, как правило, их низкой калорийностью. Приведенные расчеты показывают возможность использования RDF топлива в составе смешанного топлива при сжигании его в условиях повышенного содержания кислорода в воздухе. Уменьшение объема продуктов горения повышает температуру факела, что будет способствовать увеличению производительности цементной вращающейся печи. При оптимальном соотношении компонентов, смешанное топливо можно использовать как в низко - так и в высокотемпературных зонах цементных печных агрегатов. Существуют ограничения по увеличению концентрации кислорода в воздухе, обусловленные снижением действительной температуры горения топлива вследствие обратных реакций разложения продуктов горения и нарушения скоростных режимов работы суспензионных теплообменников. Кроме того, увеличение кислорода в воздухе значительно снижает тепловую эффективность клинкерного холодильника в результате увеличения объемов избыточного воздуха. Использование RDF топлива в оптимальном соотношении позволяет заменить до 42 % природного газа.

**Ключевые слова:** RDF топливо, кислород, температура горения, объем продуктов сгорания, расход газа.

**Введение.** В современном развивающемся мире уделяется значительное внимание решению задачи снижения экологической нагрузки на окружающую среду. В том числе и за счет глубокой переработки производственных отходов и вовлечения их в производственный процесс с технологиями рециклинга [1–5]. Все большую актуальность приобретает замена части основного топлива на альтернативное, производимое в процессе переработки твердых коммунальных отходов. Твердые коммунальные отходы (ТКО), это возобновляемый источник энергии, который при определенной обработке и сортировке, позволяет использовать свою химическую энергию в энергетических и иных целях, без существен-

ных ограничений. Примером такого обработанного топлива на основе ТКО является Refuse Derived Fuel или RDF – топливо [6].

**Основная часть.** RDF - топливо, производится за счет измельчения, сепарации и обезвоживания ТКО. В стадии сепарации отходов, отбирается горючая фракция с высоким теплосодержанием. В зависимости от требований заводов, RDF – топливо может быть получено в виде спрессованных брикетов или пеллет [7, 8].

Основным показателем качества RDF-топлива является его теплота сгорания, которая зависит от содержания горючих веществ. По имеющемуся химическому составу RDF-топлива (табл. 1), рассчитана теплотворная способность равная 18383 кДж/кг.

Таблица 1

### Элементный состав топлива

Состав природного газа, %							
CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	W
96,42	1,64	0,399	0,132	0,0278	0,183	1,17	0,3
Состав RDF, %							
Cp	Hp	Sp	Np	Op	Wp	Ap	Σ
43,19	6,14	0,19	0	20,47	15	15	99,99

Низкая калорийность и достаточно грубые фракции не позволяют в значительном количестве использовать такое топливо в основной форсунке, обеспечивающей высокую температуру в

зоне спекания клинкера. Поднять эксергетические показатели такого топлива, возможно за счет интенсификации его сжигания в среде обогащенной кислородом [9].

Перспективным направлением увеличения доли кислорода в воздухе служат мембранные установки. Мембранный метод основан на том, что мембрана выборочно пропускает через себя различные газы. Разделение газов на мембране достигается таким образом, что при повышенном давлении, находясь в составе воздуха, они разделяются на «быстрые» и «медленные». На поверхности и внутри мембраны создается разница в парциальных давлениях, кислород как быстрый газ успевает пройти сквозь волокно мембраны, а азот как медленный газ, накапливается и выводится отдельно, при этом движущей силой процесса является разность химических потенциалов веществ по обе стороны мембраны. Полимерная мембрана состоит из пористого волокна, с внешней стороны покрытого специальным газоразделительным слоем, толщина которого не превышает 0.1 мкм, благодаря чему обеспечивается высокая удельная проницаемость газов через полимерную мембрану. На данный момент полимерные вещества обладают высокой селективностью, что позволяет получать продуцируемый

газ с высокой степенью очистки (до 45 %) [10–12].

В настоящей работе проведены расчеты горения газообразного и RDF топлива с увеличенным содержанием кислорода в воздухе выше 21 %, которые показывают, что температура горения возрастает, за счет снижения азота в продуктах сгорания, но одновременно ускоряются обратные процессы диссоциации:  $\text{CO}_2 = \text{CO} + 1/2\text{O}_2$ ;  $\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$ , снижающие температуру горения [13, 14]. В таблице 2 приведены расчетные температуры горения с учетом диссоциации  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в зависимости от содержания кислорода в воздухе (добавка кислорода 1–10 %). Увеличение доли кислорода в воздухе более 6 % ведет к увеличению концентрации  $\text{CO}_2$  и паров воды в продуктах горения топлива и значительному ускорению эндотермических процессов их диссоциации с большими затратами тепла. В тоже время увеличение концентрации кислорода в воздухе 1–6 %, выравнивает температуры горения альтернативного топлива и природного газа и (табл. 2).

Таблица 2

#### Расчетная температура горения газа в зависимости от содержания кислорода в воздухе

Калорийность топлива, $\text{O}_2=21\%$	Содержание кислорода в воздухе, %	Температура горения, теоретическая $t_{\text{теор}}, ^\circ\text{C}$		Температура горения действительная $t_{\text{расч.}}, ^\circ\text{C}$	
		Газа $\alpha=1.1$	RDF $\alpha=1.14$	Газа $\alpha=1.1$	RDF $\alpha=1.14$
Газа $Q_p^H=36140$ RDF $Q_p^H=18380$	21	1855	1745	1804	1700
	22	1925	1763	1840	1747
	24	2048	1795	1896	1779
	27	2229	1844	1956	1870
	31	2348	1881	1943	1840

Применительно к цементной вращающейся печи производительностью 3000 т клинкера в сутки, работающей по сухому способу на природном газе, изменение содержания кислорода в

составе воздуха на горение, оказывает значительное влияние на количество избыточного воздуха из клинкерного холодильника, что снижает его тепловой к.п.д. (табл. 3).

Таблица 3

#### Объемы воздуха, отходящих газов и к.п.д. холодильника при различном содержании кислорода в воздухе (топливо газ-100 %)

Содержание $\text{O}_2$ в воздухе, %	Воздух на горение, $\text{м}^3/\text{кг}$ кл.	К.П.Д. холодильника, %	Потери тепла с избыточным воздухом, кДж/кг кл.	Температура вторичного воздуха, $^\circ\text{C}$
21	0,972	60	422	660
22	0,941	58	438	670
24	0,847	56	470	709
27	0,752	53	508	756
31	0,653	50	547	820

обогащение воздуха кислородом снижает объем продуктов горения и, соответственно, всех

отходящих газов. Это может повлиять на пропорциональное снижение скорости газовых потоков по газоходам запечного тракта. Рекомендуемые

скорости по газходам 18–24 м/с, а снижение их на 10 % (то есть до 16,2–18 м/с), может привести к «провалам» материала.

Расчетная температура факела возрастает на 36 и 92 °С при обогащении воздуха кислородом от 1 до 3 %, соответственно. Температура определяет скорость химического взаимодействия и синтез минералов в зоне обжига. В первом приближении можно воспользоваться формулой Арениуса:

$$K_{c3s} = K_0 \cdot e^{-E/RT},$$

где  $K_{c3s}$  – коэффициент скорости химической реакции;  $E$  – энергия активации процесса;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура.

С повышением температуры в зоне уменьшается время пребывания материала в зоне ( $E/R \approx 2300$ ) [15]:

$$1. e^{2300/T_1} / e^{2300/T_2} = 1,02$$

где  $T_1 = 2077$  К;

$$2. e^{2300/T_1} / e^{2300/T_3} = 1,048$$

$$T_2 = 2113 \text{ и } T_3 = 2169 \text{ К.}$$

Уменьшение продолжительности обжига в 1,02 и 1,048 раза, позволит увеличить производительность на 2,6 т/ч и 6,2 т/ч соответственно.

Повышение температуры открытого факела может отрицательно повлиять на длительность эксплуатации футеровки. Но, существуют приемы, позволяющие снизить это влияние – скажем изменением положения горелки.

Таблица 4

#### Объемы кислорода, необходимые для достижения заданных концентраций его в воздухе для горения топлива

Содержание O <sub>2</sub> в воздухе, %	Дополнительный объем O <sub>2</sub> , (м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> газа)	Дополнительный объем O <sub>2</sub> , м <sup>3</sup> /ч (расход газа 13000 м <sup>3</sup> /ч)
22	0,101	1301
24	0,277	3600
27	0,497	6460
31	0,716	9308

В таблице 4 приведены результаты расчетов потребности в дополнительном количестве кислорода для указанной выше печи, работающей на природном газе.

Таблица 5

#### Объемы продуктов горения топлива: RDF-100% и газа-100%

Вид топлива	Объем газов при содержании O <sub>2</sub> в воздухе, %									
	21		22		24		27		31	
	RDF	Газ	RDF	Газ	RDF	Газ	RDF	Газ	RDF	Газ
Кг/нм <sup>3</sup>	9,05	14,55	8,71	13,94	8,049	12,89	7,24	11,54	6,62	10,23
нм <sup>3</sup> /нм <sup>3</sup>	6,97	11,81	6,57	11,32	6,16	10,47	5,66	9,39	5,15	8,33

Если обогащенный кислородом воздух подавать в кальцинатор, где преимущественно «беспламенное» горение, то это должно интенсифицировать процесс теплообмена, и способствовать сжиганию альтернативного топлива в этом агрегате. Подача альтернативного топлива с горячего конца печи определяется его калорийностью (но не ниже 16 800 кДж/кг), и в этом случае кислородное дутье несомненно улучшит процесс его сжигания.

В случае использования альтернативного топлива, количество отходящих газов при горении топлива заметно меняется. В таблице 5 приведены суммарные объемы продуктов горения

при RDF – 100 % и газа – 100 %, при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,15$ .

Приведенные расчеты показывают, что количество продуктов горения при сжигании RDF на 40 % меньше чем при сжигании газа. Однако, учитывая, что калорийность RDF = 18383 кДж/кг, то такого топлива потребуется больше на получение 1 кг клинкера, чем газа. Из материальных балансов работы вращающейся печи сухого способа производства, рассчитанных при различных концентрациях кислорода в воздухе установлено, что различие в объемах, отходящих после декарбонизатора газов не

значительно и даже при использовании RDF несколько больше, чем на газообразном топливе. Это дает основание считать, что замена части природного газа на альтернативное топливо не изменит скоростные потоки в системе запечных теплообменников, при соблюдении температурного режима их работы. Следует учитывать то, что расчетная температура горения альтернативного топлива при нормальном содержании кислорода в воздухе – 21 % составляет 1700 °С, а для газа 1745 °С. С увеличением доли кислорода в воздухе до 24 % разница температур горения практически выравнивается, а при содержании 10 % избытка кислорода (то есть 31 % в воздухе) разница температур горения рассматриваемых топлив вновь увеличивается.

Задаваясь расчетным значением расхода тепла на обжиг клинкера – 3370 кДж/кг кл. на основании тепловых балансов можно рассчитать расход альтернативного топлива и его оптимальное соотношение. Следует оптимальным считать замену натурального топлива на RDF в количестве до 48 % в кг условного топлива. К тому же, использование RDF создает щадящие температурные условия для футеровки.

В таблице 6 приведены расчетные данные по объему отходящих газов, а также температура горения смешанного топлива, состоящего (по соотношению теплоты) из 42 % RDF и 58 % природного газа.

Таблица 6

**Объем продуктов горения и температура горения смеси (RDF+газ)  
при их оптимальном соотношении при  $\alpha=1,15$**

Продукты горения	Объем газов, м <sup>3</sup> /кг кл., при содержание O <sub>2</sub> в воздухе, %				
	21	22	24	27	31
CO <sub>2</sub>	0,1169	0,1168	0,1168	0,1168	0,1168
HO <sub>2</sub>	0,1959	0,1948	0,1932	0,1912	0,1892
O <sub>2</sub>	0,0280	0,029	0,0280	0,0248	0,0217
N <sub>2</sub>	0,8612	0,8111	0,7253	0,6325	0,5514
SO <sub>2</sub>	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Σ продуктов горения	1,2021	1,1517	1,0634	0,9654	0,8792
t горения средняя	1787	1795	1834	1862	1896

Принимая во внимание заданную производительность печи (130 т/ч), размеры газоходов между ступенями и температурные параметры отходящих газов можно рассчитать скоростные потоки газов (см. таб. 7).

Из приведенных значений следует, что с увеличением доли O<sub>2</sub> в воздухе на 1-3-6 и 10 % при

работе на газе скорость по газоходам снижается на 3-10-16 и 23,5 % соответственно с 13–20 м/с до 9–15,3 м/с при 10 % избытке O<sub>2</sub>, что может привести к «провалам» материала. Минимальная скорость для пневмотранспортирования сырья (размер частицы – 200 мкм и 2 мм) должна быть не ниже 7,5 и 15 м/с соответственно.

Таблица 7

**Скорость газовых потоков в запечных газоходах при использовании  
смеси (RDF+газ), при  $\alpha=1,15$**

Положение газохода	Диа-метр газо-хода, мм	Площадь газо-хода, м <sup>2</sup>	Темпе-ратура газов, °С	Содержание кислорода в воздухе, %				
				21	22	24	27	31
				Скорость газовых потоков, м/с				
Выход из циклонов 5,1 и 5,2	3040	7,25	350	16,6	16,4	15,3	14,2	13,3
Газоходы: между 4 – 5	3322	8,66	355	14,1	13,9	13,0	12,6	11,3
между 3 – 4	3272	8,40	525	18,5	18,2	17,1	15,9	14,8
между 2 – 3	3462	9,41	790	22,0	21,6	20,3	18,8	17,6
между 1 – 2	3662	10,52	770	19,3	19,0	17,2	16,5	15,4
Декарбонизатор – 1 циклон	3632	10,36	865	21,4	21,0	19,8	18,3	17,0

В случае использования смеси топлива с приведенным в таблице 7 соотношением при использовании атмосферного воздуха, объем газов и скорость, повышается почти на 10 % по сравнению с газообразным топливом, что по скоростям находится в допустимых значениях. При увеличении доли кислорода на 3 %, количество газов при работе на смешанном топливе приближается к объемам газов на газообразном топливе (см. табл. 6), что будет соответствовать существующему режиму работы печи. Повышение доли кислорода более 3 % нецелесообразно и с точки зрения сохранения скорости газовых потоков.

Использование альтернативного топлива позволит заменить часть природного ископаемого топлива при сохранении основных теплотехнических показателей работы печного агрегата (таблица 8).

А повышение кислорода в воздухе несомненно интенсифицирует процесс окисления органического топлива, что повысит и температуру горения и улучшит условия теплообмена. Поскольку основным фактором, определяющим скорость химической реакции, в том числе и реакции клинкерообразования, является температура, то использование кислородного дутья должно улучшить основные показатели работающей печи, в частности производительность.

Таблица 8

## Основные показатели расхода топлива при использовании RDF

Наименование	Подача RDF		Подача газа		Итого
	Главная горелка	Кальци-натор	Главная горелка	Кальци-натор	
Ввода топлива, %	40	60	38	62	
Расход газа, м <sup>3</sup> /ч			5 000	8 050	13050
Планируемый ввод RDF, кг/ч	4297	6446			10743
Расход топлива, (кг/ч), м <sup>3</sup> /ч	(10743)		13050		
Количество теплоты, ГДж/ч	184		438,1		
<b>Без ввода RDF</b>					
Расход условного топлива, кг.усл.т./ч	0	0	5 729	9 223	14952
<b>С вводом RDF</b>					
Расход топлива, тыс.(кг/ч), м <sup>3</sup> /ч	(4,3)	(6,5)	2,9	4,7	
Общий расход топлив, (кг/ч), м <sup>3</sup> /ч, [кг усл.т./ч]	(10743)		7570		[14952]
Количество теплоты, ГДж/ч	184		254,1		438,1
Расход условного топлива:					
- кг усл.т./ч	17,5	25,2	14,7	42,6	100
- %	42,7		57,3		100
Снижение объема подачи газа от существующего, %.	42				

**Вывод.** Сжигание RDF-топлива как альтернативного источника энергии в среде с повышенным содержанием кислорода в количестве 24 %, позволит снизить расход природного газа на 42 %, что обеспечит значительную экономию в статье расходов на топливо, при условии, разумеется, что RDF обойдется дешевле газа.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бушихин В.В., Полозев Г.М., Кайгородов О.Н., Федосеев О.Е. Традиционные энергоносители и альтернативное топливо // Цемент. 2013. № 1. С. 80–84.
2. Айхас К., Виноградов К.А., Корнеев В.В. Предварительное технико-экономическое обоснование организации комплексного предприятия

по подготовке отходов к захоронению в производстве цемента // Цемент Информ. 2014. № 1. С. 34–38.

3. Шубин В.И. Использование техногенных материалов, в том числе горючих отходов, в производстве цемента // Цемент Информ. 2014. № 1. С. 3–8.

4. Классен В.К., Мирошникова О.В. Зависимость активности цементного клинкера от ввода нефтяного кокса в сырьевой шлам // Техника и технология силикатов. 2017. № 4. С. 2–6.

5. Мирошникова О.В., Борисов И.Н. Использование различных горючих отходов в производстве цемента // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №7 С.71-76. DOI: 10.12737/article\_5b4f02bef029e8.04326623

6. Пронина О.С. Общие положения. Предпосылки использования ТБО в качестве топлива

// Новости теплоснабжения. 2008. № 2 (90). [Электронный ресурс]. URL: [https://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=2061](https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2061) (дата обращения: 06.09.2021)

7. Зинченко М.Г., Шапорев В.П. Технология переработки твердых бытовых отходов и осадков сточных вод в органоминеральные удобрения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №3. С. 149–152.

8. Актанбаева А.А. Брикетирование ТБО и их применение [Электронный ресурс]. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/35351> (дата обращения: 10.09.2021)

9. Гердас М., Чегно Р., Курунов И. Ф., Лингарди О., Рикеттс Д. Современный доменный процесс. Введение. М.: Металлургиздат, 2016. 280 с.

10. Дытнерский Ю. И., Брыков В.П., Каграманов Г.Г. Мембранное разделение газов. М.: Химия, 1991. 341 с.

11. Мирошниченко Ю.В., Еникеева Р.А., Кассу Е.М. Характеристика методов получения

медицинского кислорода и перспективы их использования в военном здравоохранении // Вестник Российской военно-медицинской академии. 2016. № 2(54) С. 157–163.

12. Отчет о НИР № 4400/301121 «Исследование способов построения системы одновременного получения кислорода и азота из атмосферного воздуха с использованием криогенной и мембранной технологии» (шифр «Мочес»): Под ред. д.т.н. Баркова Б.В., ответственный кандидат испанских наук. Моргун М. А. М.: ВАТУ, 2001.

13. Дубовкин Н.Ф. Справочник по углеводородным топливам и продуктам их сгорания. М.-Л., Госэнергоиздат, 1962. 288 с.

14. Казанцев Э.И. Промышленные печи. М., Металлургия., 1975. 367 с.

15. Вальберг Г.С., Глозман А.А., Швыдкий М.Я. Новые методы теплового расчета и испытаний вращающихся печей. М.: Стройиздат, 1973, 111 с.

#### Информация об авторах

**Коновалов Владимир Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: [konovalov52@mail.ru](mailto:konovalov52@mail.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Мошков Иван Петрович**, магистрант кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: [konovalov52@mail.ru](mailto:konovalov52@mail.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Федоров Александр Сергеевич**, аспирант кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: [konovalov52@mail.ru](mailto:konovalov52@mail.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Гостев Николай Сергеевич**, бакалавр кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: [konovalov52@mail.ru](mailto:konovalov52@mail.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Гончаров Александр Анатольевич**, заведующий лабораторией кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: [konovalov52@mail.ru](mailto:konovalov52@mail.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в мае 2022 г.

© Коновалов В.М., Мошков И.П., Федоров А.С., Гостев Н.С., Гончаров А.А., 2022

**\*Konovalov V.M., Moshkov I.P., Fedorov A.S., Gostev N.S., Goncharov A.A.**

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

*\*E-mail: [konovalov52@mail.ru](mailto:konovalov52@mail.ru)*

## COMBUSTION OF RDF FUEL USING OXYGEN BLAST

**Abstract.** *The cement industry has unique opportunities to address the issues of utilization of manmade raw materials and municipal waste. The problem of using alternative fuels in the technological process of cement production is usually due to their low calorie content. The above calculations show the possibility of using RDF fuel as part of a mixed fuel when it is burned under conditions of an increased oxygen content in the air. Reducing the volume of combustion products increases the temperature of the torch, which increases*

*the productivity of the cement rotary kiln, mixed fuel can be used in both low – and high-temperature zones of cement kiln units with an optimal ratio of components. There are restrictions on increasing the concentration of oxygen in the air, due to a decrease in the actual combustion temperature of the fuel due to the reverse reactions of the decomposition of combustion products and violations of the high-speed modes of operation of suspension heat exchangers. In addition, an increase in oxygen in the air significantly reduces the thermal efficiency of the clinker cooler as a result of the increase in excess air volumes. The use of RDF fuel in the optimal ratio allows replacing up to 42 % of natural gas.*

**Keywords:** RDF fuel, oxygen, combustion temperature, volume of combustion products, gas consumption.

## REFERENCES

1. Bushikhin V.V., Polozev G.M., Kaigorodov O.N., Fedoseev O.E. Traditional energy carriers and alternative fuel [Tradicionnye energonositeli i alternativnoe toplivo]. Cement. 2013. No. 1. Pp. 80–84. (rus)
2. Aikhas K., Vinogradov K.A., Korneev V.V. Preliminary feasibility study on the organization of an integrated enterprise for the preparation of waste for disposal in the production of cement [Predvaritel'noe tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie organizatsii kompleksnogo predpriyatiya po podgotovke othodov k zahoroneniyu v proizvodstve cementa]. Cement Inform. 2014. No. 1. Pp. 34–38. (rus)
3. Shubin V.I. The use of man-made materials, including combustible waste in the production of cement [Ispol'zovanie tekhnogennykh materialov, v tom chisle goryuchih othodov, v proizvodstve cementa]. Cement Inform. 2014. No. 1. Pp. 3–8.
4. Klassen V.K., Miroshnikova O.V. Dependence of the activity of cement clinker on the input of petroleum coke into the raw sludge [Zavisimost' aktivnosti cementnogo klinkera ot vvoda neftyanogo koksa v syr'evoy shlam]. Technique and technology of silicates. 2017. No. 4. Pp. 2–6. (rus)
5. Miroshnikova O.V., Borisov I.N., The use of various combustible wastes in the production of cement [Ispol'zovanie razlichnykh goryuchih othodov v proizvodstve cementa]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No.7. Pp. 71–76. DOI: 10.12737/article\_5b4f02bef029e8.04326623(rus)
6. Pronina O.S. General provisions. Prerequisites for the use of MSW as a fuel, Heat Supply News 2008. No. 2 (90). URL: [https://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=2061](https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2061) (date of treatment: 09.06.2021)
7. Zinchenko M.G., Shaporev V.P., Technology of processing solid household waste and sewage sludge into organo-mineral fertilizers [Tekhnologiya pererabotki tverdykh bytovykh othodov i osadkov stochnykh vod v organomineral'nye udobreniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2014. No. 3. Pp. 149–152. (rus)
8. Aktanbayeva A.A. Briquetting of MSW and their application URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/35351> (date of treatment: 10.09.2021)
9. Geerdas M., Chegno R., Kurunov I.F., Lingardi O., Ricketts D. Modern domain process. Introduction [Sovremennyj domennyj process]. M.: Metallurgizdat, 2016. 280 p. (rus)
10. Dytnerky Yu.I., Brykov V.P., Kagramanov G.G. Membrane separation of gases [Membrannoe razdelenie gazov]. M.: Chemistry, 1991. 341p.
11. Miroshnichenko Yu.V., Enikeeva R.A., Kassu E.M. Characteristics of methods for obtaining medical oxygen and the prospects for their use in military healthcare [Harakteristika metodov polucheniya medicinskogo kisloroda i perspektivy ih ispol'zovaniya v voennom zdavoohranenii]. Bulletin of the Russian Military Medical Academy. 2016. No. 2(54). Pp. 157–163. (rus)
12. Research report No. 4400/301121 «Investigation of ways to build a system for the simultaneous production of oxygen and nitrogen from atmospheric air using cryogenic and membrane technology» [Otchet o NIR № 4400/301121 «Issledovanie sposobov postroeniya sistemy odnovremennogo polucheniya kisloroda i azota iz atmosfernogo vozduha s ispol'zovaniem kriogennoj i membrannoj tekhnologii»]. (Code “Moches”): Ed. d.t.s. Barkova B. V., responsible Spanish Ph.D. Morgun M. A. M.: VATU, 2001. (rus)
13. Dubovkin N.F. Handbook of hydrocarbon fuels and their combustion products [Spravochnik po uglevodorodnym toplivam i produktam ih sgoraniya]. M.-L., Gosenergoizdat, 1962. 288 p. (rus)
14. Kazantsev E.I. Industrial furnaces [Promyshlennye pechi]. M.: Metallurgy., 1975. 367 p. (rus)
15. Valberg G.S., Glozman A.A., Shvydkiy M.Ya. New methods of thermal calculation and testing of rotary kilns [Novye metody teplovogo rascheta i ispytaniy vrashchayushchihnya pechej]. M.: Stroyizdat, 1973, 111p. (rus)

### Information about the authors

**Konovalov, Vladimir M.** Candidate of Technical Sciences, Associate. E-mail: konovalov52@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Moshkov, Ivan P.** Undergraduate. E-mail: konovalov52@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Fedorov, Aleksand S.** Post-graduate student. E-mail: konovalov52@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Gostev, Nikolai S.** Bachelor of the Department of Technology of Cement and Composite Materials. E-mail: konovalov52@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Goncharov, Alexander A.** Head of the Laboratory. E-mail: konovalov52@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 01.06.2022*

**Для цитирования:**

Коновалов В.М., Мошков И.П., Федоров А.С., Гостев Н.С., Гончаров А.А. Сжигание RDF-топлива с использованием кислородного дутья // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 79–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-79-86

**For citation:**

Konovalov V.M., Moshkov I.P., Fedorov A.S., Gostev N.S., Goncharov A.A. Combustion of rdf fuel using oxygen blast. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 10. Pp. 79–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-79-86

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-87-95

*\*Сиваченко Л.А., Заровчатская Е.В., Коваленко А.И.**Белорусско-Российский университет**\*E-mail: 228011@mail.ru*

## ВОЛОКОННЫЙ СПОСОБ ПОМОЛА МАТЕРИАЛОВ И ВОПРОСЫ ЕГО ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

**Аннотация.** Озвучена проблема тонкого помола материалов и показана, что по ряду характеристик существующее оборудование не отвечает современным требованиям, а новой тенденцией развития является перевод помольных аппаратов из простых орудий труда в функционально новые системы для получения продуктов с заданными свойствами. В статье описан волоконный механизм измельчения материалов и приведены варианты выполнения как собственно волокон, так и методов их плетения и образования пространственных каркасов или губок. Выполненный анализ металлических волокон, их свойств и методов получения позволяет дать оценку их возможности использования в качестве измельчительных элементов, обеспечивающих получение высоких контактных напряжений в рабочих зонах. Разработана конструкция волоконного аппарата для помола и диспергирования, которая позволяет осуществлять процесс диспергирования в непрерывном режиме и предназначена для переработки суспензий и паст. На примере помола мела в односекционной модели показана принципиальная возможность получения тонких порошков, что свидетельствует о высокой дезинтеграторной способности волоконного способа помола. Обоснованы направления практической реализации волоконного способа помола материалов и поставлены первоочередные задачи по его развитию.

**Ключевые слова:** помол, диспергирование, металлические волокна, волоконная мельница, рабочее оборудование, механизм разрушения, контактные зоны, жидкотекучие композиции.

**Введение.** Процессы тонкого и особенно сверхтонкого помола являются определяющими для развития многих современных технологий [1–3]. Для этих целей находят применение различные по конструкции, способу измельчения и условиям работы мельницы: шаровые барабаны, вибрационные, планетарные, бисерные, струйные, пружинные, электромагнитные, электрогидравлические, коллоидные, дезинтеграторы, центробежные и другие [4–8]. Давая обобщенную оценку этим и другим измельчительным механизмам, следует признать, что в целом они уже не отвечают многим требованиям, прежде всего в части материаловедения и управляемого изменения свойств перерабатываемых продуктов. Мировой тенденцией сегодня можно считать перевод помольных технологических аппаратов из простых орудий, как правило, первичных стадий преобразования вещества в функционально новый интеллектуальный вид оборудования, которые решает задачи комплексного управления свойствами перерабатываемых материалов на основе интенсификации и комплексного управления механизмами воздействия на частицы и агрегаты обрабатываемых дисперсных продуктов [4–6].

В качестве одного из новых направлений развития техники и технологии тонкого и сверхтонкого помола материала, направленного управления свойствами перерабатываемых дисперсных сред может быть использование в качестве

рабочей измельчительной гарнитуры тонких стальных (металлических) волокон, образующих путем плетения пространственных каркасов (губок), которые ввязаны с приводом перемещения и получают интенсивные механические воздействия на микроуровне. При этом исходные компоненты равномерно заполняют насыщенную волоконными элементами рабочую камеру и подвергаются множественным интенсивным механическим воздействиям с периодическим чередованием механизмов сжатия, сдвига и истирания [11, 12].

**Основная часть.** Идеология волоконного способа помола и диспергирования основана как на возможности использования взамен дорогостоящей шаровой мелкой мелющей среды, тонких стальных волокон (проволоки), так и на увеличение энергонапряженности рабочего процесса путем расширения диапазона реализуемых механизмов разрушения, уменьшения застойных зон в рабочей камере и создания условий для управляемого движения обрабатываемых компонентов между волоконными элементами. Следует отметить, что характер движения волоконной мелющей среды, в отличие от свободно движущихся тел в шаровой загрузке, является принудительным и имеет достаточно значимый диапазон изменения параметров и режимов работы: частоты и амплитуды колебаний (вибрации), величины внешнего силового воздействия, степени заполнения рабочего пространства как исходным

продуктом, так и мелющей гарнитурой, кратностью циркуляции и т.д.

Выбор металлических волокон в качестве мелющих тел нам представляется возможным вариантом замены некоторой части аппаратов с шаровой загрузкой, стоимость которой чрезвычайно высока. Следует заметить, что получение тонких волокон (проволоки) значительно проще и дешевле, чем мелких шариков. При этом шаровое измельчение относится к способу помола со свободным движением мелющих тел, что не позволяет максимально использовать потенциал измельчения по критерию энергонапряженности и, соответственно, созданию в частицах измельчаемого материала предельных контактных напряжений.

Важнейшим фактором управления закономерностями помола и диспергирования с использованием волоконных элементов является формирование на их основе мелющей среды, которая может быть получена путем определенного про-

странственного расположения, в том числе переплетения между собой металлических волокон. К этому следует добавить, что в зависимости от внешних воздействий характер контактов между волокнами может быть достаточно широк, как по видам и направлениям приложения нагрузок, так и по их величине.

Варианты единичных актов волоконного измельчения приведены на рисунке 1. Во всех случаях соседние волокна (проволочки) 1, 2 могут контактировать по своим образующим (рис. 1а и 1б), причем в одном случае по линии (рис. 1в), а во втором – в точке (рис. 1г). Характер взаимодействия в каждом отдельном случае может быть различным, например, чистое сжатие, сжатие со сдвигом, истирание и т.д. Разрушающие усилия между проволочками могут быть не только очень большими, но и достаточно эффективными для получения ультрадисперсных частиц, так как для них создаются оптимальные условия разрушения, диспергирования, механоактивации или микрогранулирования.

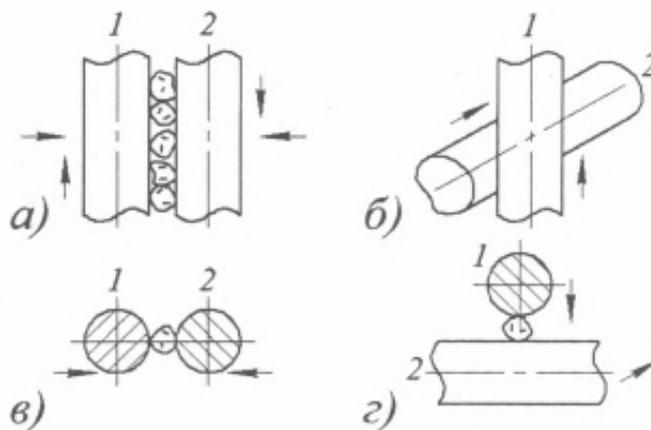


Рис. 1. Варианты единичных актов волоконного измельчения

**Волокна.** Металлические волокна, широко используемые в технике, получают различными способами [11]. Волокна из металлов и их сплавов – бериллия, вольфрама, молибдена, стали, титана и других получают различными методами. Наиболее распространенным из них является волочение, то есть деформирование металла протягиванием катаных или прессованных заготовок через фильеру меньшего сечения. Известны и другие способы получения проволоки – гидроэкструзией, электрохимическим методом, вытягиванием из расплава, осаждением из газовой фазы.

Достижимое упрочнение проволоки наклепом, как правило, быстро снимается при повышенных температурах, поэтому ведутся работы по созданию условий сохранения высокотемпературной прочности и сопротивления ползучести при высоких температурах.

В настоящее время известны способы сохранения высокотемпературной прочности и сопротивления ползучести. К таким способам относятся дисперсное упрочнение металлической матрицы тугоплавкими кислородными и бескислородными дисперсными частицами. Сравнительно недавно созданы вольфрамовые сплавы W-Hf-C и W-Hf-Re-C для получения волокон (проволоки) для армирования никелевых матриц. Упрочняющей фазой в волокнах из вольфрамового сплава является карбид гафния. Подобное упрочнение дисперсными частицами может быть осуществлено и на других металлах.

Металлические волокна обладают удовлетворительной пластичностью и в отличие от неметаллических волокон (борных, углеродных, тугоплавких соединений и других) могут деформироваться совместно с матрицей. Из них представляется возможным получать полуфабрикаты

различной конфигурации и сложные детали без разрушения армирующих волокон.

Малая дисперсия предела прочности металлических армирующих материалов позволяет с большей достоверностью выбирать состав армирующих компонентов. Кроме высоких прочностных свойств, металлические волокна (проволоки) сообщают композиционным материалам и другие важные физико-технические, технологические свойства, присущие металлическим сплавам.

Для повышения высокотемпературной прочности и жаропрочности в армирующие волокна вводят легирующие добавки, повышающие температуру начала рекристаллизации, поскольку последняя приводит к сильному разупрочнению волокон.

Влияние масштабного фактора на прочность сохраняется и при высоких температурах. Например, предел прочности вольфрамовой проволоки диаметром 0,07 мм и 0,7 мм при температуре 650 °С равен 169 и 53 кгс/мм<sup>2</sup> соответственно, а при температуре 1090 °С та же проволока при указанных диаметрах имеет предел прочности 70 и 25 кгс/мм<sup>2</sup> соответственно, то есть предел прочности в зависимости от изменения диаметра при указанных температурах снизился на 65–69 %.

Как известно, прочность и жаропрочность легированных сплавов, из которых изготавливают армирующие волокна (проволока), выше, чем указанные свойства нелегированных металлов.

Для армирования высокожаропрочных композиционных материалов используют проволоку

из вольфрама и молибдена, которые сохраняют в широком температурном интервале высокую жесткость. Модуль упругости вольфрама составляет 41 000 кгс/мм<sup>2</sup> при 20 °С, 36 800 кгс/мм<sup>2</sup> при 1000 °С и 34 700 кгс/мм<sup>2</sup> при 1400 °С. Для молибдена при температурах 20, 1000 и 1200 °С модуль упругости равен соответственно 33 400, 28 500 и 27200 кгс/мм<sup>2</sup>.

Волокна из тугоплавких сплавов обладают высокими прочностью и модулем упругости, и очень высокой жаропрочностью. Однако они имеют существенный недостаток — низкое сопротивление высокотемпературному окислению, что вызывает известные затруднения, как при получении, так и при эксплуатации армированных ими композиционных материалов.

**Способы плетения волокон.** За основу плетения металлических волокон на данном этапе нами приняты методы, используемые в текстильном производстве [12]. Основным показателем структуры трикотажных полотен являются их переплетения, которые подразделяются на главные (гладь, ластик, цепочка, трико, атлас, двухзначное), производные от главных (интерлочное, сукно, шарме, атлас суконный, атлас-шарме и другие) и рисунчатые (прессовое, жаккардовое, филейное, платированное, плюшевое, футерованное, ажурное и другие).

Ниже приводится характеристика основных видов трикотажных переплетений, которые могут быть положены в основу получения мелющей среды для волоконных мельниц (рис. 2).

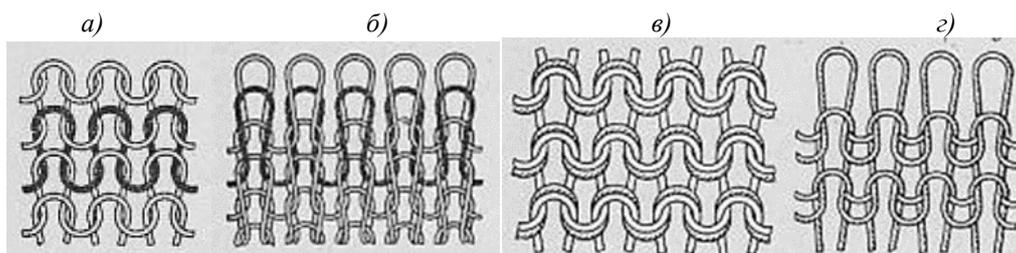


Рис. 2. Примеры основных видов плетений волокон

Гладью называются плетение по типу трикотаж, лицевая сторона которого отличается гладкой равномерной поверхностью (рис. 2, а). С лицевой стороны в петельных столбиках видны только палочки петель. На изнаночную сторону выходят петельные дуги. Полотно, полученное этим переплетением, отличается большой растяжимостью, распускаемостью и закручиваемостью по краям.

Плетение ластик в отличие от глади характеризуется закономерным чередованием лицевых и изнаночных петельных столбиков. В зависимости от их чередования на лице и изнанке ластик может быть равносторонним и разносторонним.

Полотно этого переплетения более толстым и прочным, а также менее распускаем, чем полотно переплетения гладь.

Интерлочное переплетение представляет собой двойной ластик, то есть при переплетении двух ластиков в промежутке между каждыми двумя петельными столбиками одного ластика размещается по одному петельному столбику другого ластика (рис. 2, б). В результате полотно получается значительно толще, плотнее, меньше распускается, имеет высокую прочность, хорошо сохраняет форму.

Платированное переплетение образуется прикладыванием на каждую иглу одновременно

двух и более нитей, которые могут быть разных видов (рис. 2, в). При этом одна нить образует петли лицевой стороны полотна, а другая – петли изнаночной стороны. Такое полотно имеет более красивую лицевую поверхность и в то же время большую прочность и меньше распускается при обрыве нити в петле.

Плюшевое переплетение дает возможность получить полотно из двух систем петель, из которых короткие петли образуют грунт полотна, а длинные - плюшевый застил (рис. 2, г). Если длинные петли разрезать, получится разрезной плюш. Плюш может быть гладким и рисунчатым. Петельный плюш может быть использован для более интенсивного истирания и гомогенизации [8].

Для выбора конкретного способа плетения требуется проведение дополнительных исследований с целью изучения влияния свойств металлических волокон, прежде всего, на возможность их деформации для обеспечения необходимого пространственного расположения и получения

отвечающей заданным условиям помола конструкции рабочего органа. В качестве материала для первого этапа работ может быть использован металлокорд из высокоуглеродистой стали проволоки диаметром 0,89–1,83 мм по ТУ ВУ 400074854.011-2006 или латунированная высокоуглеродистая проволока для рукавов высокого давления диаметром 0,2–0,81 мм по ТУ ВУ 400074854.020-2006, которые производятся на Белорусском металлургическом заводе (г. Жлобин).

Конкретный выбор материала волокон и способ их плетения во многом будет зависеть от конструкции волоконной мельницы.

Возможность переработки металлических волокон (проволоки) в текстильные формы позволяет упростить технологию получения композиционных материалов и деталей из них. Кроме того, позволяет сочетать в одном полуфабрикате армирующие волокна различного состава, что расширяет спектр свойств конструируемых материалов и изделий из них.



Рис. 3. Примеры выполнения волоконных губок

**Описание конструкции.** Мельница основана на использовании в качестве мелющих тел высокопрочных стальных волокон, переплетенных между собой и образующих пространственную конструкцию, при периодическом деформировании которых образуются контактные зоны между соседними волокнами, в которых при попадании измельчаемого вещества обеспечивается комплексный механизм разрушения, диспергирования и механоактивации путем сжатия, сдвига, истирания, при этом непрерывно посту-

пающий материал под действием внешних факторов проходит через конструкцию такого рабочего органа.

Выбор металлических волокон в качестве мелющих тел нам представляется возможным вариантом замены некоторой части аппаратов с шаровой загрузкой, стоимость которой чрезвычайно высока. Следует заметить, что получение тонких волокон (проволоки) значительно проще и дешевле, чем мелких шариков. При этом шаровое измельчение относится к способу помола со

свободным движением мелющих тел, что не позволяет максимально использовать потенциал измельчения по критерию энергонапряженности и, соответственно, созданию в частицах измельчаемого материала предельных контактных напряжений.

Конструктивная схема волоконной мельницы приведена на рисунке 4. Волоконный аппарат включает в себя раму 1, рабочую камеру 2 в виде цилиндрического стакана с патрубками для ввода исходного материала 3 и выгрузки обработанного продукта 4, привод, включающий электродвигатель 5, связанный через эластичную муфту 6 с рабочим оборудованием. Оборудование выполнено в виде смонтированного в опорах 7, 8 эксцентрикового вала 9, на эксцентричной части которого в опорах 10, 11 свободно установлен цилиндрический валок 12, оснащенный кольцевыми ребрами 13. Между кольцевыми ребрами 13 смонтированы рабочие секции 14, выполненные из сплетенных между собой высокопрочных стальных волокон, образующих пространственный каркас. Рабочие секции могут быть выполнены в виде кольцевых губок различного исполнения, полученных путем сплетения между собой стальных волокон подобно методам, используемым в текстильной промышленности.

Рабочий процесс аппарата волоконного осуществляется следующим образом. Включается приводной электродвигатель 5 и через муфту 6 передает крутящий момент на установленный в опорах 7, 8 цилиндрический валок 12, свободно установленный в опорах 10, 11. Через загрузочный патрубок 3 под давлением подается исходный материал, находящийся в жидкотекучем состоянии. Материал, попадая в рабочую камеру 2, подвергается интенсивному воздействию кольцевыми губками в рабочих секциях 14, находящихся между кольцевыми ребрами 13. При этом цилиндрический валок 12 совершает колебательное движение по окружности с радиусом, равным эксцентриситету эксцентрикового вала 9. Кольцевые губки могут иметь различное исполнение.

При колебаниях эксцентрикового вала 9 кольцевые губки подвергаются периодическому деформированию, что приводит к образованию зон многочисленных контактов между стальными волокнами. В таком процессе проходящий между ними исходный материал подвергается активному воздействию путем сжатия, сдвига и истирания. Обработываемый материал, последовательно проходя через рабочие секции 14, испытывает многократные силовые воздействия, что обеспечивает его эффективное диспергирование и гомогенизацию. Обработанные таким образом

суспензия, эмульсия или паста в виде готового для последующего использования продукта отводится из аппарата через патрубок для выгрузки 4. Кольцевые ребрышки 13 удерживают кольцевые губки в требуемом положении, не давая им перемещаться внутри аппарата под действием давления исходного материала, нагнетаемого насосом (условно в конструкции не приведен). Кольцевые губки полностью перекрывают сечение рабочей камеры и исключают тем самым холостые проходы исходного материала.

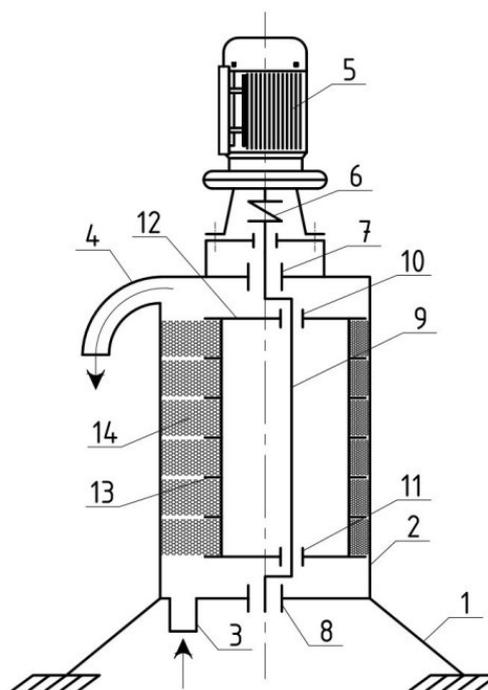


Рис. 4. Конструктивная схема волоконной мельницы с вибрационным приводом

Механизм волоконного измельчения опробован на односекционной модели при сухом перетире компонентов органических и минеральных веществ (мел, торф, пшеничная мука), и в полной мере подтверждена принципиальная возможность создания волоконных аппаратов многоцелевого назначения, которые могут быть использованы для глубокой комплексной переработки жидкотекучих композиций.

Для определения принципиальной возможности волоконного способа помола был проведен поисковый эксперимент. В качестве исходного материала использовалась навеска крупки мела с размерами частиц  $+0,5 \dots 1,0$  мм и массой 50 г, которая помещалась в плотный полиэтиленовый пакет вместе с металлической губкой, изготовленной из микроволокна, (сталь 08X18H10) размерами  $25 \times 300$  мкм. Металлическая губка с фрагментом микроволокна представлена на рис. 5. Разрушающее воздействие производилось вручную в течение трех минут с усилием 200 Н и периодичностью 2 сек с постоянным изменением

направления его приложения. Анализ полученных результатов дисперсного состава, полученного на лазерном гранулометре, приведен на рисунке 6 и показывает принципиальную возмож-

ность использования волоконного способа помола и диспергирования в различных технологических процессах тонкой переработки дисперсных материалов и сред.

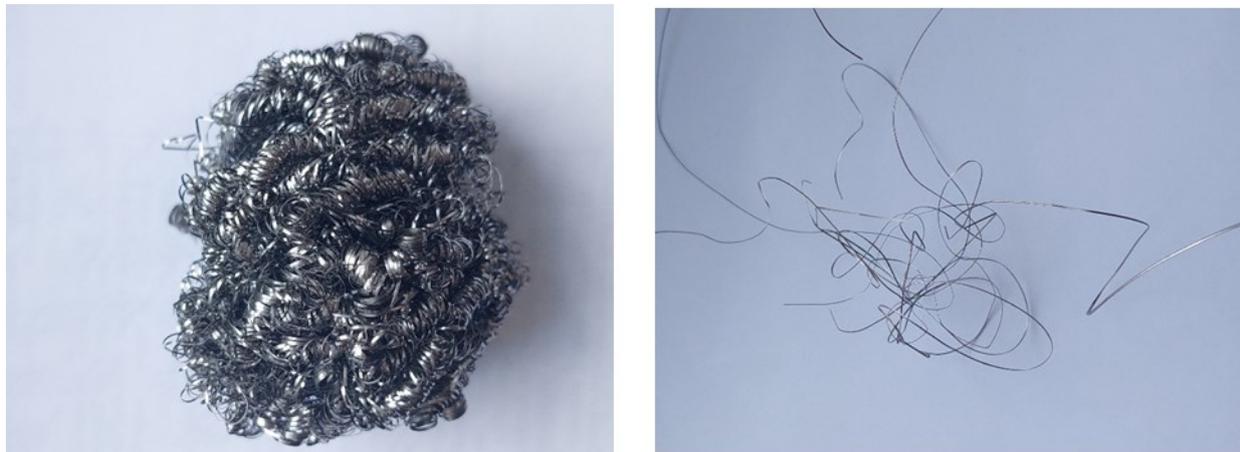


Рис. 5. Металлическая губка с фрагментом микроволокна

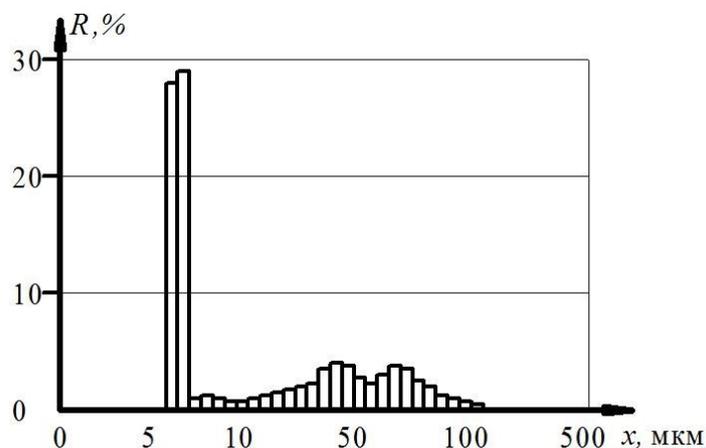


Рис. 6. Результаты дисперсного состава измельчённого мела

### Выводы.

1. Волоконный способ помола и диспергирования можно отнести к финишным стадиям технологической переработки дисперсных материалов и сред.

2. Представленная поисковая работа является первой попыткой дать предварительную оценку возможности использования волоконных металлических элементов, сплетенных определенным образом, для создания мелющей среды.

3. Предварительно установлено, что технически решение этой задачи уже сегодня можно реализовать на основе серийно выпускаемой стальной проволоки, сплетенной в различные пространственные образования. Ближайшей аналогией волоконной мельницы можно считать бисерные аппараты, по сравнению с которыми она имеет преимущества в стоимости размольной гарнитуры, большем количестве контактных зон и в значительно меньших затратах энергии на перемешивание шаровой загрузки.

В планах по развитию и апробированию волоконного механизма диспергирования первичной проблемой является выбор металлических волокон, их плетение или набору в виде прядей для образования деформационно-устойчивой пространственной структуры и её исследование как рабочего органа с целью определению технологической эффективности и эксплуатационной надёжности при работе с различными материалами и дисперсными средами.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабенко С.А., Ильин А.П., Коробочкин В.В., Семякина О.К. Порошки. Получение, свойства, анализ. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 264 с.
2. Витязь П.А., Горобцов В.Г. Высокие технологии и наноматериалы в строительной индустрии // Строительная наука. 2009. № 6. С. 4–16.
3. Ходаков Г.С. Физика измельчения. М.: Наука, 1972. 308 с.

4. Сиваченко Л.А., Заровчатская Е.В., Дыдышко И.М. Технический уровень аппаратов для тонкого и сверхтонкого помола материалов и пути их развития // Горная механика и машиностроение, Солигорск. 2022. №2. С. 28–42.
5. Сиваченко Л.А., Добровольский Ю.К. История развития и современный уровень развития техники измельчения // Вестник Белорусско-Российского университета. 2012. № 4 (37). С. 69–76.
6. Сиваченко Л.А., Сотник Л.Л., Сиваченко Т.Л., Потапов В.А., Абдукаликова Г.М., Корзун И.М., Наливко О.И., Дыдышко И.М. Интенсификация технологических процессов в аппаратах адаптивного действия. Барановичи: БарГУ, 2020. 359 с.
7. Вайтехович П.Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил. Минск: БГТУ, 2008. 320 с.
8. Сиваченко Л.А., Голушкова О.В., Шуляк В.А., Кутынка Е.И., Богатырев М.Г. Технологические аппараты адаптивного действия. Минск: Изд. центр БГУ, 2008. 375 с.
9. Ревнивцев В.И., Гапонов Г.В., Зарогатский Л.П. Селективное разрушение минералов. М.: Недра, 1988. 286 с.
10. Хайнике Г. Трибохимия. М.: Мир, 1987. 584 с.
11. Портной К.И., Салибеков С.Е., Светлов И.Л., Чубаров В.М. Структура и свойства композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1979. 255 с.
12. Ковальчук О.Я., Афанасьев Ю.Г. Изучение строения трикотажных переплетений. Бийск, 2005. 21 с.
13. Богданов В.С., Семикопенко И.А., Воронцов В.П. Дезинтеграторы. Белгород. БГТУ, 2020. 365 с.
14. Chaikina M.V., Aman S. Fracture, gridding, mechanical activation and synthesis processes in solids under mechanical action // Sci. Sinter. 2005. Vol. 37(2). Pp. 93–105.
15. Hiroshi M., Junya K., Fumio S. Scale-up method of planetary ball mill // Chem. Eng. Sci. 2004. Vol. 59(24). Pp. 5909–5916.
16. Thomas P. Development of mill drivers for the zement industry. 33-nd / EEE Cement Industry Technical Conference. May 1991. Pp. 171–189.
17. Rupf H., Faulhaber F., Schonert K., Umhauer H. Analyse der Brucherscheinungen in Glaskugeln und kreisrunden Glasscheiben. Preprints. 2. EUROP. Sympos. Zerkleinern. Amsterdam, 1996 Sec. A, B, C. Frankfurt/M. 1996. Pp. 57–96.
18. Sidor J. Wstepne badania prototypowego przemyslowego mlyna obrotowowibracyjnego do bardzo drobnego mielenia frenku glinu : [Ref.] 4 Semin. Mater. Bardzo drob. u uziarn. Wroclaw, 1992 Fizykochem. probl. mineralurg. 1992. No. 26. Pp. 57–64.

#### Информация об авторах

**Сиваченко Леонид Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры транспортные и технологические машины. E-mail: 228011@mail.ru. Белорусско-Российский университет. Беларусь, 212012, Могилев, пер. Ивана Франко, д. 7.

**Заровчатская Елена Владимировна**, старший преподаватель кафедры транспортные и технологические машины. E-mail: 2415719@gmail.com. Белорусско-Российский университет. Беларусь, 212000, Могилев, пр-т. Пушкинский, д. 18.

**Коваленко Антон Игоревич**, магистрант кафедры промышленное и гражданское строительство. E-mail: djan-ton25@gmail.com. Белорусско-Российский университет, Беларусь, 212022, Могилев, ул. Космонавтов, д. 11.

---

Поступила 07.07.2022 г.

© Сиваченко Л.А., Заровчатская Е.В., Коваленко А.И., 2022

**\*Sivachenko L.A., Zarovchatskaya E.V., Kovalenko A.I.**

*Belarusian-Russian University*

*\*E-mail: 228011@mail.ru*

## FIBER GRINDING METHOD OF MATERIALS AND ISSUES OF ITS PRACTICAL IMPLEMENTATION

---

**Abstract.** *The problem of fine grinding of materials is voiced and it is shown that for a number of characteristics the existing equipment does not meet modern requirements, and a new development trend is the transfer of grinding machines from simple tools to functionally new systems for obtaining products with desired properties. The article describes the fiber mechanism of grinding materials and provides options for*

---

performing both the fibers themselves and the methods of their weaving and the formation of spatial frameworks or sponges. The performed analysis of metal fibers, their properties and production methods makes it possible to assess their possibility of using them as grinding elements that provide high contact stresses in working areas. A design of a fiber apparatus for grinding and dispersing has been developed, which allows the dispersion process to be carried out in a continuous mode and is intended for processing suspensions and pastes. On the example of grinding chalk in a single-section model, the fundamental possibility of obtaining fine powders is shown, which indicates a high disintegrating ability of the fiber grinding method. The directions of practical implementation of the fiber method of grinding materials are substantiated and priority tasks for its development are set.

**Keywords:** grinding, dispersion, metal fibers, fiber mill, working equipment, destruction mechanism, contact zones, fluid compositions.

## REFERENCES

1. Babenko S.A., Il'in A.P., Korobochkin V.V., Semakina O.K. Powders. Obtaining, properties, analysis [Poroshki. Poluchenie, svoystva, analiz]. Tomsk: Publishing House of the Tomsk Polytechnic University, 2011. 264 p. (rus)
2. Vityaz' P.A., Gorobcov V.G. High technologies and nanomaterials in the construction industry [Vysokie tekhnologii i nanomaterialy v stroitel'noj industrii]. Construction science. 2009. No. 6. Pp. 4–16. (rus)
3. Hodakov G.S. Physics of grinding [Fizika izmel'cheniya]. M.: Nauka, 1972. 308 p. (rus)
4. Sivachenko L.A., Zarovchatskaya E.V., Dydyshko I.M. Technical level of devices for fine and superfine grinding of materials and ways of their development [Tekhnicheskij uroven' apparatov dlya tonkogo i sverhtonkogo pomola materialov i puti ih razvitiya]. Mining mechanics and engineering, Soligorsk. 2022. No. 2. Pp. 28–42. (rus)
5. Sivachenko L.A., Dobrovol'skij Yu.K. The history of development and the current level of development of grinding technology [Istoriya razvitiya i sovremennyj uroven' razvitiya tekhniki izmel'cheniya]. Bulletin of the Belarusian-Russian University. 2012. No. 4 (37). Pp. 69–76. (rus)
6. Sivachenko L.A., Sotnik L.L., Sivachenko T.L., Potapov V.A., Abdikalikova G.M., Korzun I.M., Nalivko O.I., Dydyshko I.M. Intensification of technological processes in devices of adaptive action [Intesifikaciya tekhnologicheskikh processov v apparatah adaptivnogo dejstviya]. Baranovichi: BarGU, 2020. 359 p. (rus)
7. Vajtekovich P.E. Intensification and modeling of dispersion processes in the field of inertial forces [Intensifikaciya i modelirovanie processov dispergirovaniya v pole inercionnyh sil]. Minsk: BGTU, 2008. 320 p. (rus)
8. Sivachenko L.A., Golushkova O.V., Shulyak V.A., Kutynko E.I., Bogatyrev M.G. Technological devices of adaptive action [Tekhnologicheskie apparaty adaptivnogo dejstviya]. Minsk: Izd. centr BGTU, 2008. 375 p. (rus)
9. Revnivcev V.I., Gaponov G.V., Zarogatskij L.P. Selective destruction of minerals [Selektivnoe razrushenie mineralov]. M.: Nedra, 1988. 286 p. (rus)
10. Hajnike G. Tribochemistry [Tribohimiya]. M.: Mir, 1987. 584 p.
11. Portnoj K.I., Salibekov S.E., Svetlov I.L., Chubarov V.M. Structure and properties of composite materials [Struktura i svoystva kompozicionnyh materialov]. M.: Mashinostroenie, 1979. 255 p. (rus)
12. Koval'chuk O.YA., Afanas'ev Yu.G. The study of the structure of knitted weaves [Izuchenie stroeniya trikotazhnyh perepletений]. Bijsk, 2005. 21 p. (rus)
13. Bogdanov V.S., Semikopenko I.A., Voronov V.P. Dezintegratory. Belgorod. BGTU, 2020. 365 p.
14. Chaikina M.V., Aman S. Fracture, gridding, mechanical activation and synthesis processes in solids under mechanical action. Sci. Sinter. 2005. Vol. 37(2). Pp. 93–105.
15. Hiroshi M., Junya K., Fumio S. Scale-up method of planetary ball mill. Chem. Eng. Sci. 2004. Vol. 59(24). Pp. 5909–5916.
16. Thomas P. Development of mill drivers for the zement industry. 33-nd / EEE Cement Industry Technical Conference. May 1991. Pp. 171–189.
17. Rupf H., Faulhaber F., Schonert K., Umhauer H. Analyse der Brucherscheinungen in Glaskugeln und kreisrunden Glasscheiben. Preprints. 2. EUROP. Sympos. Zerkleinern. Amsterdam, 1996 Sec. A, B, C. Frankfurt/M. 1996. Pp. 57–96.
18. Sidor J. Wstepne badania prototypowego przemyslowego mlyna obrofowowibracyjnego do bardzo drobnego mielenia frenku glinu : [Ref.] 4 Semin. Mater. Bardzo drob. u uziarn. Wroclaw, 1992 Fizykochem. probl. mineralurg. 1992 No26. Pp. 57–64.

### Information about the authors

**Sivachenko, Leonid A.** Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: 228011@mail.ru. Belarusian-Russian University. Belarus, 212012, Mogilev, per. Ivana Franko, d. 7.

**Zarovchatskaya, Elena V.** Senior Lecturer. E-mail: 2415719@gmail.com. Belarusian-Russian University. Belarus, 212000, Mogilev, Ave. Pushkinsky, 18.

**Kovalenko, Anton I.** Graduate student. E-mail: djanton25@gmail.com. Belarusian-Russian University, Belarus, 212022, Mogilev, st. Cosmonauts, 11.

---

*Received 07.07.2022*

**Для цитирования:**

Сиваченко Л.А., Заровчатская Е.В., Коваленко А.И. Волоконный способ помола материалов и вопросы его практической реализации // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 87–95. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-87-95

**For citation:**

Sivachenko L.A., Zarovchatskaya E.V., Kovalenko A.I. Fiber grinding method of materials and issues of its practical implementation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 10. Pp. 87–95. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-87-95

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-96-106

\*Дуюн И.А., Корнилов А.В., Дуюн Т.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: duyun77@mail.ru

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕЙСА PYTHON-ADAMS ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ПЛАТФОРМЫ ГЬЮ-СТЮАРТА

**Аннотация.** В статье представлена методика моделирования работы механизма параллельной структуры – роботизированной платформы Гью-Стюарта с использованием виртуального прототипа. В качестве инструментов моделирования применены программный пакет MSC Adams и высокоуровневый объектно-ориентированный язык программирования общего назначения Python. Цифровой макет, имеющий свойства параметризованной имитационной модели, построен в программном комплексе MSC Adams. Язык программирования Python использован в качестве альтернативы внутреннему командному языку Adams View для создания и итерационного изменения объектов моделирования в Adams. Предложенная реализация интерфейса Python-Adams в виде специальных процедур и функций автоматизирует выполнение вычислительного эксперимента и позволяет решать задачу оптимизации конструктивных элементов и нахождения оптимального геометрического исполнения гексапода в соответствии с выбранными критериями оптимальности посредством проведения серий экспериментов, заключающихся в последовательном многократном изменении геометрических параметров, последующей симуляции модели и анализа результатов с целью нахождения вариантов конструкции, удовлетворяющих заданным критериям. Методика опробована на примере оптимизации диаметра платформы по критерию минимизации затрачиваемых усилий при движении по заданной траектории. Представлены также результаты вычислительного эксперимента по определению динамических параметров (сил, моментов сил) в элементах конструкции при движении платформы по сложной траектории, выявлению нежелательных положений, в которых возникают пиковые нагрузки.

**Ключевые слова:** оптимизация конструкции, манипуляторы параллельной структуры, виртуальный прототип, имитационное моделирование, кинематические характеристики, платформа Гью-Стюарта.

**Введение.** В современных отраслях производства все чаще применяются механизмы, использующие параллельную кинематику. Особенностью этих механизмов является подвижное выходное звено, соединенное с неподвижным основанием несколькими кинематическими цепями, параллельно передающими движение. Одним из этапов развития механизмов параллельной структуры является создание платформы Гью-Стюарта [1], позволяющей осуществлять перемещение платформы относительно основания по шести независимым координатам с помощью приводов линейных перемещений, что послужило предпосылкой для появления нового термина “Гексапод”. Гексаподы получили в последнее время достаточно широкое распространение, в первую очередь это роботизированные подвижные платформы (РПП) с кинематическими цепями по параллельной схеме, используемые в системах позиционирования инструмента в машиностроении и медицине, в тренажерах летательных аппаратов и боевой техники, для ориентации телескопов и антенн. Перспективность применения таких механизмов определяется широким спектром возможностей для решения технических задач. РПП, построенные на основе меха-

низмов с параллельной кинематикой, могут обеспечивать следующие типы эксплуатационных задач: испытания высокотехнологичного оборудования и отдельных его компонентов; использование в качестве подвижных оснований в симуляторах для управления техникой (автомобили, самолеты, специализированная техника); создание специализированных устройств для удержания в заданном положении при движении различных приборов и исполнительных устройств. Применение механизмов с параллельной структурой достаточно эффективно реализовано в некоторых тренажерах, имитирующих процессы управления мобильными техническими средствами, где в качестве главных приводных устройств реализованы 6-ти степенные системы позиционирования (гексапод, платформа Стюарта, Hexapod, D. Stewart Platform).

Широкое применение РПП параллельной структуры обусловлено конструктивными особенностями, обеспечивающими ряд эксплуатационных преимуществ: простота элементов механизма и их сборки, высокая жесткость конструкции, малый вес и низкая металлоёмкость при сравнимой жесткости, способность манипулировать большими нагрузками, повышенная точ-

ность перемещения и позиционирования, хорошие динамические характеристики, большие скорости и ускорения, возможность простого масштабирования схемы устройства. Параллельные механизмы имеют также и недостатки: сравнительно небольшая рабочая область, наличие особых положений, в которых происходит потеря управляемости, нелинейная зависимость кинематики и динамики от точки рабочей области, сложность системы управления, возможность интерференции опор.

Эффективная реализация технических задач при использовании РПП параллельной структуры в различных областях послужила толчком для множества исследований, направленных на сохранение преимуществ при снижении или нивелировании недостатков этих механизмов [2–18]. Можно выделить следующие основные задачи, решаемые исследователями в этой области:

- проработка и оптимизация структурной компоновки, определение возможностей и условий применения определенного типоразмера для различных эксплуатационных задач при проектировании новых конструктивных исполнений [2–5];

- определение возможностей применения определенного типоразмера платформы в соответствии с граничными значениями параметров её приводных звеньев для отработки заданных геометрических параметров траектории, например, предельно допустимых перемещений исполнительного органа в заданных направлениях [6, 7];

- разработка и изучение законов управления перемещениями в приводных звеньях (электро-

цилиндрах) в соответствии с заданной траекторией перемещения конечного звена (обратная задача кинематики) [8–12];

- тестирование системы управления с целью проверки требуемых траекторий перемещения выходного звена (исполнительного устройства или перемещаемого объекта), определение точности позиционирования [13];

- кинематический, динамический и силовой анализ механизма, разработка алгоритмов определения множества достижимых положений платформы при формировании ее рабочей зоны [14–18].

Для решения указанных научных задач исследователи применяют математические модели и различные аналитические методы [2, 6–9, 14, 17, 18], физические модели и лабораторные стенды [12, 14], а также прикладные программные средства [3, 5, 10–12, 16, 19, 20], которые открывают широкие возможности исследования и моделирования кинематических и динамических параметров механизмов. Данная работа является продолжением этого направления, а в качестве прикладных программных средств предлагается использовать Python и Adams.

**Основная часть.** Объектом исследования является платформа Гью-Стюарта, представляющая собой шестиосевую конструкцию, имеющую шесть степеней свободы. Движение платформы реализуется с помощью шести телескопически связанных пар звеньев, соединенных посредством сферических шарниров с подвижной платформой и неподвижным основанием. Типовое строение платформы приведено на рис. 1, конструкция включает следующие основные компоненты: основание 1, подвижная платформа 2, электроцилиндры (ЭЦ) 3, шарниры 4.

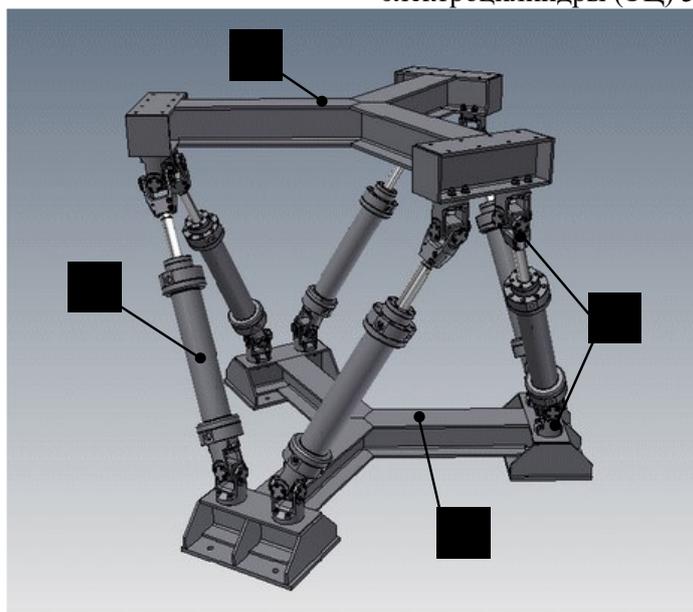


Рис. 1. Конструкция платформы Гью-Стюарта, основные механические компоненты: 1 – основание; 2 – подвижная платформа; 3 – электроцилиндры, 4 – шарниры

Исследуемая роботизированная платформа подвижности предназначена для тренажеров и симуляторов в авиационной и ракетно-космической отрасли. Технические характеристики и кинематические параметры, соответствующие функциональному назначению, представлены в

таблицах 1 и 2. Требуемые эксплуатационные параметры положены в основу при создании твердотельной модели: габаритные размеры, размеры базовых элементов, величина хода ЭЦ, расположение опор (шарниров), начальное угловое положение оси ЭЦ, пространственное положение центра масс.

Таблица 1

### Технические характеристики РПП

Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
Ширина	мм	1855
Длина	мм	1654
Высота	мм	1385
Вес	кг	550
Ход штока ЭЦ	мм	200
Полезная нагрузка	кг	987

Таблица 2

### Параметры кинематики РПП

Наименование параметра	Перемещение	Скорость	Ускорение
Продольное перемещение	-110 .. +120 мм	0,66 м/с	6,5 м/с <sup>2</sup>
Боковое перемещение	-110 .. +110 мм	0,66 м/с	6,5 м/с <sup>2</sup>
Вертикальное перемещение	-110 .. +110 мм	0,66 м/с	6,5 м/с <sup>2</sup>
Крен	-10°..+10°	38°/с	300°/с <sup>2</sup>
Тангаж	-10°..+10°	38°/с	300°/с <sup>2</sup>
Рыскание	-10°..+10°	38°/с	300°/с <sup>2</sup>

Для имитационного моделирования кинематических и динамических параметров, характеризующих эксплуатационные условия под действием рабочих нагрузок разработан виртуальный прототип роботизированной платформы, представленный на рис. 2. Цифровой макет, имеющий свойства параметризованной имитационной модели создан в программном комплексе

MSC Adams и состоит из 14 основных идеализированных элементов (деталей): основание, подвижная платформа, шесть штоков и гильз. Данные элементы соответствуют приведенным в таблицах 1 и 2 геометрическим и функциональным параметрам рассматриваемой конструкции РПП.

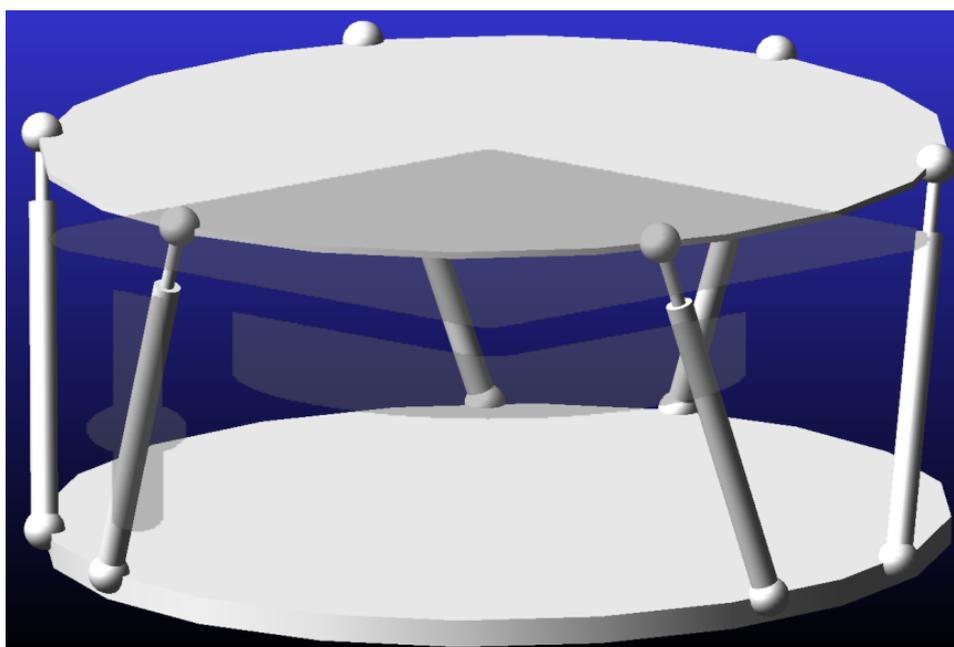


Рис. 2. Цифровая имитационная модель РПП, выполненная в MSC Adams

Для управления параметризованной моделью с возможностью ее автоматизированного перестроения в MSC Adams использовался интерфейс высокоуровневого объектно-ориентированного языка программирования общего назначения Python. Язык программирования Python применен в качестве альтернативы внутреннему командному языку Adams View для создания и итерационного изменения объектов моделирования в Adams. Интерфейс Adams Python представляет собой интерфейс прикладного программирования, который позволяет взаимодействовать с Adams, используя объектно-ориентированную структуру, в которой каждая сущность в Adams сопоставляется с классом в Python, имеющим свойства и методы.

Выбор Python обусловлен возможностью решать поставленную задачу оптимизации конструктивных элементов и нахождения оптимального геометрического исполнения гексапода в соответствии с выбранными критериями оптимальности посредством проведения серий экспериментов, заключающихся в последовательном многократном изменении геометрических параметров, последующей симуляции модели и анализа результатов с целью нахождения вариантов конструкции, удовлетворяющих заданным критериям. Использование Python позволяет автоматизировать каждый из описанных шагов вычислительного эксперимента с помощью использования специальных процедур и функций, при этом программная реализация исключает необходимость трудоемкого выполнения перечисленных манипуляций вручную. Таким образом, применение Python позволяет существенно повысить результативность проведения вычислительного эксперимента за счет замены ручных манипуляций создания и перестроения твердотельных элементов в Adams автоматизированными программными процедурами, сокращая трудоемкость, повышая произвольность процесса и количество возможных вычислительных симуляций.

Для реализации вышеописанной задачи были разработаны следующие специальные процедуры и функции:

- процедура FindPoint для определения координат точек сопряжения электроцилиндров с основанием и столом, которая задает координаты соответствующих точек в полярной системе координат;

- процедура CreateModel для создания модели гексапода в AdamsView, в которой с помощью интерфейса Adams Python вызываются необходимые процедуры для создания компонентов модели;

- процедура ChangeModel для изменения геометрических параметров модели, в которой

выполняется пересчет геометрических параметров, таких как расположение (Location) и ориентация (Orientation) для всех компонентов модели, имеющих данные свойства;

- функция Simulations (qt, number\_of\_steps, end\_time) для выполнения вычислительного эксперимента, связанного с множественными изменениями конструкции и последующими симуляциями, которая принимает на вход необходимые параметры: qt – требуемое количество симуляций, number\_of\_steps – количество шагов в симуляции, влияющее на точность и быстродействие процесса симуляции, end\_time – конечное время симуляции. В данной функции в цикле размером qt выполняются необходимые для эксперимента изменения геометрических параметров, перестроение модели (ChangeModel) и выполнение непосредственно симуляции с помощью соответствующего вызова команды интерфейса Adams Python. Функция возвращает кортеж, состоящий из трех массивов результатов, включающий амплитудные и средние значения параметра, относительно которого выполняется оптимизация, а также массив геометрических значений;

- процедура AnalisesOfRes использует выходные параметры функции Simulations для анализа результатов вычислительного эксперимента и выполнения поиска симуляций, соответствующих исследуемым геометрическим параметрам модели по заданным критериям оптимальности. Результаты анализа выводятся в командную строку Adams.

Для имитации реальных конструктивных сопряжений РПП использованы следующие специальные программные операторы приложения Adams: основание (Base) зафиксировано на Ground при помощи FixedJoint, крепление гильзы к основанию выполнено посредством SphericalJoint, аналогично сопряжены шток ЭЦ с рабочей поверхностью платформы. Для имитации движения электроцилиндра гильза и шток связаны между собой в точках контакта сопряжением TranslationalJoint. В качестве внешних сил заданы сила тяжести, направленная вертикально вниз (по направлению оси – OY) и полезная нагрузка, приложенная в точке центра масс, который задан в соответствии с требованиями проектируемого промышленного образца РПП.

В качестве имитации движения РПП в шести цилиндрических шарнирах созданы поступательные движения при помощи программного оператора TranslationJointMotion, реализующего в приложении MSC Adams установленные законы линейного перемещения. Зависимость перемещения от времени может быть задана при помощи математической функции или специальной функ-

ции STEP. Функция STEP аппроксимирует идеальную математическую кусочно-заданную функцию, но без разрывов. Синтаксис функции STEP: STEP ( $q, q_1, f_1, q_2, f_2$ ), где:  $q$  – независимая

$$\text{step}(\text{time}, t_0, l_0, t_n, l_k) \cdot l + \text{step}(\text{time}, t_n, l_k, t_m, l_p) \cdot l + \dots, \quad (1)$$

где  $\text{time}$  – независимая переменная (время);  $t_0$  – начальное значение времени для 1 участка;  $t_n$  – конечное значение времени для 1-го участка и начальное значение времени для 2-го участка;  $t_m$  – конечное значение времени для 2-го участка;  $l_0, l_k, l_p$  – начальные и конечные значения перемещения штока электроцилиндра,  $-1 \geq l_0, l_k, l_p \leq 1$ ;  $l$  – максимальное значение перемещения штока электроцилиндра.

**Результаты.** Для проверки работоспособности методики моделирования и правильности взаимодействия программных модулей первоначально был проведен тестовый вычислительный эксперимент. В качестве тестируемого рабочего движения принято вертикальное движение подвижной платформы вдоль оси  $OY$  из исходного положения. Для осуществления движения по данной траектории для каждого цилиндрического шарнира созданы поступательные движения с функцией  $\text{Motion} = 0,2 \cdot \text{Sin}(\text{time})$ , где

переменная  $q_1$  – начальное значение для  $q$ ;  $f_1$  – начальное значение для  $f$ ;  $q_2$  – конечное значение для  $q$ ;  $f_2$  – конечное значение для  $f$ .

коэффициент равный 0,2 м определяет ход штока. На рисунке 3 представлен график изменения величины выдвигания одного из штоков во времени. В качестве оптимизируемого параметра принят диаметр стола с учетом конструктивного ограничения максимального габаритного размера при постоянном диаметре основания. В качестве критерия оптимальности выбрана минимизация затрачиваемых усилий на осуществление движения. Для выбора вариантов, удовлетворяющих заданному критерию оптимальности, исследовались амплитудные и средние значения силы, возникающие в шарнирах при осуществлении движения. Для объективности анализа влияния соотношения диаметра стола к диаметру основания на развиваемые усилия в шарнирах сопряжения электроцилиндров, приняты попарно одинаковые углы пространственного расположения шарниров основания и стола, заданные в полярных координатах.

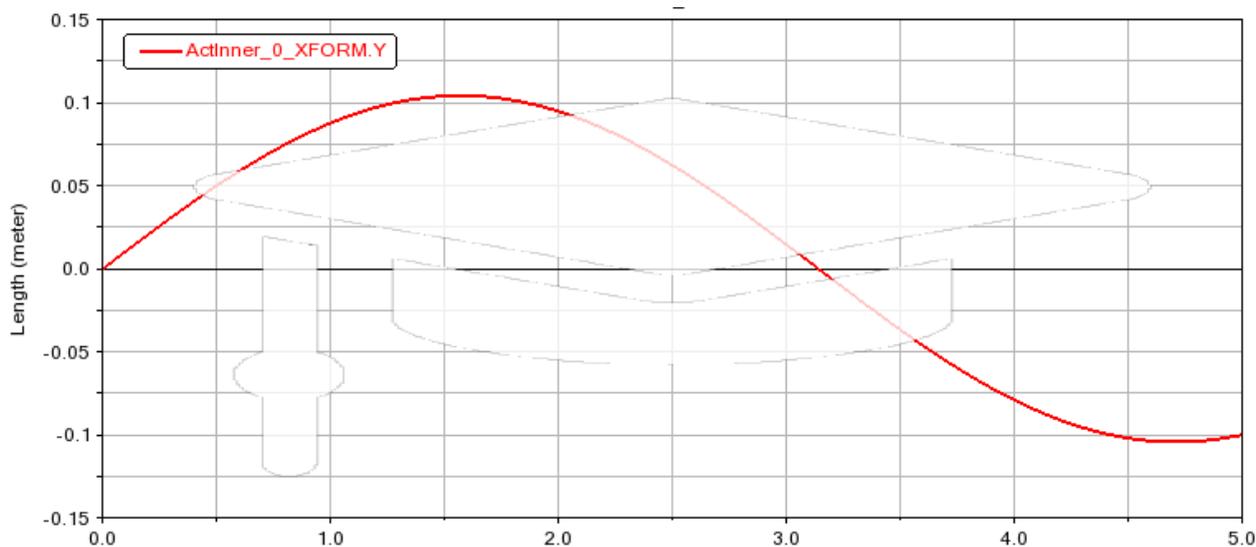


Рис. 3. График изменения величины выдвигания штока от времени, м

Таким образом, исследовалось влияние соотношения диаметра стола к диаметру основания на развиваемые усилия. Вычислительный эксперимент заключается в инициализации заданного количества симуляций, отличающихся геометрическими параметрами модели, и анализе влияния изменения этих параметров на заданный критерий оптимальности. Вычислительный эксперимент проводился при следующих условиях: диапазон изменения радиуса стола 0,25·827–1,75·827 мм, количество симуляций  $qt100$ , шаг изменения радиуса стола 8,27 мм.

На рис. 4 изображены твердотельные модели первой и последней симуляций. Время проведения вычислительного эксперимента составило 15 секунд, что является достаточно хорошим результатом, учитывая количество моделируемых случаев, следовательно, компоненты программных модулей взаимодействуют эффективно. На рис.5 представлен график изменения во времени возникающей при движении штока реакции силы в шарнире гидроцилиндра, соответствующий величине выдвигания штока рис. 3.

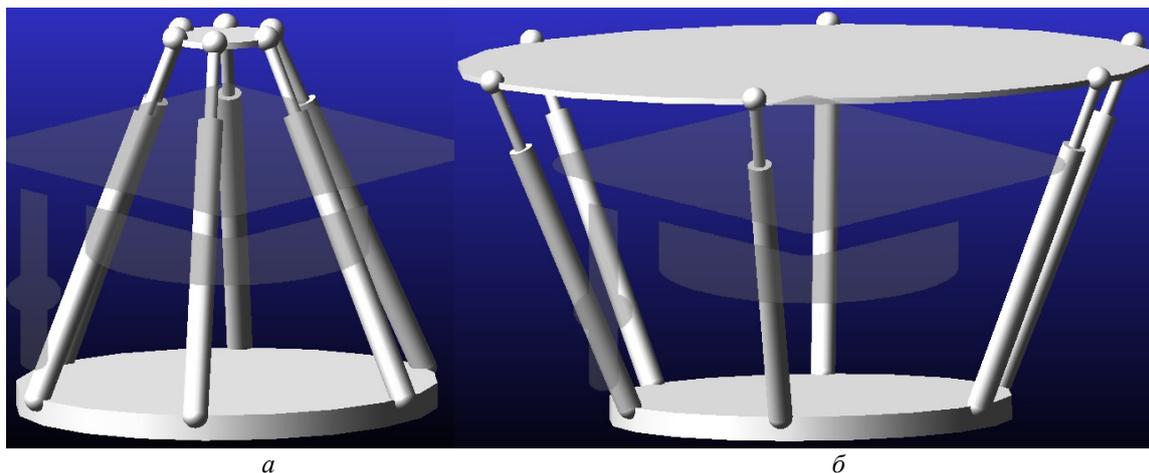


Рис. 4. Твёрдые модели вычислительного эксперимента:  
а – первая симуляция, б – последняя симуляция

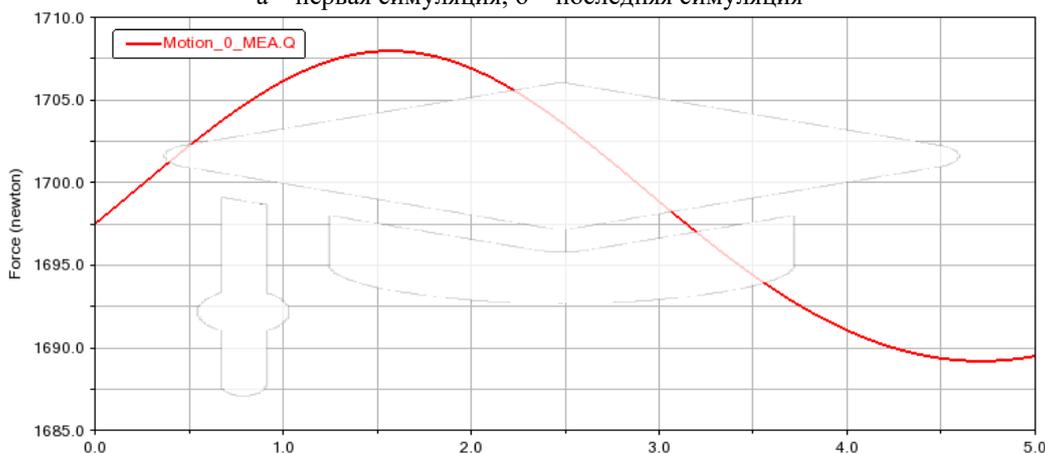


Рис. 5. График изменения возникающей реакции силы в шарнире гидроцилиндра, Н

В таблице 3 представлены результаты анализа параметров симуляций по критерию оптимальности: шесть симуляций с наименьшими значениями амплитудных сил, шесть симуляций с наименьшими значениями средних сил и для сравнения одна симуляция с наихудшими значениями амплитудных и средних сил. Как видно,

максимальные силовые параметры возникают при минимальном размере стола (диаметр 219, симуляция № 1) и достигают минимальных значений по мере приближения к размеру стола, равному основанию (диаметр 827, симуляции №50).

Таблица 3

**Результаты анализа параметров симуляций по критерию оптимальности**

№ симуляции	Радиус стола (подвижной платформы), мм	Амплитудное значение силы, Н	Среднее значение силы, Н
1	219	5347	1774
49	815	–	1613,30
50	827	3226,23	1613,20
51	839	3226,47	1613,24
52	852	3226,65	1613,30
53	864	3227,18	1613,50
54	877	3228,07	1613,90
55	889	3229,31	–

Полученные результаты соответствуют известным физическим законам и традиционным представлениям в области теоретической механики, кинематики и динамики механизмов. Следовательно, предложенная методика может ис-

пользоваться для более сложных задач, например, исследования динамических параметров (сил, моментов сил) в элементах конструкции при движении платформы по сложной траектории с приложенной полезной нагрузкой, опреде-

ления нежелательных положений, в которых возникают потери устойчивости или управляемости, пиковые нагрузки, значения которых превышают максимальные по конструктивным ограничениям. На рис. 6–8 представлены результаты определения одного из таких нежелательных положений: рисунок 6 демонстрирует состояние платформы в одном из крайних конструктивных положений, что подтверждается возникновением пиковых нагрузок в конструктивных элементах на 8 секунде отработки траектории (рис. 6, 7). Вычислительный эксперимент выполнялся по описанной выше методике взаимодействия

Python и Adams, а для нахождения рабочей зоны использовался итерационный метод. Из исходного положения платформы симулировалась сложная траектория движения в пространстве, охватывающем все конструктивно возможные положения рабочего органа. Нежелательные положения находились программно в случае возникновения ошибки симуляции, связанной с нарушением наложенных ограничений. Рабочая зона формировалась также программно путем исключения выявленных нежелательных положений из исходного пространства.

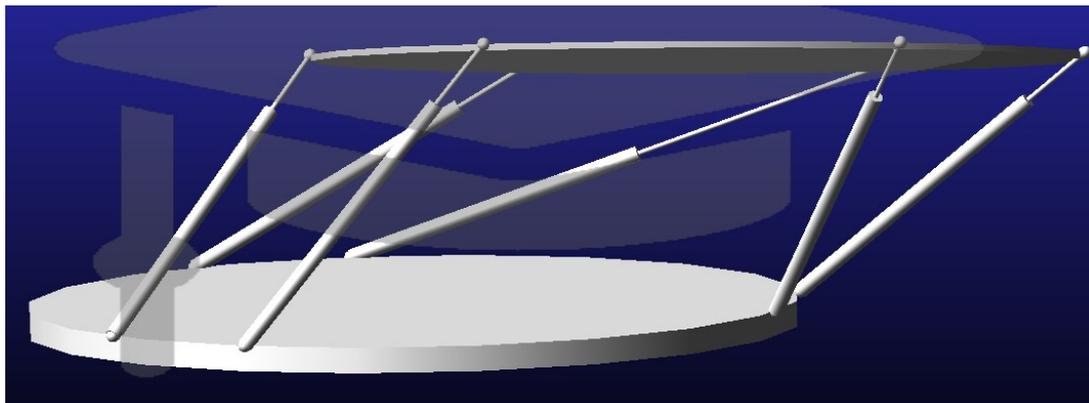


Рис. 6. Состояние платформы в момент возникновения программной ошибки (нежелательного положения)

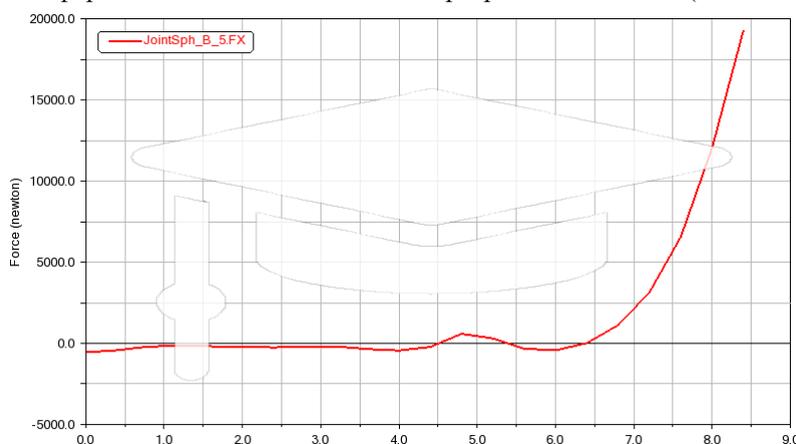


Рис. 7. Сила, возникающая в сферическом шарнире

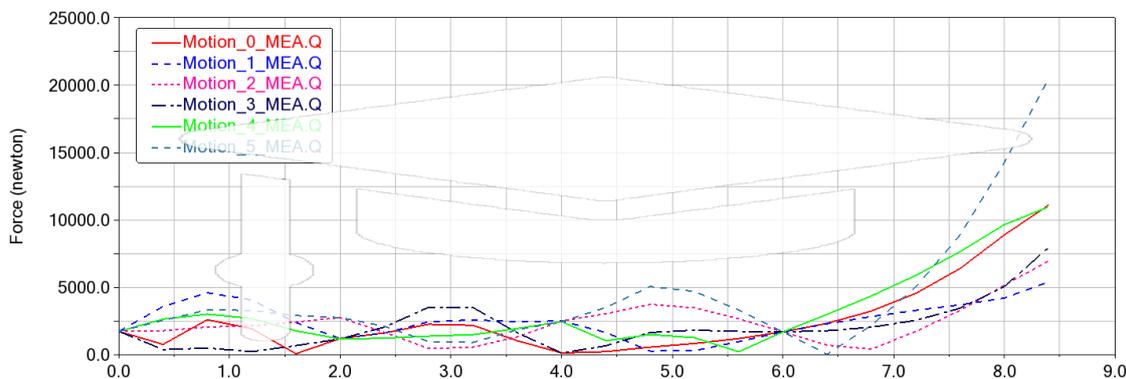


Рис. 8. Силы, возникающие в приводах актуаторов

**Выводы.** Имитационное моделирование кинематических и динамических параметров РПП посредством применения программного обеспечения MSC Adams в комбинации взаимодействия

с объектно-ориентированным языком программирования общего назначения Python, имеет следующие преимущества: позволяет анализировать

различные конструктивные исполнения, выдвигать и проверять гипотезы относительно геометрических параметров исследуемой модели, выявлять оптимальные варианты. Предложенная методика будет эффективна также при решении более сложных задач, например, определения рабочей зоны, выявления особых положений, сопровождающихся неустойчивой кинематикой и пиковыми нагрузками. Представленный подход применим в рамках разработки, модернизации, оптимизации конструктивных элементов РПП, а также разработки систем управления движением.

**Источник финансирования.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение №075-11-2021-060 от 24.06.2021 г. «Создание высокотехнологичного производства роботизированных 6DOF платформ подвижности для тренажеров и симуляторов для авиационной и ракетно-космической отрасли» (уникальный номер 000000S407521QLB0002).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gough V.E. Contribution to discussion of papers on research in automobile stability, control and tyre performance // *Proceeding of Institute of Mechanical Engineering*. 1956. Vol 57. Pp. 392–394.
2. Алюшин Ю.А., Еленев С.А., Шептунов С.А. Математическая модель движения платформы Стюарта // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2010. № 4. С. 57–67.
3. Боюнова Е.М., Палочкин С.В. Моделирование структуры механизма на базе платформы Стюарта в среде Mathcad // *Известия Орловского государственного технического университета*. Серия: Информационные системы и технологии. 2016. № 6-1. С. 70–73.
4. Лопатин А.А. Разбор механизмов с шестью степенями свободы и практического применения на примере платформы Гью-Стюарта // *Современные проблемы теории машин*. 2020. № 9. С. 33–36. doi: 10.26160/2307-342X-2020-9-33-36.
5. Волкоморов С.В., Карпенко А.П., Лелетко А.М. Оптимизация угловых и линейных размеров одно- и двухсекционного манипуляторов параллельной кинематики // *Наука и образование*. 2010. № 8. С. 1–22.
6. Леонов Г.А., Зегжда С.А., Зуев С.М. Динамика платформы Стюарта и управление ее движением // *Доклады академии наук*. 2014. Т. 458. №1. С. 36–41. doi: 10.7868/S0869565214250094
7. Воробьев А.Н., Гебель Е.С. Прямая и обратная позиционная задача платформы Гью-Стюарта с шестью степенями свободы // *Современные материалы, техника и технологии*. 2016. № 2(5). С. 69–73.
8. Кешткар С., Позняк А.С., Хернандес Э., Оропеса А. Адаптивный регулятор на скользящих режимах, основанный на «супер-твист» наблюдателе состояний с применением к регулированию платформы Стюарта // *Автоматика и телемеханика*. 2017. №7. С. 57–75.
9. Гапоненко Е.В., Чичварин А.В., Рыбак Л.А. Синтез многосвязного цифрового регулятора роботизированной виброзащитной платформой на основе Н-оптимизации // *Автоматика и телемеханика*. 2018. № 7. С. 99–116. doi: 10.31857/S000523100000269-9
10. Грешняков П.И. Совершенствование пневматической системы управления платформы Стюарта // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)*. 2016. Т. 15. № 1. С. 151–162. doi: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-151-162.
11. Сейдахмет А.Ж., Абдураимов А.Е., Камал А.Н. Использование обратной кинематики и системы Matlab для управления рычажной платформой Стюарта // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2017. № 8. С. 216–220.
12. Ермилов Г.С. Разработка систем управления тренажера на основе платформы Стюарта // *Colloquium-Journal*. 2020. № 12-1 (64). С. 11–21. doi: 10.24411/2520-6990-2020-11786.
13. Кольцов А.Г., Блохин Д.А., Хабаров А.В. Влияние кинематических характеристик платформы Стюарта на точность перемещения измерительного механизма // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2014. № 2. С. 296–299.
14. Лапиков А.Л., Пашенко В.Н. Решение прямой задачи кинематики для платформы Гью-Стюарта с использованием аналитического уравнения плоскости // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2014. № 4. С. 124–134. doi: 10.7463/0414.0706936.
15. Сопин П.К., Гайнуллина Я.Н. Разработка конструкции стенда-симулятора на основе платформы Стюарта-Гауфа // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2015. № 5(313). С. 142–145.
16. Танырбергенова К.И., Миргаликызы Т. Решение прямой и обратной задач управления кинематикой робота на примере платформы Стюарта // *Вестник казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева*. 2020. № 3(114). С. 334–341. doi: 10.52167/1609-1817-2020-114-3-334-341.
17. Туктыбаева А.Е. Силовой анализ платформы Стюарта // *Актуальные научные исследования в современном мире*. 2017. № 4-4(24). С. 82–88.

18. Войнов И.В., Телегин А.И., Тимофеев Д.Н. Векторный и скалярный виды уравнений для решения задач динамики платформы Стюарта // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2016. Т. 16. № 4. С. 19–28. doi: 10.14529/ctcr160403.

19. Дуюн И.А., Чуев К.В. Оценка эффективности работы гибких производственных систем и

роботизированных комплексов с использованием имитационного моделирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 4. С. 91–100. doi: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-91-100.

20. Чуев К.В., Дуюн И.А. Моделирование кинематических и динамических характеристик робота-манипулятора с использованием виртуального прототипа // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 95–104. doi: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-95-104.

#### Информация об авторах

**Дуюн Иван Александрович**, студент кафедры технической кибернетики. E-mail: duyun77@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Корнилов Андрей Викторович**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой физики. E-mail: f@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Дуюн Татьяна Александровна**, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения. E-mail: tanduun@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 07.04.2022 г.

© Дуюн И.А., Корнилов А.В., Дуюн Т.А., 2022

**\*Duyun I.A., Kornilov A.V., Duyun T.A.**

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

*\*E-mail: duyun77@mail.ru*

## EVALUATION OF KINEMATIC AND DYNAMIC PARAMETERS OF THE GOUGH-STEWART PLATFORM USING A VIRTUAL PROTOTYPE

**Abstract.** *The article presents a technique for modeling the operation of the parallel structure mechanism – the Gough-Stewart robotic platform using a virtual prototype. The MSC Adams software package and the high-level general-purpose object-oriented programming language Python are used as modeling tools. The digital layout, which has the properties of a parameterized simulation model, is built in the MSC Adams software package. The Python programming language is used as an alternative to the Adams View internal command language for creating and iteratively modifying modeling objects in Adams. The proposed implementation of the Python-Adams interface in the form of special procedures and functions automates the execution of a computational experiment. In addition, it allows solving the problem of optimizing structural elements, to find the optimal geometric design of the hexapod in accordance with the selected optimality criteria by conducting a series of experiments consisting in sequential multiple changes in geometric parameters, followed by simulation model and analysis of the results in order to find design options that meet the specified criteria. The technique is tested on the example of optimizing the diameter of the platform according to the criterion of minimizing the effort expended when moving along a given trajectory. The results of a computational experiment are also presented to determine the dynamic parameters (forces, moments of forces) in the structural elements when the platform moves along a complex trajectory, to identify undesirable positions in which peak loads occur.*

**Keywords:** *design optimization, parallel structure manipulators, virtual prototype, simulation modeling, kinematic characteristics, Gough-Stewart platform.*

### REFERENCES

1. Gough V.E. Contribution to discussion of papers on research in automobile stability, control and tyre performance. Proceeding of Institute of Mechanical Engineering 1956. Vol 57. Pp. 392–394.

2. Alyushin Yu.A., Elenev S.A., Sheptunov S.A. Mathematical model of Stewart platform motion [Matematicheskaya model' dvizheniya platformy Styuarta]. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2010. No. 4. Pp. 57–67. (rus)

3. Boyunova E.M., Palochkin S.V. Modeling the mechanism structure based on the Stewart platform in the Mathcad environment [Modelirovanie struktury mekhanizma na baze platformy Styuarta v srede Mathcad]. News of the Oryol State Technical University. Series: Information systems and technologies. 2016. No. 6-1. Pp. 70–73. (rus)
4. Lopatin A.A. Parsing of mechanisms with six degrees of freedom and practical application on the example of the Gew-Stewart platform [Razbor mekhanizmov s shest'yu stepenyami svobody i prakticheskogo primeneniya na primere platformy G'yu-Styuarta]. Modern problems of machine theory. 2020. No. 9. Pp. 33–36. doi: 10.26160/2307-342X-2020-9-33-36. (rus)
5. Volkomorov S. V., Karpenko A. P., Leletko A. M. Optimization of angular and linear dimensions of one- and two-section manipulators of parallel kinematics [Optimizaciya uglovyh i linejnyh razmerov odno- i dvuhsekcionnogo manipulyatorov paralel'noj kinematiki]. Science and education. 2010. No. 8. Pp. 1–22. (rus)
6. Leonov G.A., Zegzhda S.A., Zuev S.M. Dynamics and control of the Stewart platform [Dinamika platformy Styuarta i upravlenie ee dvizheniem]. Doklady Physics. 2014. Vol. 458. No. 1. Pp. 36–41. doi: 10.7868/S0869565214250094. (rus)
7. Vorob'ev A.N., Gebel' E.S. Direct and inverse positional problem of the Hugh-Stewart platform with six degrees of freedom [Pryamaya i obratnaya pozicionnaya zadacha platformy G'yu-Styuarta s shest'yu stepenyami svobody]. Modern materials, equipment and technologies. 2016. No. 2(5). Pp. 69–73. (rus)
8. Keshtkar S., Poznyak A.S., Hernandez E., Oropeza A. Adaptive sliding-mode controller based on the "super-twist" state observer for control of the Stewart platform [Adaptivnyj regulyator na skol'zyashchih rezhimah, osnovannyj na «super-twist» nablyudatele sostoyanij s primeneniem k regulirovaniyu platformy Styuarta]. Automation and Remote Control. 2017. No. 7. Pp. 57–74. (rus)
9. Gaponenko E.V., Chichvarin A.V., Rybak L.A. Synthesis of a multi-connected digital controller for a robotized vibration isolation platform based on H-optimization [Sintez mnogosvyaznogo cifrovogo regulyatora robotizirovannoj vibrozashchitnoj platformoj na osnove N-optimizacii]. Automation and telemechanics. 2018. No. 7. Pp. 99–116. doi: 10.31857/S000523100000269-9. (rus)
10. Greshnyakov P.I. Stewart platform pneumatic control system development and characteristic research [Sovershenstvovanie pnevmaticheskoy sistemy upravleniya platformy Styuarta]. Bulletin of the Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev (National Research University). 2016. Vol. 15. No. 1. Pp. 151–162. doi: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-151-162. (rus)
11. Seydakhmet A.Z., Abduraimov A.E., Kamal A.N. Using the inverse kinematics and the matlab system for controlling the Stewart platform [Ispol'zovanie obratnoj kinematiki i sistemy Matlab dlya upravleniya rychazhnoj platformoj Styuarta]. International journal of applied and fundamental research. 2017. No. 8. Pp. 216–220. (rus)
12. Ermilov G.S. Development of simulator management systems based on the Stewart platform [Razrabotka sistem upravleniya trenazhera na osnove platformy Styuarta]. Colloquium-Journal. 2020. No. 12-1 (64). Pp. 11–21. doi: 10.24411/2520-6990-2020-11786. (rus)
13. Kolcov A.G., Blohin D.A., Habarov A.V. Influence of the kinematic characteristics of the Stewart platform on the accuracy of movement of the measuring mechanism [Vliyanie kinematicheskikh harakteristik platformy Styuarta na tochnost' peremeshcheniya izmeritel'nogo mekhanizma]. Dynamics of systems, mechanisms and machines. 2014. No. 2. Pp. 296–299. (rus)
14. Lapikov A.L., Pashchenko V.N. Solution of the direct problem of kinematics for the platform Hugh-Stewart using the analytical equation of the plane [Reshenie pryamoj zadachi kinematiki dlya platformy G'yu-Styuarta s ispol'zovaniem analiticheskogo uravneniya ploskosti]. Science and education: scientific edition of MSTU im. N.E. Bauman. 2014. No. 4. Pp. 124–134. doi: 10.7463/0414.0706936. (rus)
15. Sopin P.K., Gaynullina Ya.N. Design booth-simulation based on the Stewart-Gough platform [Razrabotka konstrukcii stenda-simulyatora na osnove platformy Styuarta-Gaufa]. Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2015. No. 5(313). Pp. 142–145. (rus)
16. Tanyrbergenova K.I., Mirgalikyzy T. Solution of direct and inverse problems of robot kinematics control on the example of Stuart's platform [Reshenie pryamoj i obratnoj zadach upravleniya kinematikoj robota na primere platformy Styuarta]. Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications. M. Tynyshpaeva. 2020. No 3(114). Pp. 334–341. doi: 10.52167/1609-1817-2020-114-3-334-341. (rus)
17. Tuktybaeva A.E. Force analysis of the Stewart platform [Silovoj analiz platformy Styuarta]. Actual scientific research in the modern world. 2017. No. 4-4(24). Pp. 82–88. (rus)
18. Voynov I.V., Telegin A.I., Timofeev D.N. Vector and scalar equations types to solve problems of the dynamics of the Stewart platform [Vektornyj i skalyarnyj vidy uravnenij dlya resheniya zadach dinamiki platformy Styuarta]. Bulletin of the South

Ural State University. Series: computer technology, control, radio electronics. 2016. Vol. 16. No. 4. Pp. 19–28. doi: 10.14529/ctcr160403. (rus)

19. Duyun I.A., Chuev K.V. Estimation of the efficiency of flexible production systems and robotic complexes using simulation [Oценка effektivnosti raboty gibkikh proizvodstvennykh sistem i robotizirovannykh kompleksov s ispol'zovaniem imitacionnogo modelirovaniya]. Bulletin of BSTU named after

V.G. Shukhov. 2021. Vol. 6. No. 4. Pp. 91–100. doi: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-91-100. (rus)

20. Chuev K.V., Duyun I.A. Simulation of kinematic and dynamic characteristics of a robot manipulator using a virtual prototype [Modelirovanie kinematicheskikh i dinamicheskikh harakteristik robota-manipulyatora s ispol'zovaniem virtual'nogo prototipa]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. Vol. 6. No. 5. Pp. 95–104. doi: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-95-104. (rus)

#### *Information about the authors*

**Duyun, Ivan A.** Student. E-mail: duyun77@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Kornilov, Andrey V.** Candidate of Engineering Sciences. E-mail: f@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Duyun, Tatyana A.** Doctor of Engineering Sciences. E-mail: tanduun@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 07.04.2022*

#### **Для цитирования:**

Дуюн И.А., Корнилов А.В., Дуюн Т.А. Применение интерфейса Python-Adams для моделирования работы платформы Гью-Стюарта // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 96–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-96-106

#### **For citation:**

Duyun I.A., Kornilov A.V., Duyun T.A. Evaluation of kinematic and dynamic parameters of the gough-stewart platform using a virtual prototype. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 10. Pp. 96–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-96-106

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-107-114

*\*Рязанцев В.Г., Герасимов М.Д., Любимый Н.С., Польшин А.А., Тихонов А.А.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
\*E-mail: vladeslav390@gmail.com*

## ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ ВИБРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ГЕНЕРИРОВАНИЯ АСИММЕТРИЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ

**Аннотация.** Вибрационные устройства занимают большой кластер в строительной и дорожно-строительной индустрии. Усовершенствование всех вибрационных машин начинается, прежде всего, с вибрационного устройства, как основного рабочего органа машины. В основном, в качестве вибрационных устройств для всей дорожно-строительной техники рабочим органом выступал вибратор. Изначально, использовались вибраторы с круговыми колебаниями, которые не настолько эффективны и не всегда достаточны для выполнения специальных работ по погружению свай в грунт и также извлечению их из почвы. Вибрационные установки с асимметричными колебаниями все чаще начали находить своё применение в строительном производстве. К примеру, при забивке свай используют копровые установки. Их принцип работы аналогичен по своему действию работе вибрационной установке с асимметричными колебаниями. Однако, вибрационная установка с асимметричными колебаниями при повороте направления действия вынуждающей силы в противоположном направлении, не вниз, а вверх, позволяет также извлекать из грунта отработавшие свой срок сваи и шпунты. Исходя из выше перечисленного, мы предлагаем описание, методику расчетов оптимальных значений коэффициента асимметрии, вынуждающей силы и излагаем принцип работы физической модели вибрационной установки с двумя ступенями генерирования асимметричных колебаний, состоящей из типового вибрационного оборудования: первая ступень: стол марки ЭВ-341 и вторая ступень: вибратор направленных колебаний марки ИВ-99Б, выпускаемых «ООО Ярославский завод «Красный маяк».

**Ключевые слова:** вибратор, вибростол, колебания круговые, направленные, асимметричные, коэффициент асимметрии.

**Введение.** Конструкции вибрационных устройств с асимметричными колебаниями уже достаточно широко освещаются в технической литературе и периодических технических изданиях [1–5]. В общем случае, простое вибрационное устройство с асимметричными колебаниями представляет собой два последовательно установленных вибратора с направленными колебаниями, образующими единый механизм. Каждый, из двух, вибраторов имеет свою неуравновешенную массу дебаланса,  $m_1$  и  $m_2$ , и эксцентриситет,  $r_1$  и  $r_2$ . Угловые скорости дебалансных валов первого и второго вибратора находятся в соотношении  $\omega_2 = 2 \cdot \omega_1$ . В технической литературе, однако, не в полной мере освещены вопросы натуральных экспериментальных исследований. Имеются некоторые публикации [6–7], относящиеся к экспериментальным исследованиям асимметричных колебаний, проведенные на лабораторном оборудовании. Внедрение вибрационных устройств с асимметричными колебаниями в конструкции строительных и дорожно-строительных машин является сложным техническим и психологическим процессом. Поэтому, представляет интерес проведение экспериментальных исследований получения асимметричных колебаний на штатном вибрационном оборудовании, выпускаемом как отечественными, так и зарубежными промышленными предприятиями.

**Материалы и методы.** Попытки по реализации вибрационных установок с асимметричными колебаниями предпринимались ранее рядом инженеров и исследователей. Эти результаты нашли отражение в ряде работ [3–6]. В настоящее время идут процессы формирования методики расчёта и проектирования вибрационных устройств с асимметричными колебаниями. Также, продолжается формирование терминов и определений, относящихся к вибрационным устройствам с асимметричными колебаниями. Некоторые исследования интересны тем, что в них полученные результаты и рекомендуемые параметры колебаний не формулируют поставленную задачу получения асимметричных колебаний, но подразумевают получение несимметричных колебаний, которые также могут называться асимметричными. В научных работах [1, 2] ещё не вводится численного значения параметра, которым можно оценивать величину соотношения составляющих максимальной вынуждающей силы, действующей в одном, например, положительном, направлении ( $+F_{max}$ ) и в противоположном, например, отрицательном направлении ( $-F_{max}$ ). В трудах [4–6] четко дано определение, характеризующее величину несимметрии вынуждающей силы, которая называется коэффициентом динамичности вибрационной установки ( $k_d$ ) или коэффициент асимметрии вынуждающей силы ( $k_a$ ), при этом:

$$k_d = k_a = \frac{+F_{max}}{|-F_{max}|} \geq 1,0 \quad (1)$$

Равенство  $k_d = 1,0$  характерно для равнонаправленных, симметричных относительно нейтральной линии, колебаний.

**Основная часть.** Практика проектирования, создания и выпуска промышленных вибраторов имеет несколько вариантов и образцов вибрационных устройств с направленными, симметричными, колебаниями. Особый интерес представ-

ляет создание условий получения, генерирования, асимметричных колебаний с использованием штатного вибрационного оборудования с направленными колебаниями.

В качестве штатного вибрационного оборудования экспериментальной установки для получения асимметричных колебаний приняты: нижняя, первая, ступень – вибрационный стол марки ЭВ-341, укомплектованный двумя вибраторами ИВ-05-50 и верхняя, вторая, – вибратор марки ИВ-99Б ООО Ярославский завод «Красный маяк». (табл. 1) и (табл. 2).

Таблица 1

Технические характеристики вибростола ЭВ-341 [8]

Наименование показателей, единицы измерения	Значение
Амплитуда колебаний (расчетная), мм	0,2...0,4
Грузоподъемность (max), кг	150
Частота колебаний, мин <sup>-1</sup>	3000
Мощность потребляемая, кВт	1,0
Тип вибратора	ИВ-05-50
Количество вибраторов, шт	2
Мощность потребляемая вибратором, кВт	0,5
Напряжение вибратора, В	380, 42, 220
Частота тока вибратора, Гц	50
Габаритные размеры вибратора, мм	
Длина	730
Ширина	480
Высота	720
Масса вибростола, кг	145

Таблица 2

Паспортные значения параметров вибраторов ИВ-05-50 и ИВ-99Б [9]

Наименование показателей	Значение	
	ИВ-05-50	ИВ-99Б
Частота колебаний, Гц (кол/мин):		
синхронная	50 (3000)	50 (3000)
холостого хода, не менее	46,3 (2775)	46,3 (2775)
Максимальная вынуждающая сила, кН при синхронной частоте колебаний	5,0	5,0
Максимальный статический момент дебаланса, кг·см	5,1	5,1
Мощность, кВт:		
номинальная	0,25	0,25
номинальная потребляемая, не более	0,50	0,50
Номинальное напряжение, В	18; 42; 220; 380	18; 42; 220; 380
Номинальный ток, А	20,0; 9; 1,9; 1,1	20,0; 9; 1,9; 1,1
Частота тока, Гц	50	50
Тип вибрационного механизма	дебалансный регулируемый	дебалансный регулируемый
Тип электродвигателя	асинхронный трехфазный с короткозамкнутым ротором	асинхронный трехфазный с короткозамкнутым ротором
Класс изоляции	F	F
Масса вибратора, кг	15	15
Степень защиты по ГОСТ 17494-87	IP66	IP66

В конструкции вибраторов ИВ-05-50 и ИВ-99Б предусмотрена возможность получения шести значений вынуждающей силы при различных установках составных дебалансов, (рис. 1).

Величина вынуждающей силы пары дебалансов, при постоянном значении массы, изменяется с изменением эксцентриситета, который зависит от величины угла установки между центром вращения и центрами массы дебалансов. Так,

наименьшее значение вынуждающей силы соответствует положение I, а наибольшее – положение VI. Данное условие позволяет формировать двухступенчатое вибрационное устройство с асимметричными колебаниями.

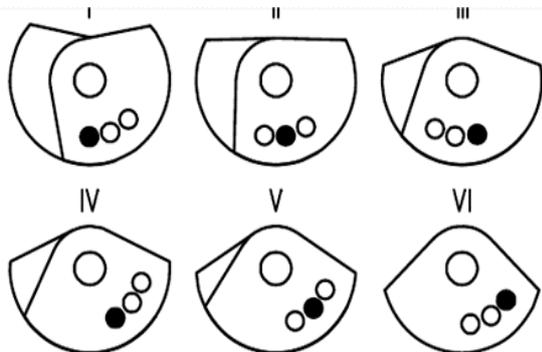


Рис. 1. Схема установки дебалансов вибраторов ИВ-05-50 и ИВ-99 для получения заданной величины вынуждающей силы

В зависимости от схемы установки дебалансов, (рис. 1), получают шесть значений статического момента,  $M_{ст} = m \cdot r$ , (табл. 3).

Таблица 3

**Статические моменты дебалансов**

Положение дебалансов согласно рис. 1		ИВ-05-50, ИВ-99Б	
		Статический момент дебалансов	Вынуждающая сила при синхронной частоте колебаний
			Вынуждающая сила при частоте колебаний холостого хода
		кг·см	кН
Схема по рис. 1.	I	2,55	2,5/1,9
	II	3,45	3,4/2,6
	III	4,2	4,1/3,2
	IV	4,6	4,5/3,5
	V	4,9	4,8/3,7
	VI	5,1	5,0/3,9

В зависимости от схемы установки дебалансов, (рис. 1), получают шесть значений статического момента,  $M_{ст}$  (кг·см):  $M_{ст1} = 2.55$ ,  $M_{ст2} = 3.45$ ,  $M_{ст3} = 4.2$ ,  $M_{ст4} = 4.6$ ,  $M_{ст5} = 4.9$ ,  $M_{ст6} = 5.1$ .

Величина вынуждающей силы,  $F$  (кН), при синхронном вращении дебалансных валов составляет:  $F_1 = 2.5$ ,  $F_2 = 3.4$ ,  $F_3 = 4.1$ ,  $N_4 = F_5$ ,  $F_5 = 4.8$ ,  $F_6 = 5.0$  кН.

Конструктивная модель вибрационной установки с двумя ступенями для генерирования асимметричных колебаний состоит, (рис. 2), из

вибростола 1 с вибраторами ИВ-05-50 2, вибратора ИВ-99Б 3, установленного на вибростоле с использованием монтажной плиты 4.

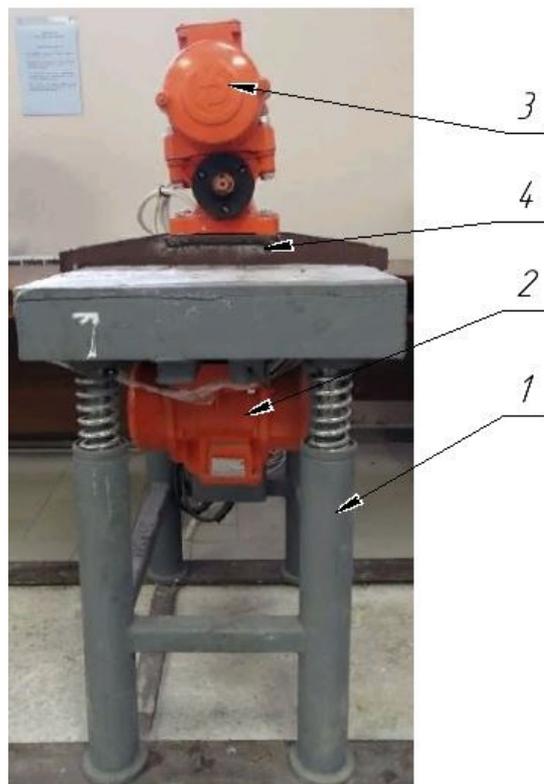


Рис. 2. Физическая модель двухступенчатой вибрационной установки для генерирования асимметричных колебаний

1 – вибростол; 2 – вибраторы вибростола ИВ-05-50; 3 – вибратор направленных колебаний ИВ-99Б; 4 –монтажная плита

Данная компоновочная схема вибрационной установки позволяет достичь идеальных значений и характеристик, которые определены техническими параметрами завода изготовителя. Дополнительным устройством является монтажная плита, жестко закреплённая на вибростоле. На монтажной плите жёстко закреплён вибратор ИВ-99Б. Вибрационное устройство, рис. 2, позволяет работать по отдельности вибраторы первой, нижней, и второй, верхней ступени. Причём, частота вращения дебалансных валов может регулироваться в достаточно широком диапазоне.

Для пуска в работу и управления частотой вращения дебалансных валов вибраторов служат шкафы управления (рис. 3).

Конструкция физической модели позволяет осуществлять регулирование или управление следующими параметрами: частотой вращения, ( $n$ , об/мин); угловой скоростью, ( $\omega$ , рад/с), дебалансных валов, величиной вынуждающей силы, ( $F$ , кН), плавно и величиной статического момента дебаланса, ( $M_{ст}$ , кг·м), ступенчато.



Рис. 3. Шкаф управления вибраторами вибростола (а) и вибратора ИВ-99Б (б)

Целью проведения экспериментальных исследований является определение влияния параметров вибрации на коэффициент асимметрии вынуждающей силы,  $k_{ac.F}$  [8–11]

$$k_{ac.F} = \frac{|F_+|}{|F_-|} \quad (2)$$

где  $|F_+|$  – модуль величины вынуждающей силы на положительной стороне графика изменения в пределах периода колебаний, кН;  $|F_-|$  – тоже, на отрицательной стороне, кН.

Таким образом, определяем взаимосвязь коэффициента асимметрии вынуждающей силы  $k_{ac.F}$ , в зависимости от основных параметров колебаний и их комбинаций [12–15]:

$$k_{ac.F} = f(\omega_1, \omega_2, r_1, r_2, M_{ст1}, M_{ст2}, \varphi_1, \varphi_2) \quad (3)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – начальные фазы колебаний дебалансов первой и второй ступени, соответственно. Технически, изменение параметров осуществляется следующим образом. Частота вращения дебалансов вибростола и вибратора ИВ-99Б регулируется преобразователями частоты ИЕК ONI A150 и ВЕСПЕР Е2-8300 с пультов управления. Величина статического момента дебалансов устанавливается перед началом эксперимента путём изменения схемы установки дебалансов на роторе, (рис. 4).



Рис. 4. Схема установки дебалансов первой (а) и второй (б) ступени двухступенчатого вибратора с асимметричными колебаниями

Для получения асимметричных колебаний с наибольшим значением величины коэффициента асимметрии вынуждающей силы,  $k_{ac.F}=2,0$  необходимо выполнить следующие условия: кратное соотношение угловых скоростей вибрационных валов первой и второй ступени,  $\omega_2 = 2 \cdot \omega_1$ . Соотношение величины суммарных статических

моментов первой и второй ступени рекомендуется принимать [3] в пределах:  $\frac{M_{ст1}}{M_{ст2}} = 6.1 \dots 10$ . Такое соотношение вынуждающих сил позволяет получить коэффициент асимметрии силы близкий к 2.0. Это значение достигается необходимым перебором исходных параметров, таких как

масса и эксцентриситет дебалансов. Мы рекомендуем [16] использовать не соотношения величин статических моментов, а величин максимальных вынуждающих сил. Так, для двухступенчатого вибрационного устройства с асимметричными колебаниями, сначала определяется или принимается величина вынуждающей силы, определяемая по требованиям технологических расчётов,  $F_{\text{техн}}$ . Затем технологическая вынуждающая сила разбивается на две составляющие:  $F_1$  и  $F_2$ , каждая в заданном соотношении:

$$F_{\text{техн}} = F_1 + F_2 = 0,67 \cdot F_{\text{техн}} + 0,33 \cdot F_{\text{техн}}$$

Для вынуждающей силы  $F_{\text{техн}} = 5,0 \text{ кН}$ , соотношение вынуждающих сил первой и второй ступени составят, соответственно:  $F_1 = 0,67 \cdot 5,0 = 3,3 \text{ кН}$ ,  $F_2 = 0,33 \cdot 5,0 = 1,7 \text{ кН}$ . Принимая частоты вращения дебалансных валов, соответственно:  $n_1 = 1500 \text{ об/мин}$  и  $n_2 = 3000 \text{ об/мин}$ , получаем расчётные значения искомых величин вынуждающих сил и график их изменения в пределах одного периода, рис. 5.

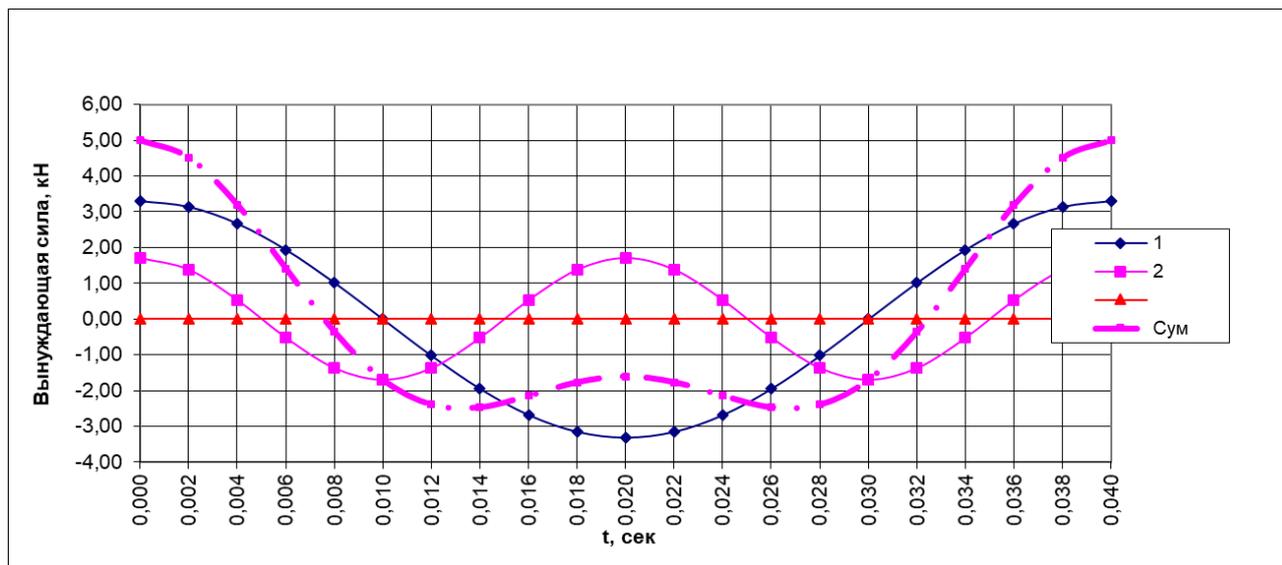


Рис. 5. График изменения асимметричной вынуждающей силы ( $F_{\text{сумм}} = 5,0 \text{ кН}$ ) в пределах одного периода колебаний

Для фиксирования и измерения параметров вибрации установка оснащена виброизмерительной аппаратурой.

### Выводы

1. В данной работе получены новые результаты научных исследований по созданию физической модели двухступенчатой вибрационной установки для генерирования асимметричных колебаний, позволяющей на штатных образцах промышленного вибрационного оборудования провести сравнительные эксперименты по оценке теоретических выводов, полученных ранее.

2. Описана методика расчёта оптимальных значений коэффициента асимметрии вынуждающей силы при сложении двух и более направленных механических колебаний.

3. Изложен принцип работы физической модели для забивки или извлечения свай в строительном производстве.

**Источник финансирования.** Исследование выполнено за счет научного проекта № МЛ-6/21 от 22.11.21 г. по теме: «Повышение эффективности процесса получения деталей строительных машин из композитных материалов, за счёт

применения топологической оптимизации формы».

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Челомей В.Н. Вибрации в технике: Справочник Т. 4. М., 1981. 509 с.
2. Primož O., Janko S., Miha B. Harmonic equivalence of the impulse loads in vibration fatigue // Journal of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 65. Pp. 631–640. DOI:10.5545/sv-jme.2019.6197
3. Пат. 7804211, США, МПК В06В1/166. Вибровозбудитель / А. Клейбл, К. Хейлель; заявитель и патентообладатель ABI GmbH. № 20080218013; заявл. 07.03.2007; опубл. 06.10.2009 Бюл. №1. 4 с.
4. Анахин В.Д. Графоаналитический метод моделирования динамики систем с асимметричными колебаниями // Вестник бурятского государственного университета. 2018. № S2. Том 1. С. 223–228.
5. Gerasimov M.D., Romanovich M.A., Vorobiev N.D., Amini E. Results of research to improve efficiency of vibrating machines // International Conference “Complex equipment of quality control laboratories”. IOP Conf. Series: Journal of Physics:

Conf. Series. 2018. No. 1118. 012015. doi:10.1088/1742-6596/1118/1/012015

6. Gerasimov M., Vorobiov N., Romanovich M., Amini E. The dynamic factor determination of the vibration mechanism with asymmetric vibrations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. No. 698. 066039. doi:10.1088/1757-899X/698/6/066039

7. Lubimyi, N.S., Annenko, D.M., Cherchurov, M.S., Kostoev, Z.M. The research of the temperature effect on a metal polymer during flat grinding of a combined metal polymer part // Australian Journal of Mechanical Engineering. 2020. Vol. 80. Pp. 1–13.

8. Герасимов М.Д., Любимый Н.С., Рязанцев В.Г. Методика проектирования вибропогружателей с асимметричными колебаниями // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 5. С. 135–142. DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-5-135-142

9. Lubimyi N., Chetverikov B., Cherchurov M., Odobesko I. A method of determination of average plane of taps of pipes by a triangulation method using an anthropomorphic robot // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 709. Issue 3. Pp. 1–8.

10. Герасимов М.Д. Способ получения направленных механических колебаний для практического применения в технологических процессах // Строительные и дорожные машины. 2014. №1. С. 35–38.

11. Бауман В.А. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов. Справочник. М.: Машиностроение, 1970. 632 с.

12. Герасимов М.Д. Сложение колебаний в вибропогружателях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №3. С. 116–121.

13. Андриевский Б.Р., Гузенко П.Ю., Фрадков А.Л. Управление нелинейными колебаниями механических систем методом скоростного градиента // Автоматика и телемеханика. 1996. №4. С. 4–17

14. Fidlin A. Nonlinear oscillations in mechanical engineering. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2006. 358 p.

15. Лавандела Э.Э. Вибрации в технике: Справочник. М.: Машиностроение, 1981. Т.4. 509 с.

16. Пат. 2740282, Российская Федерация, МПК E02D 7/18. Способ генерирования направленных инерционных асимметричных колебаний рабочего оборудования вибрационных машин/ М.Д. Герасимов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». №2020121504; заявл. 05.08.2020; опублик. 12.01.2021, Бюл. №2. 12 с.

#### *Информация об авторах*

**Рязанцев Владислав Геннадьевич**, аспирант кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: vladeslav390@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Герасимов Михаил Дмитриевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: mail\_mihail@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Любимый Николай Сергеевич**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: nslubim@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Польшин Андрей Александрович**, аспирант кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: info@polshin.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Тихонов Александр Андреевич**, магистрант кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: cherer2240@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

---

*Поступила 07.04.2022 г.*

© Рязанцев В.Г., Герасимов М.Д., Любимый Н.С., Польшин А.А., Тихонов А.А., 2022

**\*Ryazantsev V.G., Gerasimov M.D., Lubimyi N.S., Polshin A.A., Tihonov A.A.**  
*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova*  
*\*E-mail: vladeslav390@gmail.com*

## PHYSICAL MODEL OF A TWO-STAGE VIBRATION INSTALLATION FOR GENERATING ASYMMETRIC OSCILLATIONS

**Abstract.** *Vibrating devices occupy a large cluster in the construction and road construction industry. The improvement of all vibration machines begins, first of all, with a vibration device, as the main working body of the machine. Basically, vibrators acted as a vibrating device for all road construction equipment. Initially, vibrators with circular vibrations were used, which are not so effective and not always sufficient for performing special work on driving piles into the ground and also extracting them from the soil. Vibratory systems with asymmetric vibrations are increasingly being used in the construction industry. For example, when driving piles, pile drivers are used. Their principle of operation is similar in its action to the operation of a vibration plant with asymmetric vibrations. However, a vibration plant with asymmetric oscillations, when the direction of the driving force is turned in the opposite direction, not down, but up, also makes it possible to extract worn-out piles and sheet piles from the soil. Based on the above, we propose a description, a method for calculating the optimal values of the asymmetry coefficient, driving force and set out the principle of operation of a physical model of a vibration plant with two stages of generating asymmetric vibrations, consisting of standard vibration equipment: the first stage: a table of the brand EV-341 and the second stage: vibrator of directional vibrations brand IV-99B, manufactured by OOO Yaroslavl Plant Krasny Mayak.*

**Keywords:** *vibrator, vibrating table, circular, directional, asymmetric oscillations, asymmetry coefficient.*

### REFERENCES

1. Chelomey V.N. Vibration in technology. [Vibracii v tekhnike]: Handbook T. 4. M.: , 1981. 509 p. (rus)
2. Primož O., Janko S., Miha B. Harmonic equivalence of the impulse loads in vibration fatigue. Journal of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 65. Pp. 631–640. DOI:10.5545/sv-jme.2019.6197
3. Kleibl A, Heichel Ch. Vibration Generator. Patent US, no 7804211, 2009.
4. Anakhin V.D. A graphoanalytical method for modeling the dynamics of systems with asymmetric oscillations [Grafoanaliticheskij metod modelirovaniya dinamiki sistem s asimmetrichnymi kolebaniyami]. Bulletin of the Buryat State University. 2018. No. S2. Vol. 1. Pp. 223–228. (rus)
5. Gerasimov M.D., Romanovich M. A., Vorobiev N. D., E. Amini. Results of research to improve efficiency of vibrating machines. International Conference “Complex equipment of quality control laboratories”. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series/ 2018. No. 1118. 012015. doi:10.1088/1742-6596/1118/1/012015
6. Gerasimov M., Vorobiev N., Romanovich M., Amini E. The dynamic factor determination of the vibration mechanism with asymmetric vibrations. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. No. 698. 066039. doi:10.1088/1757-899X/698/6/066039
7. Lubimyi N.S., Annenko, D.M., Chepchurov, M.S., Kostoev, Z.M. The research of the temperature effect on a metal polymer during flat grinding of a combined metal polymer part. Australian Journal of Mechanical Engineering. 2020. Vol. 80. Pp. 1–13.
8. Gerasimov M.D., Lubimyi N.S., Ryazantsev V.G. Methodology of vibro loader design with asymmetric oscillations [Metodika proektirovaniya vibropogruzhatelej s asimmetrichnymi kolebaniyami]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. Vol. 5. Pp. 135–142. (rus)
9. Lubimyi N., Chetverikov B., Chepchurov M., Odobesko I. A method of determination of average plane of taps of pipes by a triangulation method using an anthropomorphic robot. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 709. Issue 3. Pp. 1–8.
10. Gerasimov M.D. Method of obtaining directional mechanical vibrations for practical application in technological processes [Sposob polucheniya napravlennyh mekhanicheskikh kolebanij dlya prakticheskogo primeneniya v tekhnologicheskikh procesah]. Bulletin of the Construction and road machines. 2014. No. 1. Pp. 35–38. (rus)
11. Bauman V.A. Vibrating machines in construction and building materials production [Vibracionnye mashiny v stroitel'stve i proizvodstve stroitel'nyh materialov]. Directory. M.: Mashinostroenie, 1970. 632 p. (rus)
12. Gerasimov M.D. Addition of vibrations in vibratory drivers [Dobavlenie vibracij v vibropogruzhately]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 3. Pp. 116–121. (rus)
13. Andrievsky B.R., Guzenko P.Yu., Fradkov A.L. Control of Nonlinear Oscillations of Mechanical Systems by the Speed Gradient Method [Upravlenie nelinejnymi kolebaniyami mekhanicheskikh sistem metodom skorostnogo gradienta]. Bulletin of Automation and Telemechanics. 1996. No. 4. Pp. 4–17. (rus)

14. Fidlin A. Nonlinear oscillations in mechanical engineering. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2006. 358 p.

15. Lavandel E.E. Vibrations in Engineering. [Vibracii v tekhnike]: A Handbook. M.: Mechanical Engineering, 1981. V.4. 509 p. (rus)

16. Gerasimov M.D. Method for generating directed inertial asymmetric oscillations of the working equipment of vibration machines. Patent RF, no. 2020121504, 2020.

*Information about the authors*

**Ryazantsev, Vladislav G.** Postgraduate student. E-mail: vladeslav390@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Gerasimov, Mihail D.** PhD, Assistant professor. E-mail: mail\_mihail@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Lubimyi, Nikolay S.** Senior lecture. E-mail: nslubim@bk.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Polshin, Andrey A.** Postgraduate student. E-mail: info@polshin.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Tihonov, Aleksandr A.** Master student. E-mail: cherep2240@rambler.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 07.04.2022*

**Для цитирования:**

Рязанцев В.Г., Герасимов М.Д., Любимый Н.С., Польшин А.А., Тихонов А.А. Физическая модель двухступенчатой вибрационной установки для генерирования асимметричных колебаний // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 107–114. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-107-114

**For citation:**

Ryazantsev V.G., Gerasimov M.D., Lubimyi N.S., Polshin A.A., Tihonov A.A. Physical model of a two-stage vibration installation for generating asymmetric oscillations. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 10. Pp. 107–114. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-107-114