

Научно-теоретический журнал  
**ВЕСТНИК**

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

**1**

**2023**

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**

**№ 1, 2023 год**

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

**Vol. 1. 2023**

# 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)

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 представляются 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/2558104627/">http://www.akc.ru/itm/2558104627/</a> Цена свободная.
<b>Подписан в печать</b>	16.01.2023
<b>Выход в свет</b>	30.01.2023

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,62. Уч.-изд. л. 17,87. Тираж 40 экз. Заказ № 3

# 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)

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>	16.01.2023

**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).

**Гридин 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 сопровитвления 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>Славчева Г.С., Акулова И.И., Юров П.Ю.</b> КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ 3D-ПРИНТЕРОВ	8
<b>Гольцов А.Б.</b> ВЫЯВЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАВНОМЕРНОСТЬ ВСАСЫВАНИЯ АСПИРАЦИОННЫМИ ВОРОНКАМИ	19
<b>Абрамкина Д.В., Иванова А.О.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЕЙ ШУМА ОТ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ В МЕЖКВАРТИРНЫХ КОРИДОРАХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ	32
<b>Лобанов Д.В., Звенигородский И.И., Свирин М.В., Сафонов С.А., Семиненко А.С.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПОСТУПЛЕНИЙ ОТ ЧЕЛОВЕКА С УЧЕТОМ ЭНЕРГОТРАТ И ФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ	42
<b>Черныш А.С., Поляков А.И.</b> МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ ПОДЛЕЖАЩЕЙ РЕНОВАЦИИ	53
<b>Петухова Н.М.</b> ОСОБЕННОСТИ СОХРАНЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ИСТОРИЧЕСКИХ АРХИТЕКТУРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ	61
<b>Василенко Н.А., Черныш Н.Д.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА	74

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<b>Гребенюк А.А., Смаль Д.В., Давидюк А.С., Пономарёва П.С.</b> ПОЛУЧЕНИЕ СМЕШАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЦЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ФЕРРИТНОГО КЛИНКЕРА	89
---	----

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<b>Безмен П.А.</b> СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПО СОСТОЯНИЮ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ С НАБЛЮДАТЕЛЕМ И РЕГУЛЯТОРОМ СОСТОЯНИЯ	102
<b>Харламов Ю.А., Вишневский Д.А., Петров П.А., Орлов А.А.</b> РАЗВИТИЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	121
<b>Григоренко А.А., Шопина Е.В.</b> ВЫПОЛНЕНИЕ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНА И АДАПТАЦИЯ К ИЗГОТОВЛЕНИЮ ПОВОРОТНОГО КУЛАКА. ЧАСТЬ I	132

## CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

**Slavcheva G.S., Akulova I.I., Yurov P.Y.**

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF 3D-BUILD PRINTER COMPETITIVENESS 8

**Goltsov A.B.**

IDENTIFICATION OF FACTORS AFFECTING THE UNIFORMITY  
OF SUCTION BY SUCTION FUNNEL 19

**Abramkina D.V., Ivanova A.O.**

STUDY OF NOISE LEVELS FROM VENTILATION SYSTEMS IN CORRIDORS  
OF RESIDENTIAL BUILDINGS 32

**Lobanov D.V., Zvenigorodskij I.I., Svirin M.V., Safonov S.A., Seminenko A.S.**

DETERMINATION OF HEAT GAIN FROM A PERSON, TAKING INTO ACCOUNT  
ENERGY CONSUMPTION AND PHYSICAL ACTIVITY 42

**Chernysh A.S., Polyakov A.I.**

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE CONDITION OF ENCLOSING  
STRUCTURES OF BUILDINGS ON THE TERRITORY OF RESIDENTIAL  
DEVELOPMENT SUBJECT TO RENOVATION 53

**Petukhova N.M.**

FEATURES OF PRESERVATION AND DEVELOPMENT OF HISTORICAL  
ARCHITECTURAL COMPLEXES OF RAILWAYS 61

**Vasilenko N.A., Chernysh N.D.**

DEFINITION AND SUBSTANTIATION OF ARCHITECTURAL OBJECTS'  
FUNCTIONAL STRUCTURE ON THE BASIS OF SYSTEM APPROACH 74

## CHEMICAL TECHNOLOGY

**Grebeniuk A.A., Smal D.V., Davidyuk A.S., Ponomareva P.S.**

OBTAINING MIXED COMPOSITE CEMENTS BASED ON FERRITE CLINKER 89

## MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

**Bezmen P.A.**

A CONTROL SYSTEM ON A CONTROLLED OBJECT STATE WITH AN OBSERVER  
AND A STATE REGULATOR 102

**Kharlamov Yu.A., Vishnevskiy D.A., Petrov P.A., Orlov A.A.**

DEVELOPMENT OF DESIGN-ENGINEERING CLASSIFICATION OF MACHINE  
PARTS 121

**Grigorenko A.A., Shopina E.V.**

CALCULATION OF INPUT PARAMETERS FOR TOPOLOGY OPTIMISATION  
OF STEERING KNUCKLE. PART I 132

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-8-18

\*Славчева Г.С., Акулова И.И., Юров П.Ю.

Воронежский государственный технический университет

E-mail: gslavcheva@yandex.ru

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ 3D-ПРИНТЕРОВ

**Аннотация.** Предложена методика оценки конкурентоспособности строительных 3D-принтеров, базирующаяся на сопоставлении их технико-технологических характеристик и экономических параметров. В методике реализуется комплексный подход, обеспечивающий учет большого количества параметров сравнения, имеющих различную природу, на основе использования относительных показателей. При расчете учитываются конструктивные характеристики принтеров, характеристики технологичности процесса печати, характеристики напечатанных строительных объектов и экономические параметры принтеров. Для малоэтажного строительства существенными параметрами являются скорость печати, соотношение области печати и габаритных размеров принтера, возможность работы с низкотекучими смесями и с различными строительными смесями без переналадки, снижение дефектности печатного слоя и энергопотребления. Наиболее конкурентоспособным является принтер, который обеспечивает большее количество единиц полезного эффекта, определяемого набором технико-технологических характеристик, на единицу затрат, связанных с приобретением принтера, его энергопотреблением, трудоемкостью обслуживания и монтажа-демонтажа на стройплощадке. В результате оценки конкурентоспособности различных типов принтеров выявлено, что для малоэтажного строительства лидером является порталный принтер BOD2 2-2-2 датской компании «COBOD BOD2». Для печати строительных изделий и конструкций в производственных условиях конкурентными преимуществами обладает робот-манипулятор FIXED нидерландской компании «CyBe Construction». Рассмотренный подход к оценке конкурентоспособности строительных 3D-принтеров представляет практический интерес для их производителей. Полученное в результате реализации предложенной методики новое знание о значимости конструктивных решений 3D-принтеров создает стратегические ориентиры для отечественных производителей.

**Ключевые слова:** строительный 3D-принтер, конкурентоспособность, конструктивные особенности, экономические параметры.

**Введение.** Конкурентоспособность 3D-аддитивных строительных технологий по отношению к традиционным во многом определяется эффективностью технологических комплексов. Потенциально, роботизированное возведение строительных объектов методом 3D-печати предполагает отказ от сложной производственной инфраструктуры, сокращение затрат энергии, материалов и живого труда [1–3].

В настоящее время разработаны и активно продвигаются на рынок три типа принтеров [4–9].

1. *Принтер с порталной системой позиционирования* – представляет собой раму, по которой движется печатающее устройство (экструдер). Данный принтер производит печать объектов внутри системы перемещения, что закономерно приводит к увеличению габаритов принтера для масштабных строительных объектов (рис. 1).

2. *Робот-манипулятор* – перемещает экструдер при помощи «роботизированной руки», что позволяет устанавливать принтер как сна-

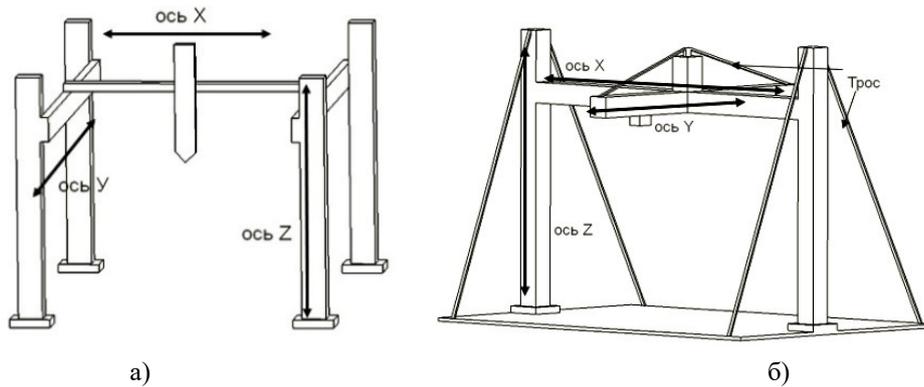
ружи, так и внутри печатного объекта. Характеризуется небольшими габаритами и весом, позволяющими достигать высокой мобильности принтера (рис. 2).

3. *Кабельная подвесная система* (дельта-принтер) – осуществляет трехмерное перемещение печатающей головки с помощью специальных тросс-кабелей внутри внешней рамы. Это определяет возможность печати высоких объектов, но с очень ограниченной площадью (рис. 3).

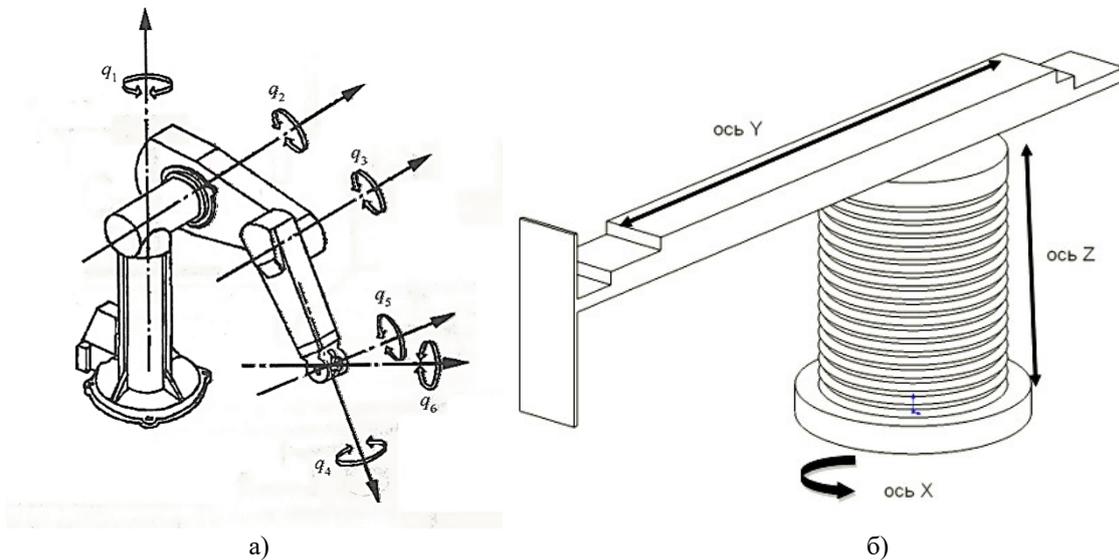
На сегодня сложилась ситуация, когда в практику строительства наиболее активно внедряются порталные 3D-принтеры. Данный выбор основан на сформировавшихся к настоящему моменту представлениях строительных компаний об относительной простоте, надежности и отсутствии сложностей в обслуживании используемой конструкции принтера. На наш взгляд, такой подход к выбору 3D-принтера является односторонним и недостаточно обоснованным, поскольку все виды принтеров обладают как достоинствами, так и недостатками, соотношение которых и определяет их конкурентоспособность на рынке [10, 11].

С учетом изложенного, целью настоящего исследования является разработка научно-обоснованной методики и комплексная оценка на ее

основе конкурентоспособности строительных 3D-принтеров.



а) б)  
Рис. 1. Конструктивные схемы порталных 3D-принтеров  
а) с четырехопорной системой перемещения,  
б) с двухопорной системой перемещения<sup>1</sup>



а) б)  
Рис. 2. Конструктивные схемы роботов-манипуляторов:  
а) 6-осевой робот<sup>2</sup>, б) 3-осевой робот<sup>3</sup>

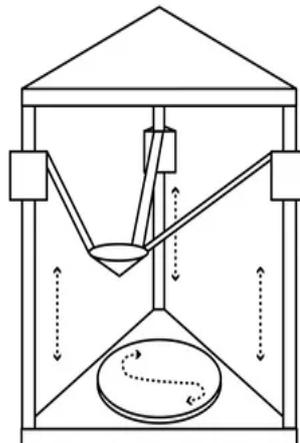


Рис. 3. Конструктивная схема кабельной подвесной системы (дельта-принтер)<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Источник: <https://t-magazine.ru/pages/3dprint-house/>

<sup>2</sup>Источник: <https://t-magazine.ru/pages/3dprint-house/>

<sup>3</sup>Источник: <https://studfile.net/preview/5693400/page:2/>

<sup>4</sup>Источник: <https://3dnews.ru/913338/samoe-interesnoe-na-kickstarter-dobavlyаем-plite-uma-i-slushаем-oblaka/?full>

**Методы.** Предлагаемая методика базируется на сопоставлении технико-технологических характеристик и экономических параметров строительных 3D-принтеров. Системность и комплексность при таком подходе обеспечиваются возможностью учета большого количества параметров сравнения, имеющих различную природу, на основе использования относительных показателей [12–16].

Алгоритм оценки конкурентоспособности строительных 3D-принтеров включает следующие шаги:

*шаг 1* – формирование совокупности параметров оценки конкурентоспособности с определением их значимости;

*шаг 2* – формирование базы сравнения и оценки конкурентоспособности принтеров;

*шаг 3* – определение единичных (относительных) показателей конкурентоспособности для различных видов принтеров;

*шаг 4* – расчет групповых индексов конкурентоспособности;

*шаг 5* – расчет интегрального показателя конкурентоспособности по видам принтеров.

Отметим, что наиболее конкурентоспособным следует считать принтер, который обеспечивает *большее количество единиц полезного эффекта, определяемого набором технико-технологических характеристик, на единицу затрат, связанных с приобретением принтера, его энергопотреблением, трудоемкостью обслуживания и монтажа-демонтажа на стройплощадке* [12, 17, 18].

В результате формирования на основе системного анализа совокупности параметров оценки конкурентоспособности строительных 3D-принтеров (шаг 1) были выделены группы технико-технологических характеристик и экономических параметров. В первую группу вошли подгруппы параметров, отражающих конструктивные особенности принтеров, технологичность печати, качество и объем напечатанных строительных объектов. При этом каждая подгруппа имеет соответствующее логическое наполнение (табл. 1). Вторую группу составили показатели энергопотребления принтера, трудоемкости его монтажа-демонтажа на строительной площадке, трудоемкости обслуживания и цены.

Таблица 1

### Совокупность параметров оценки конкурентоспособности строительных 3D-принтеров

Группа технико-технологических характеристик		
1. Подгруппа конструктивных характеристик	2. Подгруппа характеристик технологичности процесса печати	3. Подгруппа характеристик напечатанных строительных объектов
– площадь печати; – высота области печати; – точность позиционирования; – скорость печати; – площадь сечения печатного слоя; – соотношение области печати и габаритных размеров принтера	– возможность работы со смесями различного назначения (конструкционными, теплоизоляционными, отделочными) без переналадки; – возможность обеспечения роботизированной финишной отделки; – возможность работы с высоковязкими смесями, вязкость $\eta \sim 50\text{--}60$ Па·с	– качество печатного слоя (бездефектность); – качество поверхности объекта; – максимальная площадь объектов; – максимальная высота объектов
Группа экономических параметров		
– потребляемая мощность; – трудоемкость монтажа-демонтажа принтера;	– трудоемкость обслуживания (количество операторов); – цена принтера	

Оценку значимости выделенных характеристик и параметров рекомендуется проводить на основе эвристических методов путем индивидуального анкетирования экспертов. В анкете помимо формулировки задания следует представить шкалы бальных оценок значимости параметров строительных 3D-принтеров внутри каждой из подгрупп. При формировании шкалы оценивания целесообразно, на наш взгляд, использовать подход, в соответствии с которым минимальное количество баллов равняется 1, а максимальное – соответствует количеству параметров (характеристик) в группе (подгруппе). Таким об-

разом, в рамках настоящего исследования в первой подгруппе технико-технологических параметров максимальное количество баллов для наиболее значимого показателя составляет 6 баллов (см. табл. 1), для второй подгруппы – 3 балла, а для третьей подгруппы – 4 балла. Для группы экономических параметров наиболее важному, по мнению экспертов, показателю может быть присвоено максимально 4 балла.

После сбора информации от экспертов сначала нужно определить наличие неслучайной согласованности их оценок путем расчета коэффициента конкордации по формуле:

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^n S_i}{r^2(n^3-n)}, \quad (1)$$

где  $S_i$  – квадрат отклонений  $i$ -того свойства от средней суммы баллов;  $r$  – количество экспертов;  $n$  – количество свойств.

Особо следует указать, что только в случае, если полученное значение коэффициента конкурдации попадет в интервал  $0,7 \dots 0,8$ , дальнейшая оценка конкурентоспособности 3D-принтеров может быть продолжена. При невыполнении этого условия необходимо внести коррективы либо в состав группы экспертов, либо в формулировку задания, и повторно провести опрос экспертов.

Оценка значимости параметров строительных 3D-принтеров базируется на схеме расчета коэффициентов весомости ( $M_i$ ):

$$M_i = M' / \sum M', \quad (2)$$

где  $M'$  – средний коэффициент весомости  $i$ -того параметра принтера.

$$M' = \sum M' / r, \quad (3)$$

где  $M'$  – значение бальной оценки значимости параметра экспертом;  $r$  – количество экспертов, принявших участие в анкетировании.

Сумма полученных коэффициентов весомости в рамках каждой подгруппы (группы) должна удовлетворять условию:

$$\sum_{i=1}^n M_i = 1. \quad (4)$$

Для формирования базы сравнения и оценки конкурентоспособности принтеров на шаге 2 рассматриваемой методики осуществляется «отбор» строительных 3D-принтеров, имеющих сопоставимые значения конструктивных характеристик. По результатам такого отбора определяется некий «эталон» в виде виртуального принтера с наилучшими показателями по всем характеристикам печатных устройств из числа рассмотренных.

Далее на шаге 3 выполняется расчет единичных показателей конкурентоспособности ( $k_{ij}$ ) для вошедших в базу сравнения принтеров. Поскольку характеристики технологических комплексов имеют различные единицы измерения, представляется обоснованным использование в этой процедуре относительных показателей, определяемых по схемам:

$k_{ij} = P_i / P_i^{эТ}$  – для случая, когда увеличение значения параметра повышает технические возможности и экономическую эффективность принтера;

$k_{ij} = P_i^{эТ} / P_i$  – для случая, когда технические возможности и экономическая эффективность принтера повышаются при уменьшении значения

параметра. При этом,  $P_i^{эТ}$  – значение  $i$ -того параметра принтера-эталона, а  $P_i$  – значение  $i$ -того параметра сравниваемого принтера.

Необходимо указать, что для характеристик принтеров, не имеющих количественного измерения, при формировании базы оценки конкурентоспособности разрабатывались собственные шкалы бальной оценки на основании анализа информации о характеристиках принтеров и напечатанных строительных объектах:

1) возможность работы с низкотекучими смесями: при наличии возможности – 1 балл, при отсутствии таковой – 0 баллов;

2) качество печатного слоя: слой без дефектов – 1 балл, слой с трещинами – 0 баллов;

3) качество поверхности объекта: поверхность гладкая, без дефектов – 1 балл, дефектная поверхность (с оплывами слоев и трещинами) – 0 – 0,9 баллов в зависимости от количества дефектов.

Затем на шаге 4 проводится расчет групповых индексов конкурентоспособности по различным группам характеристик и параметров принтеров. Для этого следует использовать общий подход, описываемый уравнением (5):

$$Q_{mj} = \sum_{i=1}^m k_{ij} \cdot M_i, \quad (5)$$

где  $Q_{mj}$  – групповой индекс конкурентоспособности по  $m$ -той группе параметров  $j$ -того вида принтера.

В заключение на последнем шаге приведенного выше алгоритма для каждого вошедшего в базу рассмотрения строительного 3D-принтера рассчитывается его интегральный показатель конкурентоспособности ( $\Pi_{kj}$ ):

$$\Pi_{kj} = \frac{Q_{kl} + Q_{Tj} + Q_{oj}}{Q_{\Sigma j}}, \quad (6)$$

где  $Q_{kj}$  – групповой индекс конкурентоспособности  $j$ -того принтера по конструктивным характеристикам;  $Q_{Tj}$  – групповой индекс конкурентоспособности  $j$ -того принтера по характеристикам технологичности печати;  $Q_{oj}$  – групповой индекс конкурентоспособности  $j$ -того принтера по характеристикам напечатанных строительных объектов;  $Q_{\Sigma j}$  – групповой индекс конкурентоспособности  $j$ -того принтера по экономическим параметрам.

В рамках предложенной методики наиболее конкурентоспособным признается 3D-принтер с наибольшим значением  $\Pi_{kj}$ .

**Основная часть.** Оценка значимости характеристик и параметров строительных 3D-принтеров, проведенная в соответствии с рассмотренным алгоритмом на основе анкетирования экспертов, показала, что наиболее важную роль в формировании конкурентных преимуществ этих

агрегатов играют обеспечиваемые ими площадь печати и качество печатного слоя, возможность работы с различными строительными смесями без переналадки, а также цена (табл. 2). Отметим, что группа экспертов общей численностью в 30 человек включала специалистов различных сфер и отраслей экономики: инженерно-технические работники строительной отрасли – 6 человек; высококвалифицированные работники научно-образовательной сферы – 12 человек; специалисты в области производства строительных изделий и конструкций – 7 человек; производители строительных 3D-принтеров – 5 человек.

Для формирования базы сравнения и оценки конкурентоспособности потребовался анализ ин-

формации, размещенной на сайтах производителей принтеров. По результатам анализа вне зависимости от типа, исходя из площади печати, выделены две категории принтеров:

1) *принтеры для строительства полноразмерных строительных объектов*, предназначенные для использования на строительной площадке. Площадь печати в 100 – 200 м<sup>2</sup> обеспечивает возможность возведения малоэтажных домов [19];

2) *принтеры для печати изделий и конструкций*, предназначенные для использования в производственных условиях. Площадь печати менее 10 м<sup>2</sup> позволяет создавать малые архитектурные формы, отдельные конструктивные и декоративные элементы зданий [20].

Таблица 2

**Коэффициенты весомости параметров оценки конкурентоспособности 3D-принтеров по группам**

Наименование характеристик и параметров	Значение коэффициента весомости параметра
<i>Конструктивные характеристики принтера</i>	
Площадь печати	0,23
Высота области печати	0,12
Точность позиционирования	0,18
Скорость печати	0,13
Площадь сечения печатного слоя	0,06
Соотношение области печати и габаритных размеров принтера	0,18
<i>Характеристики технологичности процесса печати</i>	
Возможность работы с различными строительными смесями (конструкционными, теплоизоляционными, отделочными) без переналадки	0,44
Возможность обеспечения роботизированной финишной отделки	0,23
Возможность работы с высоковязкими смесями, 50–60 Па·с	0,33
<i>Характеристики напечатанных строительных объектов</i>	
Качество печатного слоя (бездефектность)	0,40
Качество поверхности объекта	0,23
Максимальная площадь объектов	0,21
Максимальная высота объектов	0,16
<i>Экономические параметры принтера</i>	
Потребляемая мощность	0,19
Трудоемкость монтажа-демонтажа принтера	0,16
Трудоемкость обслуживания (количество операторов)	0,31
Цена	0,34

При этом в первую категорию вошли только порталные принтеры, для которых по данным сайтов удалось оценить всю совокупность их параметров (табл. 3 и 4), так как имеются данные об опыте печати и характеристиках реальных строительных объектов. Для второй категории (табл.

5) получилось рассчитать групповой индекс конкурентоспособности только по конструктивным характеристикам ввиду отсутствия необходимой информации.

Таблица 3

**Характеристики строительных 3D-принтеров порталного типа, используемых для малоэтажного строительства**

Наименование характеристик	Значение характеристик по видам принтеров			
	«АМТ» S-300 (АМТ-СПЕ-ЦАВИА, Россия) <sup>5</sup>	BOD2 2-2-2 (COBOD BOD2, Дания) <sup>6</sup>	Vulcan (ICON Vulcan <sup>7</sup> an, США)	StroyBot concrete printer (Total Kustom, США)
<i>Конструктивные характеристики</i>				
Площадь печати, м <sup>2</sup>	132	116	200	200
Высота области печати, м	4,0	5,6	3,2	6,0
Точность позиционирования, мм	± 2	± 2	± 1,5	± 2
Скорость печати, м/с	0,2	1,0	0,5	0,6
Площадь сечения печатного слоя, см <sup>2</sup>	3	4	4	9
Соотношение области печати и габаритных размеров принтера	0,42	0,50	0,53	0,65
<i>Характеристики технологичности печати</i>				
Возможность работы с различными строительными смесями (конструкционными, теплоизоляционными, отделочными) без переналадки	0	1	0	0
Возможность обеспечения роботизированной финишной отделки	1	1	0	0
Возможность работы с низкотекучими смесями	0	1	1	0
<i>Характеристики напечатанных строительных объектов</i>				
Качество печатного слоя (бездефектность)	0	1	1	0
Качество поверхности объекта	0,5	1	0,7	0,5
Максимальная площадь объектов, м <sup>2</sup>	120	100	180	118
Максимальная высота объектов	4	5,1	3,0	5,8
<i>Экономические параметры принтера</i>				
Потребляемая мощность, кВт	12	3,6	7,2	1,6
Трудоемкость монтажа-демонтажа принтера, ч	4	4	6	6
Трудоемкость обслуживания (количество операторов)	3	2	2	3
Цена, тыс. \$	8,5	500	370	400

<sup>5</sup> <https://specavia.pro/><sup>6</sup> <https://cobod.com/><sup>7</sup> <https://www.iconbuild.com/vulcan><sup>8</sup> <http://www.totalkustom.com/>

Сопоставление значений групповых индексов и интегральных показателей конкурентоспособности порталных 3D-принтеров для малоэтажного строительства (см. табл. 4) позволяет утверждать, что лидером по уровню конкурентоспособности является принтер BOD2 2-2-2 датской компании «COBOD BOD2». Это обеспечивается наиболее высокими по отношению к конкурентам параметрами технологичности печати и качества строительных объектов. Отметим, что принтеры американских производителей, уступающая принтеру BOD2 2-2-2 по данным показателям, обладают, тем не менее, высокими индексами конкурентоспособности по конструктивным характеристикам. Аутсайдером, к сожалению, является принтер «АМТ S-300» российской

компании «АМТ-СПЕЦАВИА», который имеет существенно худшие значения всех параметров относительно зарубежных аналогов. Именно поэтому интегральный показатель его конкурентоспособности в 2 – 3,5 раза ниже, чем у зарубежных принтеров, несмотря на существенно меньшую цену.

Применительно к печати изделий и конструкций эталонными конструктивными характеристиками отличается робот-манипулятор FIXED нидерландской компании «CyBe Construction». Данный принтер обоснованно можно считать наиболее конкурентоспособным по сравнению с мини-принтерами порталной и дельта-конструкции.

Таблица 4

**Значения групповых индексов и интегральных показателей конкурентоспособности порталных 3D-принтеров для малоэтажного строительства**

Наименование групповых индексов и показателей конкурентоспособности	«АМТ» S-300 (АМТ-СПЕЦАВИА, Россия)	BOD2 2-2-2 (COBOD BOD2, Дания)	Vulcan (ICON Vulcan, США)	StroyBot concrete printer (Total Kustom, США)
Групповые индексы конкурентоспособности – по конструктивным характеристикам	0,60	0,77	0,77	0,90
– по характеристикам технологичности печати	0	1,00	0,33	0
– по характеристикам напечатанных строительных объектов	0,37	0,93	0,82	0,42
– по экономическим параметрам принтерам	0,70	0,56	0,47	0,51
Интегральный показатель конкурентоспособности	1,39	4,82	4,09	2,59

Таблица 5

**Конструктивные характеристики строительных мини 3D-принтеров для печати строительных изделий и конструкций в производственных условиях**

Наименование характеристик и показателей	Значение характеристик по типам и видам принтеров				
	портальный «АМТ» S -6044 (АМТ-СПЕЦАВИА, Россия)	портальный Mini Printer Pro (Constructions-3D, Франция)	манипулятор FIXED (CyBe Construction, Нидерланды)	Delta WASP 3MT CONCRETE (WASP 3 MT, Италия)	принтер-эталон
Площадь печати	5,3	1,4	7,5	1,0	7,5
Высота области печати, м	0,8	1,2	4,0	1,0	4,0
Точность позиционирования, мм	± 2	± 1,5	± 1,5	± 1,5	± 1,5
Скорость печати, м/с	0,2	7,5	25,0	20,0	25,0
Площадь сечения печатного слоя, см <sup>2</sup>	3,00	2,25	25,00	9,00	25,00
Групповой индекс конкурентоспособности по конструктивным характеристикам	0,39	0,38	1,00	0,40	1,00

Проведенные исследования показали, что для малоэтажного строительства наиболее применимым является 3D-принтер порталного типа. При этом высоким уровнем конкурентоспособности на строительном рынке обладают принтеры BOD2 2-2-2 датской компании «COBOD BOD2». Отечественные принтеры отстают от зарубежных в наибольшей мере по технологичности печати и качеству напечатанных строительных объектов. С учетом этого обстоятельства, несмотря на самую низкую цену, их нельзя отнести к конкурентоспособным.

Применительно к печати изделий и конструкций в производственных условиях, наиболее конкурентоспособным следует признать робот-манипулятор. Этот тип принтера обладает эталонными конструктивными характеристиками, а высокая скорость печати позволяет обеспечивать достаточно большие объемы производства такой продукции, как малые архитектурные формы, отдельные конструктивные и декоративные элементы зданий. Поэтому именно в данном применении, когда ограниченная площадь печати не имеет принципиального значения, роботы-манипуляторы имеют существенные преимущества по сравнению с порталными и дельта-принтерами.

**Выводы.** Рассмотренный подход к оценке конкурентоспособности строительных 3D-принтеров представляет практический интерес, прежде всего, для производителей этих технологических комплексов. Полученное в результате реализации предложенной методики новое знание о значимости конструктивных решений 3D-принтеров создает стратегические ориентиры для отечественных производителей подобных агрегатов. Так, в качестве основных направлений технического совершенствования принтеров для малоэтажного строительства следует обозначить повышение скорости печати, оптимизацию соотношения области печати и габаритных размеров принтера, обеспечение возможности работы с низкотекучими смесями и с различными строительными смесями без переналадки, снижение дефектности печатного слоя и энергопотребления. Повышение конкурентоспособности отечественных 3D-принтеров без улучшения их технико-технологических параметров, а только лишь за счет снижения цены в условиях конкурентного строительного рынка следует считать нецелесообразным. Именно недостаточная проработанность конструктивных решений принтеров является, по мнению авторов, одним из существенных факторов сдерживания широкого внедрения в практику строительства технологии 3D-печати.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tay Y., Panda B., Paul S.C., Mohamed N.A.N., Tan M., Leong K. 3D printing trends in building and construction industry: a review // *Virtual Phys. Prototyp.* Taylor & Francis. 2017. Vol. 12, № 3. Pp. 261–276. DOI:10.1080/17452759.2017.1326724.
2. Labonnote N., Rønquist A., Manum B., Rütther P. Additive Construction: state of the art, challenges and opportunities Automation in Construction Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities // *Autom. Constr.* Elsevier B.V., 2016. № 9. Pp. 2017–2024. DOI:10.1016/J.AUTCON.2016.08.026.
3. Kamram M., Hussein A.B. 3D Printing Concrete Technology and Mechanics from Industrial Aspect // *Energy Policy.* 2020. № 3. Pp. 2–12.
4. Albar A., Chougan Mehdi, Al-Kheetan Mazen J., Swash M., Ghaffar S. Effective extrusion-based 3D printing system design for cementitious-based materials // *Results Eng.* Elsevier Ltd. 2020. Vol. 6, № 5. 100135. DOI:10.1016/j.rineng.2020.100135.
5. Ngo T., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // *Composites Part B: Engineering.* 2018. Vol. 143. Pp. 111–132. DOI:10.1016/J.COMPOSITESB.2018.02.012.
6. Bos F., Wolfs R., Ahmed Z., Salet T. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing // *Virtual Phys. Prototyp.* 2016. Vol. 11, № 3. Pp. 209–225. DOI:10.1080/17452759.2016.1209867.
7. Nerella V., Krause M., Mechtcherine V. Practice-oriented buildability criteria for developing 3D-printable concretes in the context of digital construction // *Highlights.* 2019. № 8. 2018. Pp. 1–28. DOI:10.20944/PREPRINTS201808.0441.V1.
8. Zeina Malaeb, Hussein A. Hachem, Tourbah A., Maalouf T., Nader El Zarwi, Hamzeh F. 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design // *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 2015. Vol. 6, № 4. Pp. 14–22.
9. Taqdees Anjum, Poorvesh Dongre, Fozail Misbah, V. N. Nanyam. Purview of 3DP in the Indian Built Environment Sector // *Procedia Eng.* 2017. Vol. 196, № 6. P. 228–235. DOI:10.1016/J.PROENG.2017.07.194.
10. Краева А.А., Волкова Е.С., Шмарина С.В. Определение конкурентоспособности 3D-принтера марки «DESIGNER X PRO» // *Синергия Наук.* 2019. № 32. С. 24–30.
11. Чазов Е. Л., Грахов В. П. Разработка методического инструментария оценки конкурентоспособности промышленного предприятия на основе мониторинга рынка сбыта продукции // *Управленческий учет.* 2021. № 2. С. 65–72.

12. Акулова И.И., Славчева Г.С. Оценка конкурентоспособности строительных материалов и изделий: обоснование и апробация методики на примере цементов // Жилищное строительство. 2017. № 7. С. 9–12.

13. Макарова Л.В., Тарасов Р.В., Резевич К.С. Оценка конкурентоспособности строительной продукции // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. С. 17.

14. Ивановская И.В., Казанский А.В. Методические подходы к оценке конкурентоспособности продукции промышленного предприятия // Экономический журнал. 2020. № 2 (58). С. 6–19.

15. Овчаров А.В., Бабкина Т.В. Формирование комплексного подхода к оценке конкурентоспособности продукции промышленного предприятия // Креативная экономика. 2021. Т. 15. № 10. С. 3805–3822. DOI: 10.18334/ce.15.10.113698.

16. Маткова М. В., Милюшенко О. А. Обзор методов оценки конкурентоспособности предприятия с учетом специфики промышленного предприятия. // В сборнике: Актуальные тренды в экономике и финансах. Материалы межвузов-

ской научно-практической конференции магистрантов. Под редакцией В.А. Ковалева, А.И. Ковалева. 2019. С. 191–196.

17. Akulova I.I., Slavcheva G.S. A new approach to identifying top-priority step for increasing the building materials competitiveness // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. International science and technology conference «FarEastCon-2020». 2021. Vol. 1079. 032030. DOI:10.1088/1757-899X/1079/3/032030.

18. Белоусова Д.С. Понятие и сущность конкурентоспособности. Факторы, влияющие на конкурентоспособность // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. 2016. № 15-2. С. 72–76.

19. Акулова И.И., Славчева Г.С., Макарова Т.В. Техничко-экономическая оценка эффективности применения 3D-печати в жилищном строительстве // Жилищное строительство. 2019. № 12. С. 52–56. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-12-52-56.

20. Славчева Г.С., Акулова И.И., Вернигора И.В. Концепция и эффективность применения 3D-печати для дизайна городской среды // Жилищное строительство. 2020. № 3. С. 49–55. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-3-49-55.

#### Информация об авторах

**Славчева Галина Станиславовна**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: gslavcheva@yandex.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

**Акулова Инна Ивановна**, доктор экономических наук, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: akulovaii@yandex.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

**Юров Павел Юрьевич**, магистрант профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: yurov.py@yandex.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

Поступила 18.09.2022 г.

© Славчева Г.С., Акулова И.И., Юров П.Ю., 2023

**\*Slavcheva G.S., Akulova I.I., Yurov P.Y.**

Voronezh State Technical University

E-mail: gslavcheva@yandex.ru

## COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF 3D-BUILD PRINTER COMPETITIVENESS

**Abstract.** This article proposes a method for assessing the competitiveness of building 3D printers based on a comparison of their technical and technological characteristics and economic parameters. The methodology implements an integrated approach that takes into account a large number of comparison parameters of a different nature based on the use of relative indicators. The calculation takes into account the design characteristics of printers, the characteristics of the manufacturability of the printing process, the characteristics of printed building objects and the economic parameters of printers. So, for low-rise construction, the essential parameters are: printing speed, the ratio of the print area and the overall dimensions of the printer, the ability to work with low-flow mixtures and with various building mixtures without readjustment, reducing the defectiveness of the printed layer and energy consumption. The most competitive is the printer that provides more units of useful effect, determined by a set of technical and technological characteristics, per unit of costs

associated with the purchase of a printer, its energy consumption, the laboriousness of maintenance and installation and dismantling at a construction site. As a result of assessing the competitiveness of various types of printers, it was revealed that the leader for low-rise construction is the portal printer BOD2 2-2-2 of the Danish company COBOD BOD2. For printing building products and structures in a production environment, the FIXED robotic arm from the Netherlands has a competitive advantage. CyBe Construction. The considered approach to assessing the competitiveness of building 3D printers is of practical interest to their manufacturers. The new knowledge about the significance of the design solutions of 3D printers, obtained as a result of the implementation of the proposed methodology, creates strategic guidelines for domestic manufacturers.

**Keywords:** 3D-build printer, competitiveness, machine design, economic parameters.

## REFERENCES

1. Tay Y., Panda B., Paul S.C., Mohamed N.A.N., Tan M., Leong K. 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual Phys. Prototyp.* Taylor & Francis. 2017. Vol. 12, No. 3. Pp. 261–276. DOI:10.1080/17452759.2017.1326724.
2. Labonnote N., Rønquist A., Manum B., Rütger P. Additive Construction: state of the art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. Autom. Constr. Elsevier B.V., 2016. No. 9. Pp. 2017–2024. DOI:10.1016/J.AUTCON.2016.08.026.
3. Kamram M., Hussein A.B. 3D Printing Concrete Technology and Mechanics from Industrial Aspect. *Energy Policy*. 2020. No 3. Pp. 2–12.
4. Albar A., Chougan Mehdi, Al-Kheetan Mazen J., Swash M., Ghaffar S. Effective extrusion-based 3D printing system design for cementitious-based materials. *Results Eng.* Elsevier Ltd. 2020. Vol. 6, No. 5. 100135. DOI:10.1016/j.rineng.2020.100135.
5. Ngo T., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 143. Pp. 111–132. DOI:10.1016/J.COMPOSITESB.2018.02.012.
6. Bos F., Wolfs R., Ahmed Z., Salet T. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual Phys. Prototyp.* 2016. Vol. 11, No. 3. Pp. 209–225. DOI:10.1080/17452759.2016.1209867.
7. Nerella V., Krause M., Mechtcherine V. Practice-oriented buildability criteria for developing 3D-printable concretes in the context of digital construction. *Highlights*. 2019. No. 8. 2018. Pp. 1–28. DOI:10.20944/PREPRINTS201808.0441.V1.
8. Zeina Malaeb, Hussein A. Hachem, Tourbah A., Maalouf T., Nader El Zarwi, Hamzeh F. 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design. *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 2015. Vol. 6, No 4. Pp. 14–22.
9. Taqdees Anjum, Poorvesh Dongre, Fozail Misbah, V. N. Nanyam. Purview of 3DP in the Indian Built Environment Sector. *Procedia Eng.* 2017. Vol. 196, No. 6. Pp. 228–235. DOI:10.1016/J.PROENG.2017.07.194.
10. Kraeva A.A., Volkova E.S., Shmarina S.V. Assessing the competitiveness of the "DESIGNER X PRO". [Opredelenie konkurentosposobnosti 3D-printera marki «DESIGNER X PRO»]. *Sinergiya Nauk*. 2019. No. 32. Pp. 24–30. (rus)
11. Chazov E. L., Grahov V. P. Development of methodical toolkit of an estimation of competitiveness of industrial enterprise on the basis of monitoring of market of products. [Razrabotka metodicheskogo instrumentariya ocenki konkurentosposobnosti promyshlennogo predpriyatiya na osnove monitoringa rynka sbyta produkci]. *Upravlencheskij uchet*. 2021. No. 2–1. Pp. 65–72. (rus)
12. Akulova I.I., Slavcheva G.S. Assessment of competitiveness of building materials and products: justification and approbation of methods on the example of cements. [Ocenka konkurentosposobnosti stroitel'nyh materialov i izdelij: obosnovanie i aprobaciya metodiki na primere cementov]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2017. No. 7. Pp. 9–12. (rus)
13. Makarova L.V., Tarasov R.V., Rezevich K.S. Assessment of the competitiveness of the construction products. [Ocenka konkurentosposobnosti stroitel'noj produkcii]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. No. 1-1. P. 17. (rus)
14. Ivanovskaya I.V., Kazanskij A.V. Methodological approaches to assessing the competitiveness of industrial enterprise products. [Metodicheskie podhody k ocenke konkurentosposobnosti produkcii promyshlennogo predpriyatiya]. *Ekonomicheskij zhurnal*. 2020. No. 2 (58). Pp. 6–19. (rus)
15. Ovcharov A.V., Babkina T.V. An integrated approach to assessing the competitiveness of industrial enterprise products [Formirovanie kompleksnogo podhoda k ocenke konkurentosposobnosti produkcii promyshlennogo predpriyatiya]. *Kreativnaya ekonomika*. 2021. Vol. 15. No. 10. Pp. 3805–3822. DOI: 10.18334/ce.15.10.113698 (rus)
16. Matkova M.V., Milyushenko O.A. Review of metrics for assessing the competitiveness of products taking into account the specifics of the industrial enterprise [Obzor metodov ocenki

konkurentosposobnosti predpriyatiya s uchetom specifiki promyshlennogo predpriyatiya] *Materialy mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii magistrantov. Pod redakciej V.A. Kovaleva, A.I. Kovaleva.* 2019. Pp. 191–196. (rus)

17. Akulova I.I., Slavcheva G.S. A new approach to identifying top-priority step for increasing the building materials competitiveness. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. International science and technology conference «FarEastCon-2020».* 2021. Vol. 1079. 032030. DOI:10.1088/1757-899X/1079/3/032030.

18. Belousova D.S. The concept and essence of competitiveness. Factors affecting the competitiveness [Ponyatie i sushchnost' konkurentosposobnosti. Faktory, vliyayushchie na konkurentosposobnost']. *Fundamental'nye i*

*prikladnye issledovaniya v sovremennom mire.* 2016. No. 15-2. Pp. 72–76. (rus)

19. Akulova I.I., Slavcheva G.S., Makarova T.V. Technical and economic estimate of efficiency of using 3d printing in housing construction [Tekhniko-ekonomicheskaya ocenka effektivnosti primeneniya 3D-pechati v zhilishchnom stroitel'stve]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo.* 2019. No. 12. Pp. 52–56. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-12-52-56. (rus)

20. Slavcheva G.S., Akulova I.I., Vernigora I.V. Concept and effectiveness of 3D printing for urban environment design [Konceptiya i effektivnost' primeneniya 3D-pechati dlya dizajna gorodskoj sredy]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo.* 2020. No. 3. Pp. 49–55. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-3-49-55 (rus)

#### *Information about the authors*

**Slavcheva, Galina S.** DSc, Professor, department of technology of building materials, products and structures. E-mail: gslavcheva@yandex.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, 20 let Oktyabrya st., 84.

**Akulova, Inna I.** DSc, Professor, department of technology of building materials, products and structures. E-mail: akulovaii@yandex.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, 20 let Oktyabrya st., 84.

**Yurov, Pavel Y.** Master student, department of technology of building materials, products and structures. E-mail: yurov.py@yandex.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, 20 let Oktyabrya st., 84.

*Received 18.09.2022*

#### **Для цитирования:**

Славчева Г.С., Акулова И.И., Юров П.Ю. Комплексная оценка конкурентоспособности строительных 3D-принтеров // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 1. С. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-8-18

#### **For citation:**

Slavcheva G.S., Akulova I.I., Yurov P.Y. Comprehensive assessment of 3D-build printer competitiveness. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.* 2023. No. 1. Pp. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-8-18

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-19-31

*\*Гольцов А.Б.**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**\*E-mail: abgolcov@gmail.com*

## ВЫЯВЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАВНОМЕРНОСТЬ ВСАСЫВАНИЯ АСПИРАЦИОННЫМИ ВОРОНКАМИ

**Аннотация.** Эффективная локализация источников пылевыделения возможна за счет использования комплекса обеспыливающей вентиляции, включающего в себя аспирацию, общеобменную вентиляцию и средства борьбы со вторичным пылеобразованием. Системы аспирации обеспечивают удаление запыленного воздуха с последующей его очисткой и утилизацию уловленной пыли. Создание разряжения в укрытиях технологического оборудования способствует не выбиванию пыли в воздух рабочей зоны.

Системы аспирации включают в себя различные функциональные элементы: вентиляторы, пылеуловители, воздухопроводы, аспирационные укрытия и воронки (патрубки). Ключевыми факторами, влияющими на энергетические затраты системами аспирации, являются объемы и характеристики обрабатываемого воздуха, аэродинамическое сопротивление и коэффициент полезного действия применяемого оборудования.

Данная статья посвящена выявлению факторов, влияющих на равномерность удаления воздуха из укрытий аспирационными патрубками и путей их совершенствования с использованием методов численного CFD-моделирования. Понимание факторов, оказывающих влияние на равномерность удаления запыленного воздуха из укрытий, позволит оценить степень неравномерности всасывания, выделить критерии её оценки, предложить технические решения, способствующие выравниванию потоков применительно к аспирационным системам, показать эффективность применения методов численного CFD-моделирования путем сравнения со справочными и экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** аспирация, аспирационный патрубок, пылеудаление, локализация пылевыделений, равномерный поток.

**Введение.** Рабочие элементы систем аспирации для эффективной работы должны располагаться равномерно по сечению рабочей зоны. Данные элементы систем аспирации такие как укрытия, воздухопроводы, вентиляторы соединяются между собой при помощи конфузоров и диффузоров и других элементов. В большинстве случаев площади сечений на входе или выходе рабочего потока значительно отличаются, в результате чего воздушный поток не заполняет всего сечения и поступает к рабочим элементам узкой струей, соответственно скорость в одном месте значительно больше, а в другом значительно меньше расчетной или близка к нулю. Очевидно, что неравномерное распределение рабочих потоков по сечению ухудшает технологические характеристики в сравнении с равномерным движением потока или приводит к увеличению размера аппарата.

Вопросу формирования равномерного распределения потоков вытяжного и приточного воздуха посвящено множество исследований [1–11] данные решения широко применяются в воздухопроводах равномерной подачи всасывания. Применение данных принципов в аспирационных отсосах, вытяжных зонтах и укрытиях целесообразно и имеет широкое поле для исследований и внедрения. Данные решения могут мини-

мальными ресурсами обеспечить высокую эффективность и устранить недостаток неэффективных конструктивных решений. Целью работы является выявление факторов, оказывающих влияние на равномерность всасывания аспирационными патрубками, подключающими воздухопроводы к аспирационным укрытиям технологического оборудования с использованием методов CFD-моделирования, а также сопоставление полученных результатов со справочными данными и выработки путей совершенствования способствующих выравниванию воздушных потоков.

Аспирационные воронки в большинстве случаев представляют из себя конфузор, переход с большего сечения на меньшее в котором динамическое давление возрастает, а статическое уменьшается. Если конфузор имеет небольшой угол раскрытия, то вихреобразование обычно не происходит или оно незначительное, и потери давления в основном связаны с возрастанием скорости, при больших значениях угла раскрытия образуются застойные зоны с вихрями. А также спектр всасывающего факела охватывает не всю область всасывания и здесь формируется неравномерный поток, в этом случае отношение  $(V_{max}/V_{av})$  максимальной скорости к средней в плоскости всасывания возрастает.

Целью статьи является выявление факторов, влияющих на равномерность всасывания аспирационными воронками и разработка конструктивных предложений их совершенствования с использованием методов численного CFD-моделирования.

**Материалы и методы.** Исследования проводились при помощи CFD-моделирования и в ходе лабораторных экспериментов. Использование методов CFD-моделирования позволяет повысить скорость, точность и общую эффективность разработки, и совершенствование различных устройств [12–21]. Вычислительный эксперимент осуществлялся в среде Solidworks Flow Simulation. В математической модели заложены уравнения неразрывности, движения, а также с учётом турбулентной энергии и диссипации турбулентности (k-ε модель турбулентности, интенсивность 0,1 % и масштаб турбулентности 0,002

м). Уравнения решают на неструктурированных адаптированных к телу прямоугольных сетках. Для выполнения вычислительного эксперимента в среде SolidWorks были построены пространственные твердотельные модели аспирационного отсоса (патрубка) и задана расчетная область моделирования воздушных течений. Экспериментальные исследования проводились для валидации результатов вычислительного исследования. При валидации проводилось сопоставление полученных значений исследуемых факторов и отклика в ходе вычислительного и лабораторного эксперимента.

В работе произведен анализ влияния различных факторов (угла раскрытия  $\beta$ ; соотношения площадей  $f_{out}/f_{in}$ ; высота воронки  $h$ ; соотношение сторон,  $A/B$ ; площади входа  $f_{in}$  и выхода  $f_{out}$ ; скорости  $V_{out}$ ) на отношение максимальной скорости в плоскости всасывания к средней  $V_{max}/V_{av}$ .

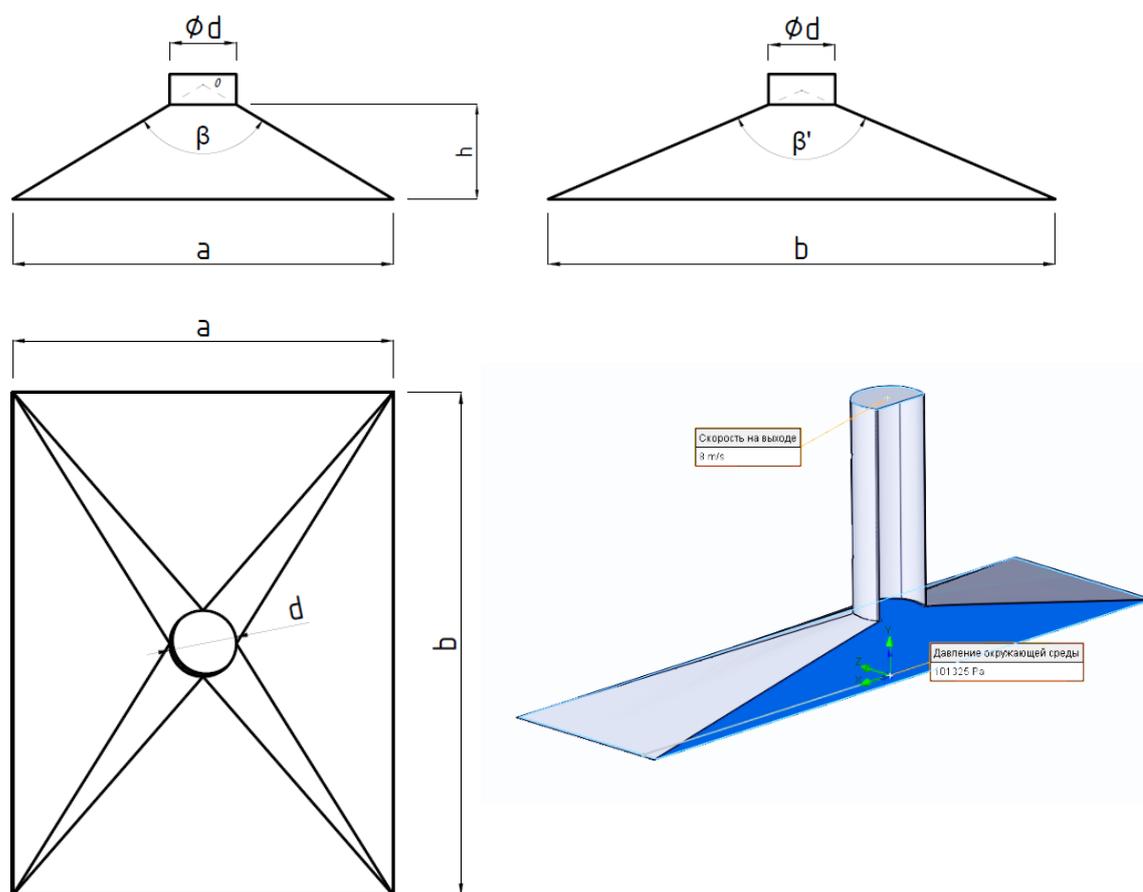


Рис. 1. Общий вид исследуемой аспирационной воронки. Граничные условия исследуемой модели

Факторы варьировались в следующем диапазоне:  $d=0,1; 0,2; 0,355\text{ м}$ ;  $V_{out}=1; 8; 12\text{ м/с}$ ;  $A=0,1; 0,5; 1\text{ м}$ ;  $h=0,1; 0,2; 0,3; 0,4\text{ м}$ . Все остальные факторы рассчитывались исходя из расчетных соотношений.

В качестве граничных условий принята скорость всасывания  $V_{out}$  в плоскости вытяжного

воздуховода, давление окружающей среды при стандартных условиях в плоскости всасывания и различные конструкции вытяжного зонта.

Для подтверждения проведённых численных исследований и валидации численных моде-

лей были проведены сравнения численного расчета и эксперимента для нескольких конструкций аспирационных отсосов (патрубках).

Экспериментальное исследование проводилось на специально разработанном лабораторном стенде (рис. 2), близком по характеристикам к промышленным вытяжным устройствам систем местной вытяжной вентиляции. Лабораторная установка состоит из вентилятора 1, воздуховода 2, к которому присоединяется исследуемая аспирационная воронка 4, установленная на укрытии 9.

Натурный эксперимент проводился в соответствии с ГОСТ 12.3.018-79 «Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний» после наступления стационарного режима работы вентилятора, при этом измерялись следующие параметры:

1. Параметры микроклимата (барометрическое давление, температура).
2. Динамическое давление потока воздуха в четырех точках плоскости измерений.
3. Скорость воздуха в плоскости всасывания аспирационной воронки.

Барометрическое давление воздуха определялось с помощью барометра – anerоида БААН, ГОСТ 6466-53, пределы измерения 0...110 кПа,

погрешность измерения  $\pm 60$  Па. Температура воздуха измерялась сухим термометром аспирационного психрометра типа МВ – 4М ГОСТ 6468-58, пределы измерения 0...70 °С с точностью до 0,2 °С. Скорость воздуха в воздуховоде определялась с помощью пневмометрической трубки Пито-Прандтля (тарировочный коэффициент трубки  $k = 1$ ) путем измерения перепада давления. Перепад давления измерялся дифференциальным микроманометром Testo 510, погрешность  $\pm 0,03$  гПа (0...0,30 гПа). Скорость и температура воздуха в плоскости всасывания аспирационной воронкой выполнена с помощью термоанемометра Testo 425, диапазон измерения скорости 0...+20 м/с, погрешность  $\pm(0,03$  м/с + 5 % от изм. знач.) и температуры  $-20 \dots +70$  °С, погрешность  $\pm 0,5$  °С (0...+60 °С).

Измерения скорости в плоскости всасывания аспирационной воронки проводились при барометрическом давлении 98 600 Па и температуре воздуха 23,5 °С. Плотность воздуха определялась из формулы  $\rho = 1.293 \cdot 273 / (273 + t)$  кг/м<sup>3</sup>.

Схема и фото экспериментальной установки для валидации проведенных исследований представлены на рис. 2.

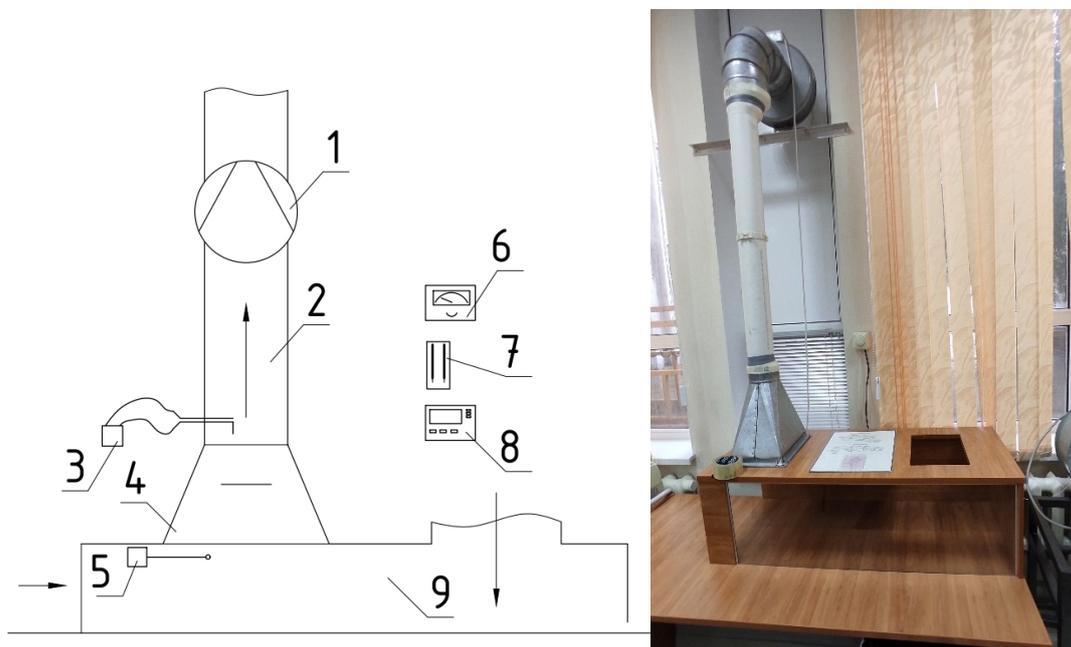


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки по исследованию работы вытяжного зонта равномерного всасывания: 1 – вентилятор; 2 – воздуховод аспирационной системы; 3 – дифманометр TESTO 510; 4 – исследуемая аспирационная воронка; 5 – термоанемометр TESTO 425; 6 – барометр-анероид БААН-1; 7 – аспирационный психрометр МВ-4М; 8 – прибор комбинированный TESTO-622 (абсолютное давление, температура, влажность); 9 – аспирационное укрытие

**Основная часть.** С уменьшением площади вытяжного воздуховода ( $f_{out}$ ) по отношению к площади входа в аспирационную воронку ( $f_{in}$ ) возрастает неравномерность всасывания, но в

значительной степени величина  $V_{max}/V_{av}$  возрастает в сочетании с уменьшением высоты зонта и возрастании угла раскрытия  $\beta_{av}$ .

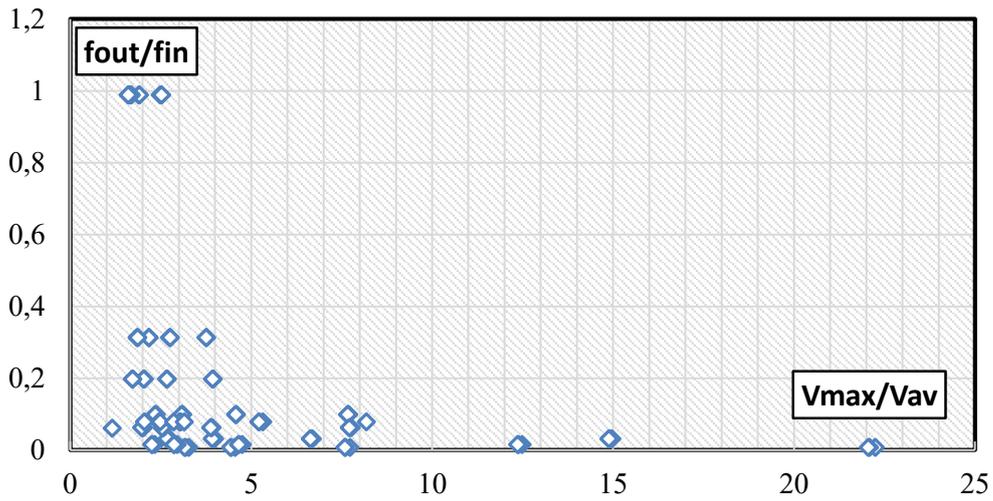


Рис. 3. Результаты расчета  $V_{max}/V_{av}$  в зависимости от соотношения площади выхода к площади входа

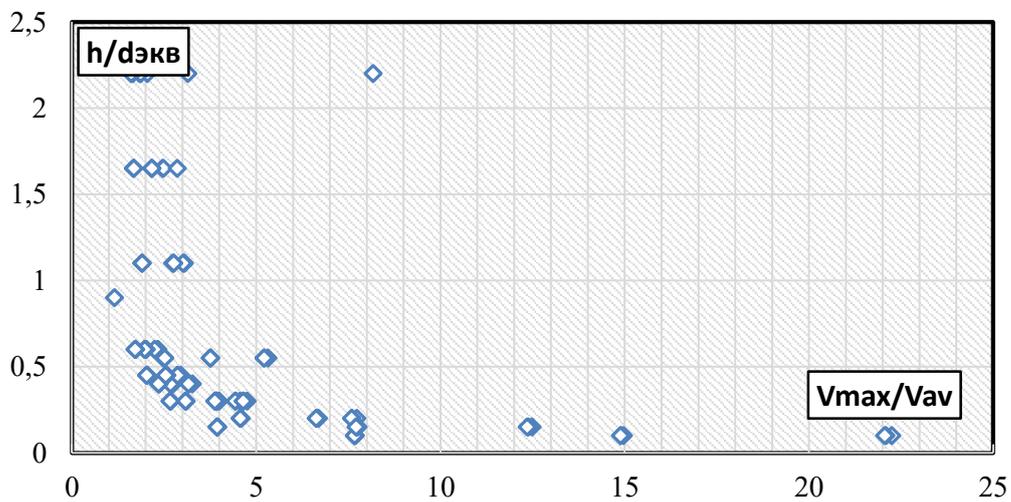


Рис. 4. Результаты расчета  $V_{max}/V_{av}$  в зависимости от отношения высоты аспирационной воронки к эквивалентному диаметру в плоскости всасывания

Анализ зависимости  $V_{max}/V_{av}$  относительно соотношения высоты зонта и эквивалентного диаметра аспирационной воронки в плоскости

всасывания  $h/d_s$  показал, что при  $h/d_s < 0,25$   $V_{max}/V_{av}$  возрастает более 5.

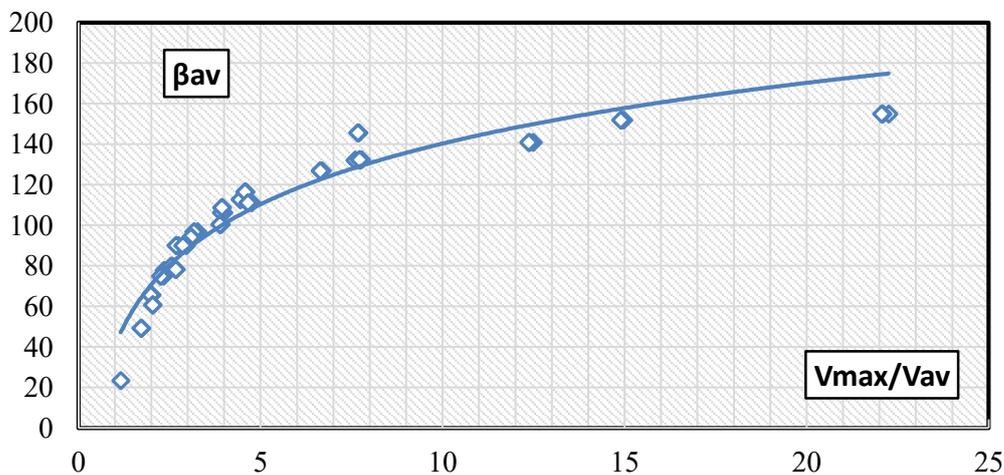


Рис. 5. Результаты расчета  $V_{max}/V_{av}$  в зависимости от среднего значения угла раскрытия зонта

В исследовании рассматривался квадратный ( $A/B=1$ ) и прямоугольный зонт ( $A/B<1$ ), был введено понятие среднего угла раскрытия по двум сторонам  $\beta_{av}$ . По результатам проведенных расчетов видно, что с увеличением угла раскрытия возрастает неравномерность всасывания, то есть отношение максимальной к средней скорости в плоскости зонта возрастает до 22, при этом с углом раскрытия  $\beta_{av}<60^\circ$ ,  $V_{max}/V_{av}<2,5$ .  $V_{max}/V_{av}$

резко возрастает с увеличением угла  $\beta_{av}>100^\circ$  от 4 до 23. Оснащение вытяжных зонтов выравнивающими устройствами исходя из полученных данных целесообразно при угле раскрытия более  $60^\circ$ , а при углах более  $100^\circ$  необходимое условие. В первую очередь данные устройства необходимы для снижения пылеуноса из укрытий технологического оборудования.

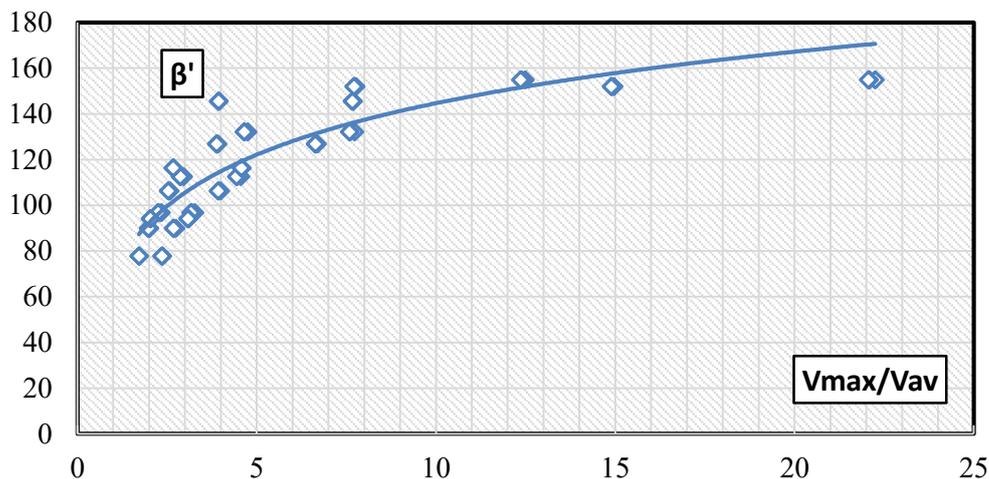


Рис. 6. Результаты расчета  $V_{max}/V_{av}$  в зависимости от угла раскрытия зонта  $\beta'$

Угол раскрытия  $\beta'$  исследовался в диапазоне  $77^\circ$ – $155^\circ$ . В данном случае наблюдается возрастание  $V_{max}/V_{av}$  с увеличением угла раскрытия  $\beta'$ , наблюдается логарифмическая зависимость.

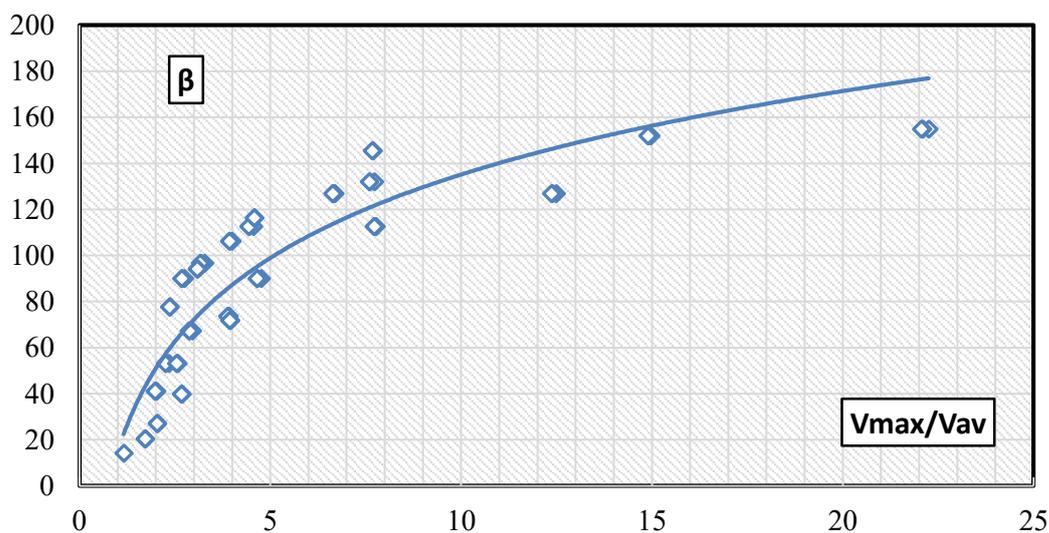


Рис. 7. Результаты расчета  $V_{max}/V_{av}$  в зависимости от угла раскрытия зонта  $\beta$

Угол раскрытия  $\beta$  исследовался в диапазоне  $15^\circ$ – $155^\circ$ . В данном случае наблюдается возрастание  $V_{max}/V_{av}$  с увеличением угла раскрытия  $\beta$ , наблюдается логарифмическая зависимость.

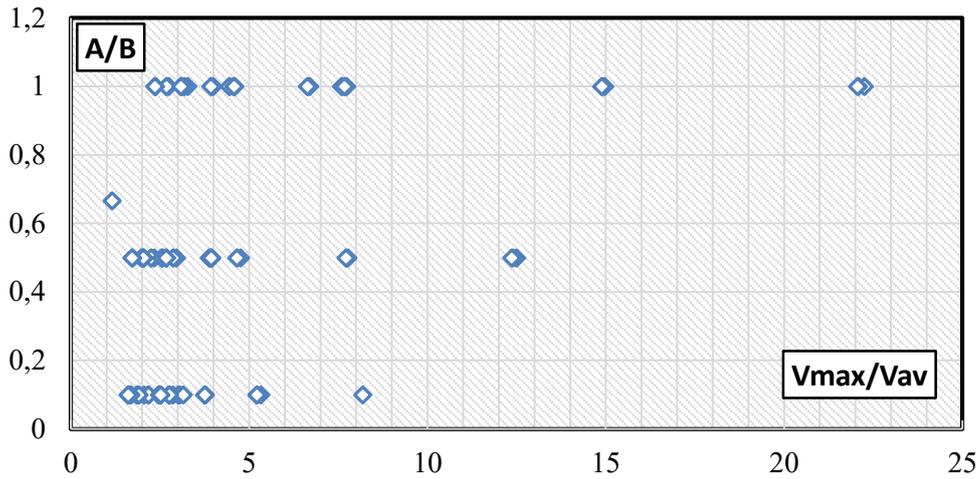


Рис. 8. Результаты расчета  $V_{max}/V_{av}$  в зависимости от соотношения сторон вытяжного зонта A/B

Влияние соотношения A/B на величину  $V_{max}/V_{av}$  незначительно и зависит в большей степени от других факторов, в частности от угла раскрытия. Однако при использовании прямоугольного отсоса, при снижении  $A/B < 1$  наблюдается

снижение неравномерности всасывания  $V_{max}/V_{av}$ , что объясняется увеличением  $f_{out}/f_{in}$  и снижением среднего угла раскрытия  $\beta_{av}$ .

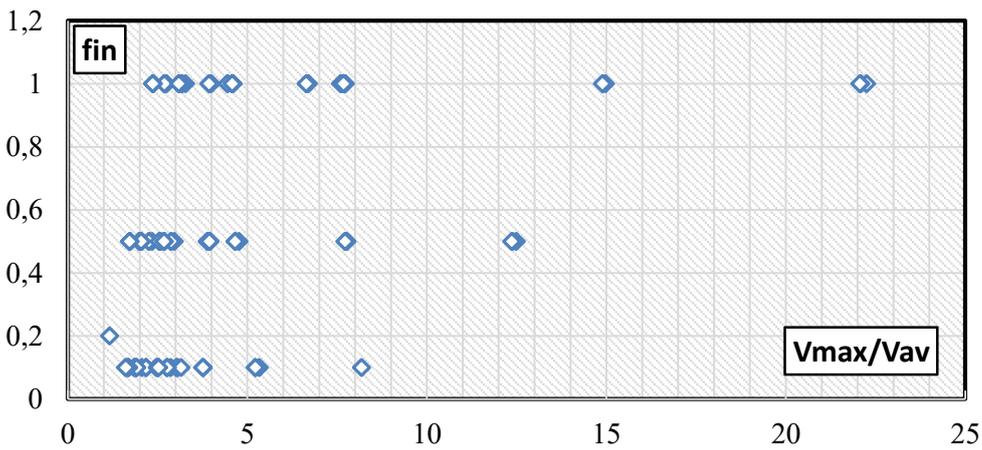


Рис. 9. Результаты расчета  $V_{max}/V_{av}$  в зависимости от площади входа в аспирационную воронку

С увеличением площади всасывающей поверхности  $f_{in}$  вытяжного зонта происходит повышение неравномерности всасывания  $V_{max}/V_{av}$ , по-

ток воздуха движется преимущественно в области всасывающего патрубка охватывая меньшую площадь вытяжной воронки, в следствие чего возрастает максимальная скорость  $V_{max}$ .

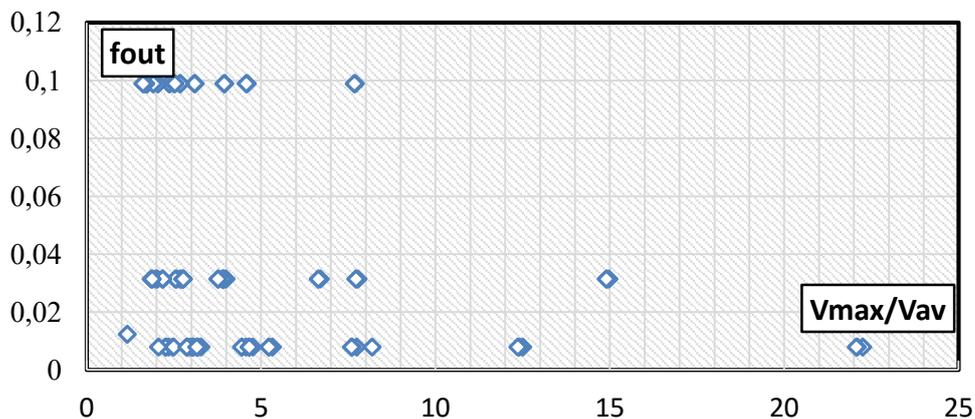


Рис. 10. Результаты расчета  $V_{max}/V_{av}$  в зависимости от площади выхода (вытяжного воздуховода)

Возрастание площади вытяжного воздуховода, присоединительного патрубка, приводит к снижению  $V_{max}/V_{av}$ , воздух начинает двигаться более равномерно в плоскости всасывания. Стоит отметить, что на спектр всасывания и как следствие на неравномерность всасывания окажет значительное влияние способ подключения зонта, особенности технологического процесса, конструктивные особенности укрытия. Но в целом исследуемые конструктивно-режимные характеристики вытяжного зонта отражают влияние основных факторов на равномерность всасывания.

Возрастание высоты зонта способствует выравниванию потока воздуха в плоскости всасывания и снижению  $V_{max}/V_{av}$ , что связано со снижением угла раскрытия вытяжного зонта. В ходе исследования изменялась скорость всасывания в вытяжном патрубке (воздуховоде) от 1 до 12 м/с, как и ожидалось скорость, а значит и расход воздуха не влияет на неравномерность всасывания в исследуемом диапазоне, для всех характерных случаев наблюдается одинаковые значения  $V_{max}/V_{av}$ .

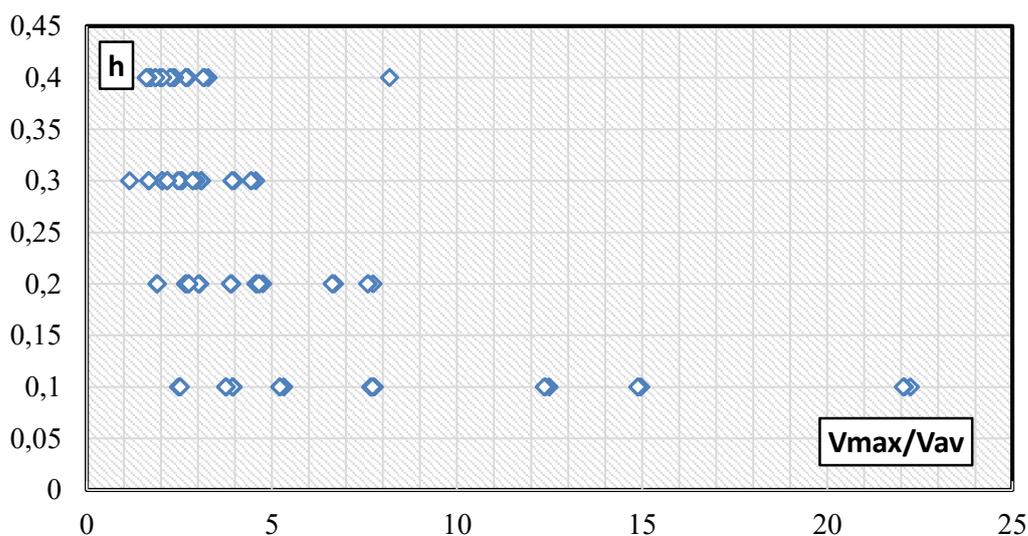


Рис. 11. Результаты расчета  $V_{max}/V_{av}$  в зависимости от высоты вытяжного зонта

Ряд результатов проведенных вычислительных экспериментов представлен на рис. 12–19.

Здесь можно увидеть картины поверхностей распределения скоростей в плоскости всасывания аспирационной воронки.

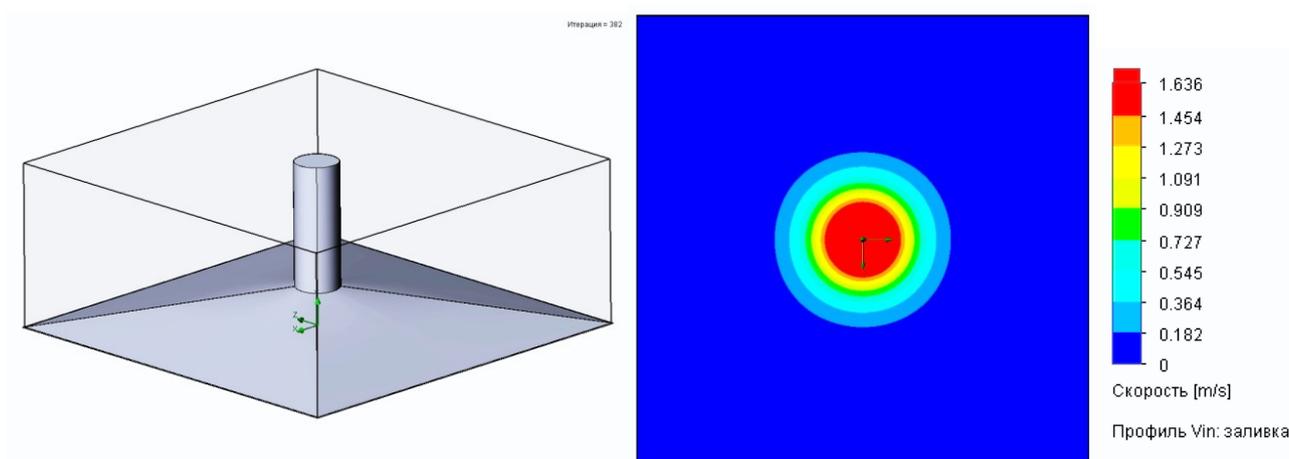


Рис. 12. Общий вид исследуемой конструкции аспирационной воронки и результаты построения профиля скоростей в плоскости всасывания при следующих факторах:  $d=0,1\text{ м}$ ;  $V_{out}=12\text{ м/с}$ ;  $A=1\text{ м}$ ;  $h=0,1\text{ м}$ .  
Отклик:  $V_{max}/V_{av}=22,06$ ;  $V_{max}=2,45\text{ м/с}$

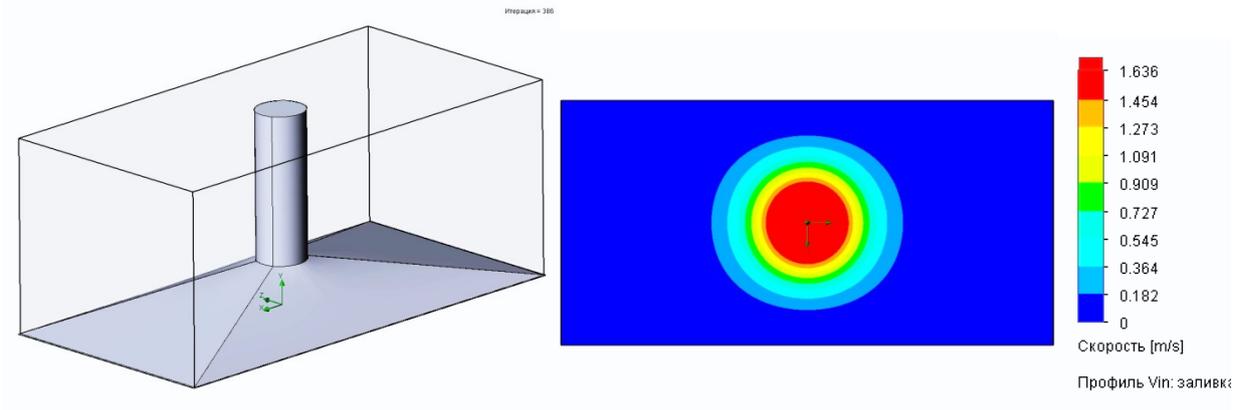


Рис. 13. Общий вид исследуемой конструкции аспирационной воронки и результаты построения профиля скоростей в плоскости всасывания при следующих факторах:  $d=0,1\text{ м}$ ;  $V_{out}=12\text{ м/с}$ ;  $A=0,5\text{ м}$ ;  $h=0,1\text{ м}$ .  
Отклик:  $V_{max}/V_{av}=12,38$ ;  $V_{max}=2,57\text{ м/с}$

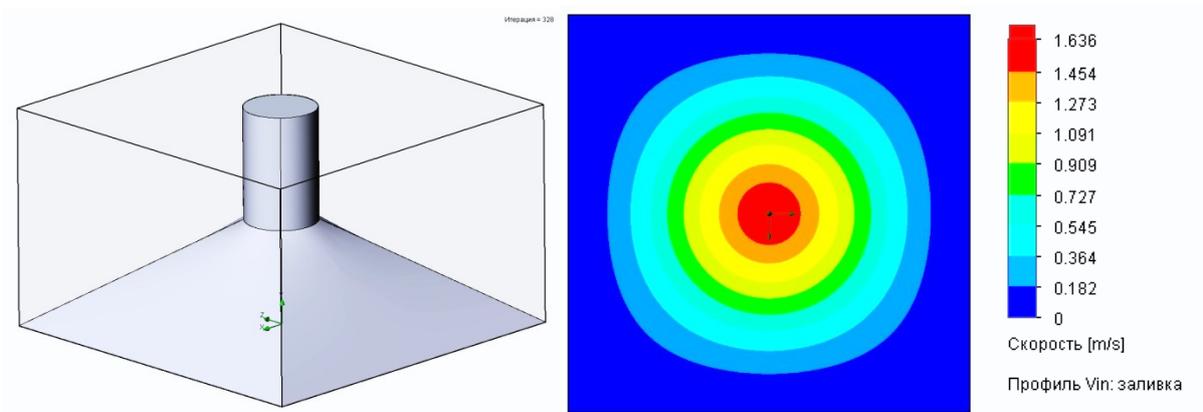


Рис. 14. Общий вид исследуемой конструкции аспирационной воронки и результаты построения профиля скоростей в плоскости всасывания при следующих факторах:  $d=0,2\text{ м}$ ;  $V_{out}=12\text{ м/с}$ ;  $A=1\text{ м}$ ;  $h=0,3\text{ м}$ .  
Отклик:  $V_{max}/V_{av}=3,93$ ;  $V_{max}=1,5\text{ м/с}$

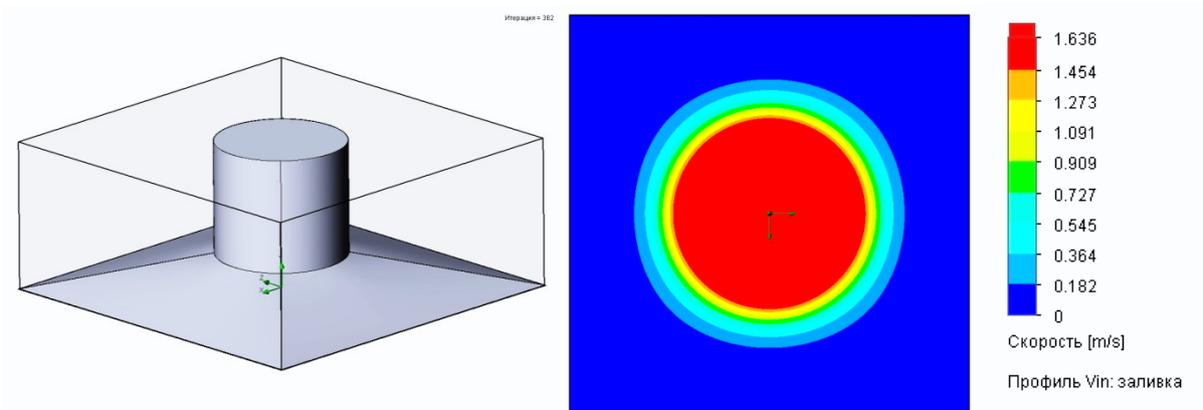


Рис. 15. Общий вид исследуемой конструкции аспирационной воронки и результаты построения профиля скоростей в плоскости всасывания при следующих факторах:  $d=0,355\text{ м}$ ;  $V_{out}=8\text{ м/с}$ ;  $A=1\text{ м}$ ;  $h=0,3\text{ м}$ .  
Отклик:  $V_{max}/V_{av}=3,93$ ;  $V_{max}=6,28\text{ м/с}$

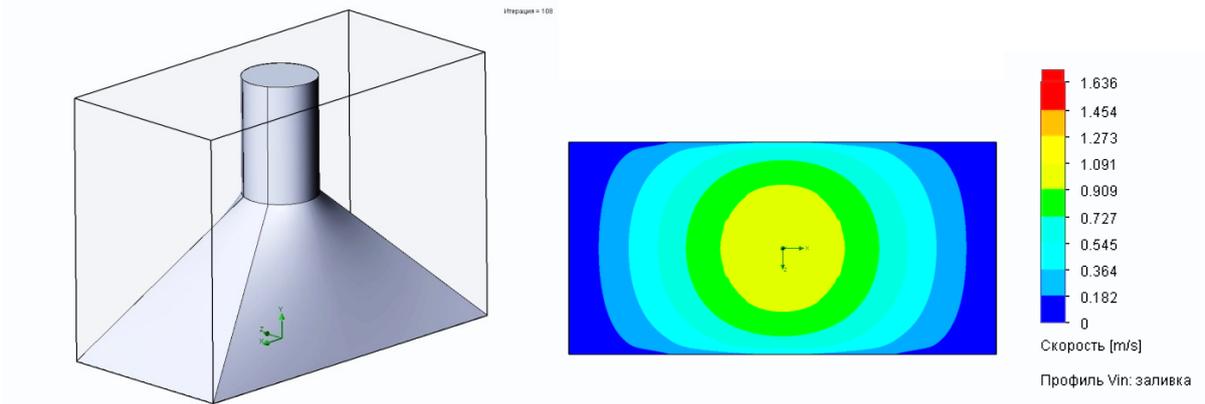


Рис. 16. Общий вид исследуемой конструкции аспирационной воронки и результаты построения профиля скоростей в плоскости всасывания при следующих факторах:  $d=0,2$  м;  $V_{out}=8$  м/с;  $A=0,5$  м;  $h=0,4$  м.  
Отклик:  $V_{max}/V_{av}=1,98$ ;  $V_{max}=1$  м/с

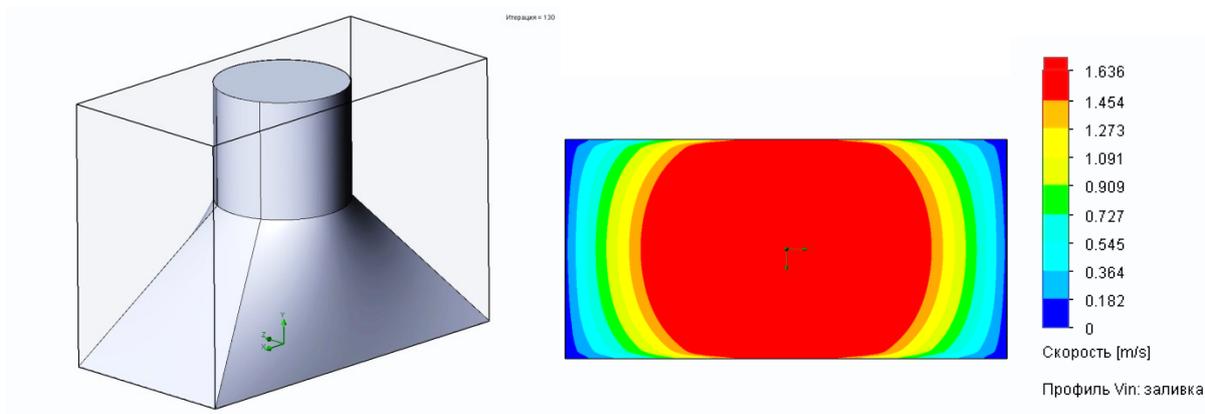


Рис. 17. Общий вид исследуемой конструкции аспирационной воронки и результаты построения профиля скоростей в плоскости всасывания при следующих факторах:  $d=0,355$  м;  $V_{out}=8$  м/с;  $A=0,5$  м;  $h=0,4$  м.  
Отклик:  $V_{max}/V_{av}=1,72$ ;  $V_{max}=2,73$  м/с

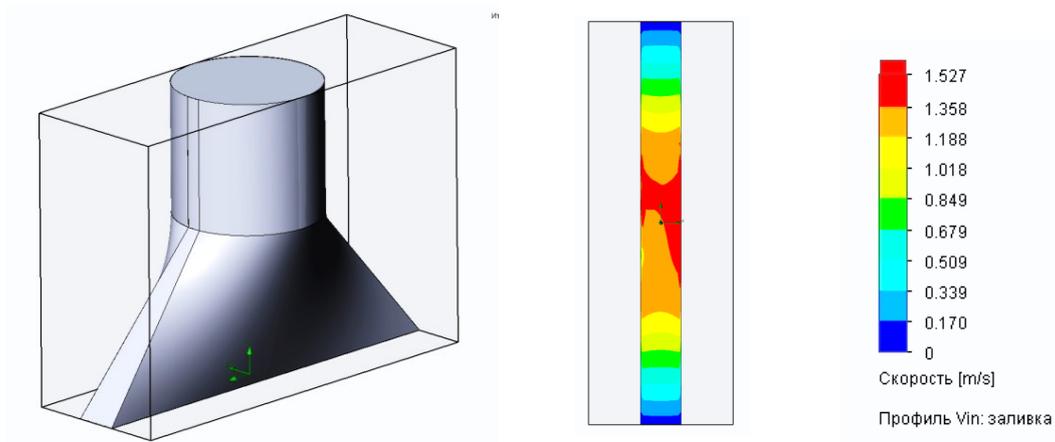


Рис. 18. Общий вид исследуемой конструкции аспирационной воронки и результаты построения профиля скоростей в плоскости всасывания при следующих факторах:  $d=0,355$  м;  $V_{out}=1$  м/с;  $A=0,1$  м;  $h=0,4$  м.  
Отклик:  $V_{max}/V_{av}=1,65$ ;  $V_{max}=1,63$  м/с

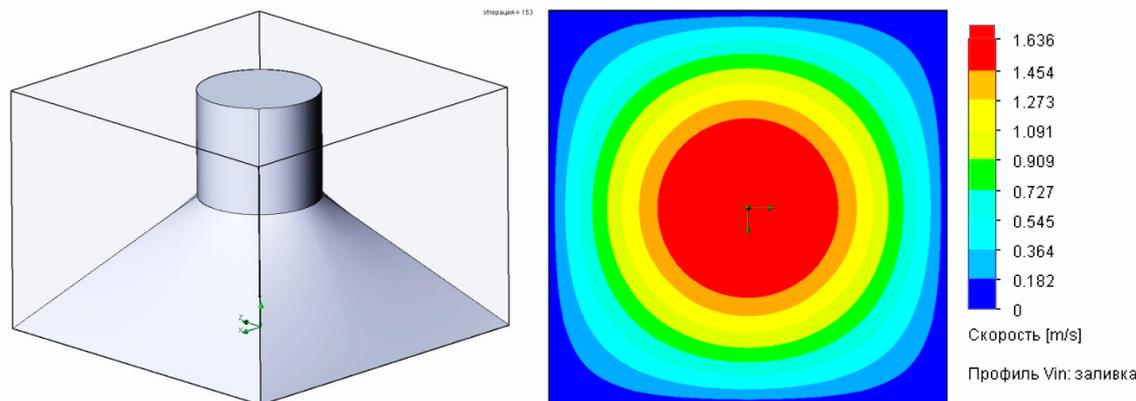


Рис. 19. Общий вид исследуемой конструкции аспирационной воронки и результаты построения профиля скоростей в плоскости всасывания при следующих факторах:  $d=0,355$  м;  $V_{out}=8$  м/с;  $A=1$  м;  $h=0,4$  м. Отклик:  $V_{max}/V_{av}=2,36$ ;  $V_{max}=1,87$  м/с

### Выводы.

1. Основными факторами, оказывающими влияние на неравномерность всасывания, являются углы раскрытия зонты ( $\beta_{av}$ ,  $\beta'$ ,  $\beta$ ) и соотношение площадей  $f_{out}/f_{in}$ . Повышение угла раскрытия способствует формированию вихревых зон и неэффективному распределению потока воздуха в аспирационной воронке, что и приводит к повышению скорости в аспирационной воронке и повышенному пылеуносу.

2. При углах раскрытия более  $60^\circ$  целесообразно использовать выравнивающие устройства, способствующие более эффективному распределению воздушного потока в аспирационной воронке путем выравнивания скорости по всему всасывающему сечению.

3. Выравнивание потоков в аспирационной воронке можно добиться за счет изменения площади всасывающего сечения и сохранения разности статических давлений по длине.

**Источник финансирования.** Грант Президента для научных школ НШ-25.2022.4.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации. Санкт-Петербург: изд-во Химиздат, 2005. 659 с.
2. Талиев В.Н. Аэродинамика вентиляции. М.: Стройиздат, 1954. 288 с.
3. Аверкова О.А., Логачев К.И., Уваров В.А. Энергосбережение в системах вытяжной вентиляции // Строительство и техногенная безопасность. 2018. №11 (63). С. 137–145
4. Идельчик И.Е., Штейнберг М.О. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
5. Идельчик И.Е. Аэродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов). М.: Машиностроение, 1983. 351 с.

6. Ходаков И.В. Численное и экспериментальное исследование отрыва потока на входе во всасывающие каналы с механическими экранами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 3. С. 6–12.

7. Баландина Л.Я., Шарпет В.Э. Пути повышения энергоэффективности способов воздухораспределения // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2012. № 5. С. 10–17.

8. Kosonen R., Mustakallio P. Воздухораспределение в школьных классах // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2016. № 1. С. 30–39.

9. Зимин А.В. Системы воздухораспределения камер хранения плодоовощной продукции // Холодильная техника и технология. 2015. Т. 51. № 3. С. 10–13. DOI 10.15673/0453-8307.3/2015.39271.

10. Казаков Б.П., Шалимов А.В. Сравнительный анализ методов расчета воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях // Горное эхо. 2009. № 1(35). С. 17–20.

11. Королева Т.И., Ланкович С.В., Ковалевский П.Е., Яковенко С.А. Исследование способов воздухораспределения текстильными воздуховодами // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: сборник статей международной научной конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета (Новополоцк, 05-06 апреля 2018г.), Новополоцк: Учреждение образования «Полоцкий государственный университет». 2018. С. 328–332.

12. Зиганшин А.М., Бадыкова Л.Н. Численное моделирование течения в профилированном вентиляционном тройнике на слиянии // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 6(702). С. 41–48.

13. Balestrin E., Decker R.K., Noriler D., Bastos J.C.S.C., Meier H.F. An Alternative for the Collection of Small Particles in Cyclones: Experimental Analysis and CFD Modeling // Separation and Purification Technology. 2017. Vol. 184. Pp. 54–65. doi: 10.1016/j.seppur.2017.04.023

14. Wang P.F., Gao R.Z., Liu R.H., Yang F.Q. CFD-Based Optimization of the Installation Location of the Wall-Mounted Air Duct in a Fully Mechanized Excavation Face // Process Safety and Environmental Protection. 2020. Vol. 141. Pp. 234–245. doi: 10.1016/j.psep.2020.04.049

15. Ganegama Bogodage S., Leung A.Y.T. CFD simulation of cyclone separators to reduce air pollution // Powder Technology. 2015. (286). Pp. 488–506.

16. Katare P. CFD analysis of cyclone separator used for fine filtration in separation industry // Case Studies in Thermal Engineering. 2021. (28). Pp. 101384.

17. Logachev K.I., Puzanok A.I., Zorya V.U. Numerical study of aerosol dust behaviour in aspiration bunker // Proceedings European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2006. Egmond aan Zee. The Netherlands. 2006. 11 p.

18. Нагорная А.Н., Денисюк Е.В. CFD-моделирование теплового и воздушного режима кинотеатра // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. Т. 13. № 2. С. 61–64.

19. Хохуля М.С., Фомин А.В. CFD моделирование разделения минеральных частиц в гидравлическом сепараторе с наклонными пластинами // Труды Кольского научного центра РАН. 2014. № 5(24). С. 239–245.

20. Зубанов В.М., Шаблий Л.М. CFD-моделирование процессов в насосе высокого давления окислителя турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2014. № 5-1(47). С. 148–153.

21. Арбатский А.А., Глазов В.С. Расчет систем вентиляции производственных и общественных зданий с применением средств CFD-моделирования // Современные задачи инженерных наук: сборник научных трудов VI-ого Международного научно-технического Симпозиума «Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии СЭТТ - 2017» (Москва, 11–12 октября 2017 г.). М.: ФГБОУ ВПО МГУДиТ. 2017. С. 176–180.

#### Информация об авторах

**Гольцов Александр Борисович**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: abgolcov@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 21.10.2022 г.

© Гольцов А.Б., 2023

**Goltsov A.B.**

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

*E-mail: abgolcov@gmail.com*

## IDENTIFICATION OF FACTORS AFFECTING THE UNIFORMITY OF SUCTION BY SUCTION FUNNEL

**Abstract.** *Effective localization of dust sources is possible through the use of a dust-removing ventilation complex, which includes aspiration, general ventilation and secondary dust control. Aspiration systems ensure the removal of dusty air with its subsequent purification and utilization of the trapped dust. The creation of vacuum in the shelters of technological equipment helps to prevent dust from being knocked out into the air of the working area.*

*Aspiration systems include various functional elements: fans, dust collectors, air ducts, aspiration shelters and funnels (pipes). The key factors affecting the energy costs of aspiration systems are the volumes and characteristics of the treated air, aerodynamic drag and the efficiency of the equipment used.*

*This article is devoted to identifying factors that affect the uniformity of air removal from shelters by aspiration nozzles and ways to improve them using numerical CFD modeling methods. Understanding the factors that affect the uniformity of the removal of dusty air from shelters will allow us to assess the degree of uneven suction, highlight the criteria for its assessment, propose technical solutions that help equalize flows in relation to aspiration systems, show the effectiveness of numerical CFD modeling methods by comparing with reference and experimental data.*

**Keywords:** *aspiration, suction pipe, dust removal, localization of dust emissions, uniform flow.*

## REFERENCES

1. Logachev I.N., Logachev K.I. Aerodynamic fundamentals of aspiration [Ae`ro-dinamicheskie osnovy` aspiracii]. St. Petersburg: Himizdat, 2005. 659 p. (rus)
2. Taliev V.N. Aerodynamic ventilation [Ae`ro-dinamika ventilyacii]. M.: Stroyizdat, 1954. 288 p. (rus)
3. Averkova O.A., Logachev K.I., Uvarov V.A. Energy saving in exhaust ventilation systems [E`nergoberezhenie v sistemax vy`tyazhnoj ventilyacii]. Construction and technogenic safety. 2018. No. 11 (63). Pp. 137–145. (rus)
4. Idelchik I.E., Steinberg Ed.M.O. Handbook of hydraulic resistance [Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam]. 3rd ed. Revised. and additional. M.: Engineering. 1992. 672 p. (rus)
5. Idelchik I.E. Aerodynamics of technological apparatuses. (Inlet, outlet and distribution of the flow over the cross section of the devices) [Ae`ro-dinamika texnologicheskix apparatov. (Podvod, otvod i raspredelenie potoka po secheniyu apparatov)]. M.: Mashinostroenie. 1983. 351 p. (rus)
6. Khodakov I.V. Numerical and experimental study of flow separation at the inlet to suction channels with mechanical screens [Chislennoe i e`ksperimental`noe issledovanie otry`va potoka na vxode vo vsasy`vayushhie kanaly` s mexanicheskimi e`kranami]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 3. Pp. 6–12. (rus)
7. Balandina L.Ya., Shkarpet V.E. Ways to improve the energy efficiency of air distribution methods [Puti povy`sheniya e`nergoe`ffektivnosti sposobov vozduxoraspredeleniya]. ABOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and building thermal physics. 2012. No. 5. Pp. 10–17. (rus)
8. Kosonen R. Mustakallio P. Air distribution in school classrooms [Vozduxoraspredelenie v shkol`ny`x klassax]. ABOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and building thermal physics. 2016. No. 1. Pp. 30–39. (rus)
9. Zimin A.V. Air distribution systems for fruit and vegetable storage chambers [Sistemy` vozduxoraspredeleniya kamer xraneniya plodoovoshhnoj produkcii]. Refrigeration equipment and technology. 2015. Vol. 51. No. 3. Pp. 10–13. doi: 10.15673/0453-8307.3/2015.39271. (rus)
10. Kazakov B.P., Shalimov A.V. Comparative analysis of methods for calculating air distribution in mine ventilation networks [Sravnitel`ny`j analiz metodov rascheta vozduxoraspredeleniya v rudnichny`x ventilyacionny`x setyax]. 2009. No. 1 (35). Pp. 17–20. (rus)
11. Koroleva T.I., Lankovich S.V., Kovalevsky P.E., Yakovenko S.A. Study of air distribution methods by textile air ducts [Issledovanie sposobov vozduxoraspredeleniya tekstil`ny`mi vozduxovodami]. Architectural and building complex: problems, prospects, innovations: collection of articles of the international scientific conference, dedicated to the 50th anniversary of Polotsk State University (Novopolotsk, 05–06 April 2018). Novopolotsk: Educational Establishment “Polotsk State University”. 2018. Pp. 328–332. (rus)
12. Ziganshin A.M., Badykova L.N. Numerical simulation of flow in a profiled vent tee for confluence [Chislennoe modelirovanie techeniya v profilirovannom ventilyacionnom trojnikе na sliyanie]. Construction. 2017. No. 6 (702). Pp. 41–48. (rus)
13. Balestrin E., Decker R.K., Noriler D., Bastos J.C.S.C., Meier H.F. An Alternative for the Collection of Small Particles in Cyclones: Experimental Analysis and CFD Modeling. Separation and Purification Technology. 2017. Vol.184. Pp. 54–65. doi: 10.1016/j.seppur.2017.04.023
14. Wang P.F., Gao R.Z., Liu R.H., Yang F.Q. CFD-Based Optimization of the Installation Location of the Wall-Mounted Air Duct in a Fully Mechanized Excavation Face. Process Safety and Environmental Protection. 2020. Vol. 141. Pp. 234–245. doi: 10.1016/j.psep.2020.04.049
15. Ganegama Bogodage S., Leung A.Y.T. CFD simulation of cyclone separators to reduce air pollution. Powder Technology. 2015. 286. Pp. 488–506.
16. Katare P. CFD analysis of cyclone separator used for fine filtration in separation industry. Case Studies in Thermal Engineering. 2021. 28. 101384.
17. Logachev K.I., Puzanok A.I., Zorya V.U. Numerical study of aerosol dust behaviour in aspiration bunker. Proceedings European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2006. Egmond aan Zee. The Netherlands. 2006. 11 p.
18. Nagornaya A.N., Denisjuk E.V. CFD modeling of the thermal and air regime of a cinema [CFD-modelirovanie teplovogo i vozdušnogo rezhima kinoteatra]. Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and architecture. 2013. Vol. 13. No. 2. Pp. 61–64. (rus)
19. Khokhulya M.S., Fomin A.V. CFD modeling of mineral particle separation in a hydraulic separator with inclined plates [CFD modelirovanie razdeleniya mineral`ny`x chasticz v gidravlicheskome separetore s naklonny`mi plastinami]. Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2014. No. 5 (24). Pp. 239–245. (rus)
20. Zubanov V.M., Shabliy L.S. CFD-simulation of processes in the high-pressure pump of the oxidizer of a turbopump unit of a liquid-propellant rocket engine [CFD-modelirovanie processov v nase vy`sokogo davleniya okislitelya turbonasosnogo agregata zhidkostnogo raketnogo dvigatelya]. Bulletin of the Samara State Aerospace University.

Academician S.P. Korolev (National Research University). 2014. No. 5-1 (47). Pp. 148–153. (rus)

21. Arbatsky A.A., Glazov V.S. Calculation of ventilation systems for industrial and public buildings using CFD-modeling tools [Расчет систем вентиляции производственных и общественных зданий

s primeneniem sredstv CFD-modelirovaniya]. Modern problems of engineering sciences: collection of scientific papers of the VI-th International Scientific and Technical Symposium “Modern Energy and Resource Saving Technologies SETT – 2017” (Moscow, October 11–12, 2017). M.: FSBEI HPE MSUD&T. 2017. Pp. 176–180. (rus)

*Information about the authors*

**Goltsov, Alexander B.** PhD. E-mail: abgoltsov@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

*Received 21.10.2022*

**Для цитирования:**

Гольцов А.Б. Выявление факторов, влияющих на равномерность всасывания аспирационными воронками // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 1. С. 19–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-19-31

**For citation:**

Goltsov A.B. Identification of factors affecting the uniformity of suction by suction funnel. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 1. Pp. 19–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-19-31

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-32-41

\*Абрамкина Д.В., Иванова А.О.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

\*E-mail: dabramkina@ya.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЕЙ ШУМА ОТ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ В МЕЖКВАРТИРНЫХ КОРИДОРАХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

**Аннотация.** В настоящее время в жилых домах все чаще предусматривают системы вентиляции с механическим побуждением. В связи с этим возникают вопросы по нормированию шума во внутреннем пространстве жилых комплексов. За последние годы возросло количество жалоб жителей на повышенный шум в межквартирном коридоре и жилых пространствах от вентиляционного оборудования. Поэтому требует внимательного изучения вопрос формирования шума в вентиляционных системах и механическом оборудовании, которое применяется при их проектировании. Для изучения данного вопроса необходимо провести ряд исследований: анализ отечественных и зарубежных документов по нормированию шума, измерение шума в местах общего пользования, проведение расчетов проникающего шума в жилые помещения на основе полученных измерений, выявление нормативных шумовых характеристик для данных пространств и проведение мероприятий по уменьшению шума в вентиляционной сети. В данной статье представлены результаты натурных исследований по определению уровней шумового воздействия от работы инженерного оборудования в межквартирном пространстве жилого здания в дневное (с 08:00 до 22:00 часов) и ночное (с 00:00 до 06:00 часов) время суток. Проведено теоретическое исследование по сравнению нормативных значений уровней звукового давления в жилых зданиях различных стран.

**Ключевые слова:** шум, уровень звукового давления, вентиляция, механическая вентиляция, акустические характеристики.

**Введение.** Большую часть жилого фонда г. Москвы составляют многоквартирные дома с системами естественной вентиляции. Однако изменения в нормативно-технических документах, а также применение современных ограждающих конструкций и строительных материалов, привели к увеличению количества домов, оборудованных системами механической вентиляции. Одной из основных проблем при приемке квартир от застройщика являются жалобы на шум от инженерного оборудования, особенно в помещениях последних этажей. Согласно информации Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, более 60 % жалоб на различные физические факторы в жилых домах представляют собой обращения, связанные с повышенным уровнем шума.

Шум от механических систем вентиляции в строящихся жилых комплексах на данный момент является малоизученной проблемой в России. В отечественной нормативно-технической литературе допустимые уровни звукового давления в помещениях многоквартирных комплексов представлены только для жилых комнат. Однако данный подход вызывает проблему шумового загрязнения в санитарных узлах, кухнях и межквартирных коридорах. В таблице 1 приведены данные по нормированию уровней звукового давления в различных странах. Допустимые уровни шума в дневное время жилых квартир от инженерного оборудования согласно СП

51.13330.2011, принимаются на 5 дБ (дБ(А)) ниже значений, указанных в таблице 1.

В Южной Корее нормативные документы регламентируют непостоянные шумы, проникающие в квартиру, например, звуки от соседей, а также постоянные шумы от инженерного оборудования [4]. Для непостоянных источников эквивалентные уровни шума в течение дня составляют 43 дБ(А), в ночное время – 38 дБ(А), для постоянных шумов 45 и 40 дБ(А) соответственно.

Национальный стандарт Бельгии устанавливает различный уровень требований к эквивалентному уровню шума в квартире в зависимости от типа помещения: для жилых комнат 30 дБ(А), для спальни 27 дБ(А), для санитарного узла 35 дБ(А) [5].

Максимально допустимые уровни звука в Польше указаны в стандарте PN-87/B-02156: в жилых зданиях в дневное время допустимый эквивалентный уровень звука от технического оборудования здания составляет 35 дБА. Второй стандарт, PN-B-02151-2, который носит рекомендательный характер, но не является обязательным для использования в Польше, устанавливает максимально допустимый эквивалентный уровень звука в течение дня 25 дБ(А) [6].

В исследовании [7] представлена классификация помещений по уровню акустического комфорта при наличии шума от инженерных систем.

Помещения класса С и выше характеризуется процентом неудовлетворенности жителей жилых домов качеством акустической среды в

помещении менее 20 %, что является приемлемой величиной [8].

В Скандинавских странах нормирование уровней шума в жилых зданиях основывается на

классификации помещений по уровню акустического комфорта [9]. Наибольшая разница в требованиях наблюдается для ночного периода времени (табл. 3).

Таблица 1

### Нормируемые уровни звукового давления в различных странах

Страна	№*	Время суток, ч	Уровни звукового давления (дБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Эквивалентный уровень звука, дБ(А)
			31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Россия СП 51.13330.201 1	1	7.00-23.00	79	63	52	45	39	35	32	30	28	40
		23.00-7.00	72	55	44	35	29	25	22	20	18	30
США [1]	1	Весь день	71	58	49	42	37	32	30	29	28	35
	2		78	60	53	45	41	48	35	34	32	40
Индия [2]	1	6.00-22.00	83	70	63	55	50	45	42	40	39	55
		22.00-6.00	79	63	52	44	40	35	32	30	28	45
Китай [3]	1	6.00-22.00	79	63	52	44	40	35	32	30	28	45
		22.00-6.00										
	3	6.00-22.00	79	63	52	44	40	35	32	30	28	45
		22.00-6.00	74	57	45	37	30	25	22	20	18	35

\*номер означает назначение помещений или территорий: 1 – жилые комнаты квартир; 2 – душевые, кухни, санузлы; 3 – спальня

Таблица 2

### Классификация жилых помещений по уровню акустического комфорта

Оценочный параметр	Класс А	Класс В	Класс С	Класс D	Класс E	Класс F
Эквивалентный уровень звука, $L_{Aэкв}$ , дБ(А)	$\leq 20$	$\leq 24$	$\leq 28$	$\leq 32$	$\leq 36$	$\leq 40$

Проблема шумового загрязнения может ограничивать использование механической вентиляции. Результаты исследований, проведенных в Европе и Северной Америке, свидетельствуют о том, что жители зачастую отключают вентиляционное оборудование с нежелательным шумом [10]. Без надлежащей вентиляции в современных герметичных зданиях низкое качество воздуха может оказывать значительное негативное воздействие на самочувствие и здоровье жильцов [11].

Человеческий слух реагирует на широкий диапазон звукового давления. Согласно исследованиям Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) [12], сердечно-сосудистые заболевания могут возникнуть, если человек по ночам постоянно подвергается воздействию шума громкостью 50 дБ или выше – такой шум издает улица с неинтенсивным движением. Для того, чтобы заработать бессонницу, достаточно шума в 42 дБ; чтобы просто стать раздражительным – 35 дБ (звук шепота). Шум от систем механической вен-

тиляции значительно влияет на работоспособность человека [13], его психологическое состояние [14], качество отдыха в ночное время суток [15, 16]: при постоянном воздействии снижается продолжительность фаз глубокого и поверхностного сна.

Длительное влияние повышенного шума ночью может приводить к различным проблемам со здоровьем и самочувствием человека (табл. 4) [17].

По данным ВОЗ [12] тысячи людей в Великобритании и по всему миру преждевременно умирают от сердечных расстройств, вызванных долговременным воздействием повышенного уровня шума. Под воздействием шума от 85–90 дБ снижается слуховая чувствительность на высоких частотах. Долгое время человек жалуется на недомогание. Симптомы - головная боль, головокружение, тошнота, чрезмерная раздражительность. Все это результат работы в шумных условиях. Под влиянием сильного шума, особенно высокочастотного, в органе слуха происходят необратимые изменения. При высоких

уровнях шума слуховая чувствительность падает уже через 1–2 года, при средних - обнаружива-

ется гораздо позже, через 5–10 лет, то есть снижение слуха происходит медленно, болезнь развивается постепенно.

Таблица 3

### Классификация жилых помещений по уровню акустического комфорта в Скандинавских странах

Страна	Оценочный параметр	Класс А	Класс В	Класс С	Класс D
Дания	Среднесуточные эквивалентный уровень звука, $L_{\text{ЭКВ},24}$ , Дб(А)	$\leq 20$	$\leq 25$	$\leq 30$	$\leq 35$
	Эквивалентный уровень звука в дневное время, $L_{\text{ЭКВ},д}$ , Дб(А)	$\leq 23$	$\leq 28$	$\leq 33$	$\leq 38$
	Эквивалентный уровень звука в ночное время, $L_{\text{ЭКВ},н}$ , Дб(А)	$\leq 15$	$\leq 20$	$\leq 25$	$\leq 30$
Финляндия	Эквивалентный уровень звука в дневное время, $L_{\text{ЭКВ},д}$ , Дб(А) (07:00–22:00)	$\leq 25$	$\leq 30$	$\leq 35$	$\leq 35$
	Эквивалентный уровень звука в ночное время, $L_{\text{ЭКВ},н}$ , Дб(А) (22:00–07:00)	$\leq 20$	$\leq 25$	$\leq 30$	$\leq 30$
Исландия	Среднесуточные эквивалентный уровень звука, $L_{\text{ЭКВ},24}$ , Дб(А)	$\leq 20$	$\leq 25$	$\leq 30$	$\leq 35$
	Максимальный уровень звука в ночное время, $L_{\text{МАКС},н}$ , Дб(А) (23:00–07:00)	$\leq 35$	$\leq 40$	$\leq 45$	–
Норвегия	Среднесуточные эквивалентный уровень шума, $L_{\text{ЭКВ},24}$ , Дб(А)	$\leq 20$	$\leq 25$	$\leq 30$	$\leq 35$
	Максимальный уровень звука в ночное время, $L_{\text{МАКС},н}$ , Дб(А) (23:00–07:00)	$\leq 35$	$\leq 40$	$\leq 45$	$\leq 50$
Швеция	Среднесуточные эквивалентный уровень шума, $L_{\text{ЭКВ},24}$ , Дб(А)	$\leq 22$	$\leq 26$	$\leq 30$	$\leq 34$
	Максимальный уровень звука в ночное время, $L_{\text{МАКС},н}$ , Дб(А) (22:00–06:00)	$\leq 37$	$\leq 41$	$\leq 45$	$\leq 49$

Таблица 4

### Влияние повышенного шума в ночное время на здоровье человека

Среднегодовой уровень шума в ночное время	Наблюдаемые последствия для здоровья населения
До 30 дБ	Существенные биологические последствия не наблюдаются
От 30 до 40 дБ	Нарушения сна: возникновение движений тела во время сна, пробуждение. Интенсивность воздействия зависит от характера источника шума и продолжительности его работы. Наибольшему риску подвержены дети и люди пожилого возраста
От 40 до 55 дБ	Неблагоприятные последствия для здоровья наблюдаются среди всего населения, подверженного воздействию источника шума
Более 55 дБ	Наиболее опасная ситуация для здоровья населения. Высокий риск возникновения хронической бессонницы и сердечно-сосудистых заболеваний

Исследования ВОЗ также показывают, что повышенный шум является одной из наиболее серьезных угроз психическому здоровью человека. Шумовое загрязнение стало более опасным

фактором, чем загрязнение воды и воздуха. Поэтому особенно важно заранее принимать соответствующие меры защиты от шума.

В настоящее время вопрос поиска оптимальных решений для снижения уровней звукового

давления в вентиляционных установках многоэтажных жилых домов является актуальной научной задачей.

**Методы и материалы исследования.** Целью исследования является проведение оценки уровня проникающего корпусного шума от систем механической вентиляции в межквартирных коридорах жилых зданий.

Объектом исследования являлся многоквартирный жилой комплекс, расположенный в г. Москве. Для жилой части здания были запроектированы системы вытяжной механической вентиляции с естественным притоком. Подача воздуха в помещение осуществляется через окна и форточки. Удаление загрязненного воздуха осуществляется через вытяжные воздуховоды кухни и санитарных узлов с выпуском воздуха в

сборный вертикальный канал, и далее через кровлю крышным вентилятором на улицу. Для квартир последнего этажа предусматриваются отдельные системы, оборудованные канальными вентиляторами, размещенными в техническом пространстве над лестнично-лифтовым холлом.

Измерение уровней звукового давления в межквартирных коридорах (у дверей квартир последнего этажа) при работе вентиляционного оборудования производилось с помощью шумомера Testo 816-2.

**Результаты и их анализ.** На рисунках 1–2 представлены результаты измерений в межквартирном коридоре последнего этажа корпуса 1 в дневное и ночное время.

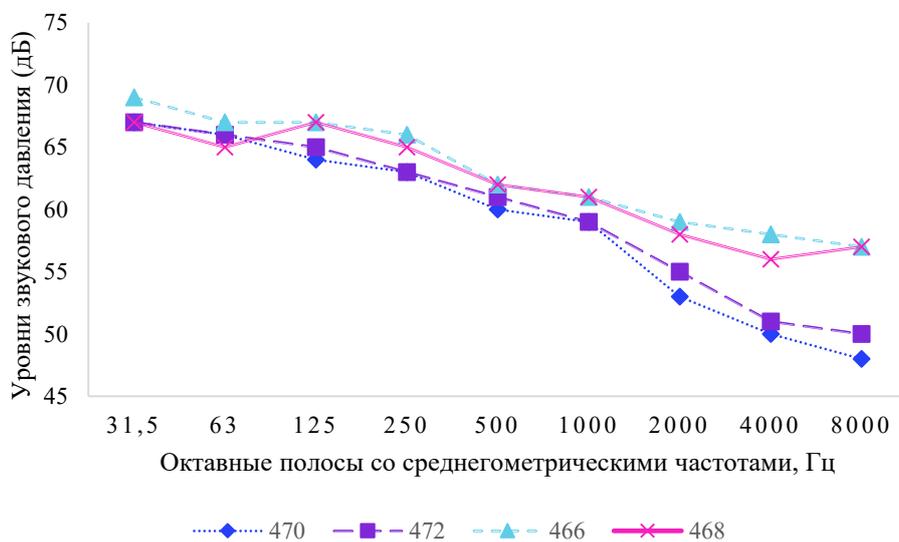


Рис. 1. График измерений, проводившихся в дневное время напротив квартир 470, 472, 466, 468 в многоквартирном корпусе №1

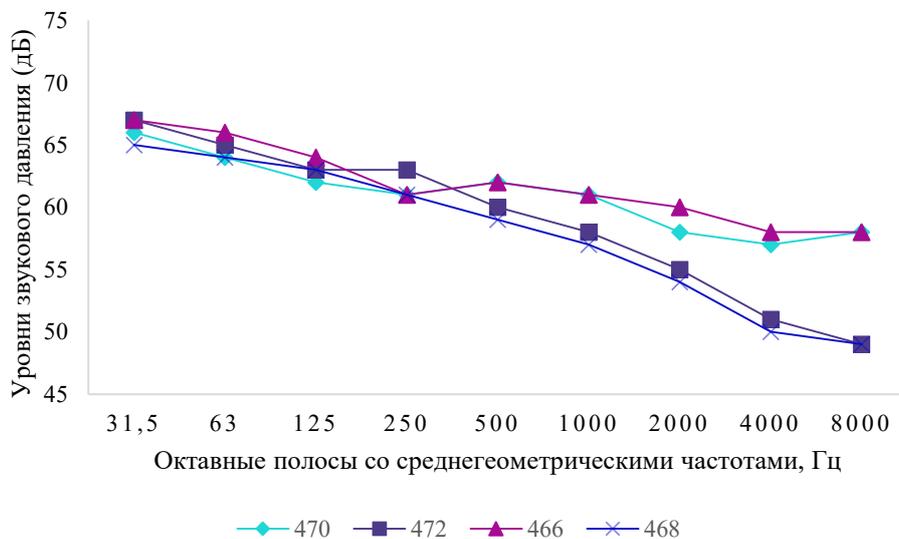


Рис. 2. График измерений, проводившихся в ночное время напротив квартир 470, 472, 466, 468 в многоквартирном корпусе №1

По результатам натурных исследований было выявлено, что эквивалентные уровни звука в дневное и ночное время суток превышают 40

дБ(А) для каждой контрольной точки измерений (рис. 3).

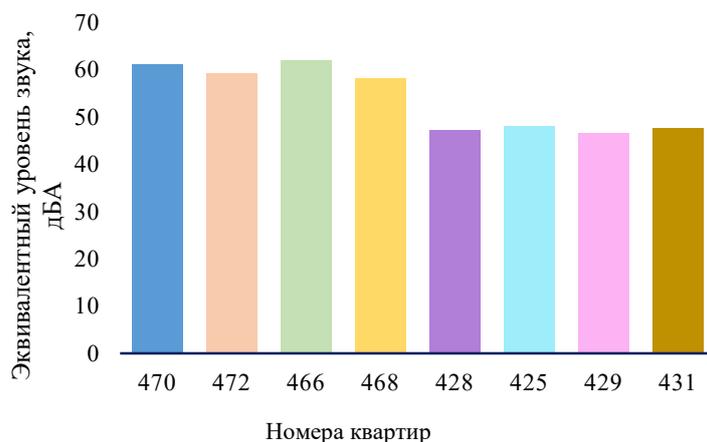


Рис. 3. Эквивалентные уровни звука в межквартирном коридоре в ночное время

Наибольшие уровни звукового давления были выявлены у квартиры-студии № 466. Для определения ожидаемых уровней шума в жилых помещениях, проникающего через отдельные элементы ограждений, для дальнейшего расчета была выбрана комната, имеющая общую стену с

межквартирным коридором. Расчет был проведен в соответствии с методикой [18].

Уровни шума, проникающего через внутренние ограждения межквартирного коридора в жилую комнату студии,  $L_{ui}$ , дБ, определяется по формуле:

$$L_{ui} = L_p - 10 \lg B_{uu} - 10 \lg B_u + 10 \lg S_i - R_i + 6, \tag{1}$$

$L_{ui}$  – измеренный уровень звуковой мощности в межквартирном коридоре при совместной работе вентиляционного оборудования, дБ;  $B_{uu}$  и  $B_u$  – постоянные шумного помещения (коридора) и изолируемого помещения (жилая комната студии);  $S_i$  – площадь смежного ограждения, через которое шум проникает в квартиру;  $R_i$  – звукоизолирующая способность смежного ограждения.

в жилых зданиях [19]. Было выявлено, что начиная с октавной полосы со среднегеометрической полосой 250, наблюдаются превышения нормируемых уровней звукового давления в дневное и ночное время. Для снижения проникающего шума от вентиляционных установок, обслуживающих квартиры последнего этажа, рекомендуется перенос вентиляторов из технического пространства над лифтовым холлом на кровлю здания.

Результаты расчетов представлены на графике (рис. 4–5).

Выбор месторасположения вентиляционного оборудования играет ключевую роль в создании благоприятной акустической обстановки

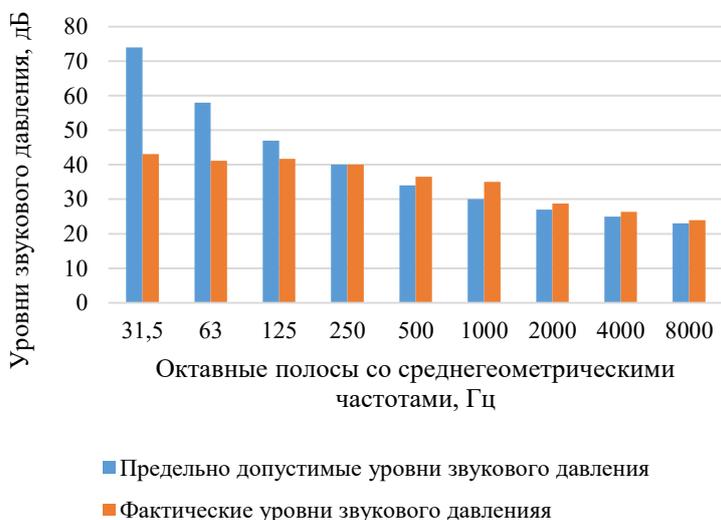


Рис. 4. Результаты расчетов проникающего шума от вентиляционного оборудования в жилую комнату квартиры № 466 в дневное время



Рис. 5. Результаты расчетов проникающего шума от вентиляционного оборудования в жилую комнату квартиры № 466 в ночное время

По результатам полученных расчетов и теоретических исследований нормативно-технических документов разных стран, можно сделать вывод, что поддержание уровней звукового давления в местах общего пользования в размере 40 дБ(А) и менее позволит исключить формирование повышенного проникающего шума от вентиляционного оборудования.

Ошибки при монтаже вентиляционных систем являются одной из основных причин шумового загрязнения помещений. Кроме того, многочисленные социологические исследования [20] показывают, что большинство жителей многоквартирных домов не довольны уровнем звукоизоляции ограждающих конструкций, как в монолитных зданиях, так и в сооружениях облегченной конструкции. Было выявлено, что около 45 % составляют жалобы на шум от инженерного и технологического оборудования зданий. Зачастую устранение проблем, связанных с шумом от инженерных систем на стадии эксплуатации здания, представляют собой сложные и дорогостоящие операции, поэтому проведение акустических расчетов и замеров уровней шума является обязательным условием, позволяющим снизить риски.

Проведение строительного контроля при монтаже систем вентиляции многоквартирных жилых домов позволило выявить основные проблемы:

1. Герметичность вентиляционной системы: отсутствие прокладок в межфланцевых соединениях, что приводит также к повышению потерь давления аэродинамической сети и энергопотреблению вентиляторов [21].

2. Пережатие гибких вставок в узле подключения вентиляторов последнего этажа, являющиеся искусственным препятствием на пути движения воздушного потока, что приводит к возникновению сложных турбулентных течений в воздуховодах [22].

3. Отсутствие жесткого крепления вентиляторов и воздуховодов, что приводит к формированию вибраций и шума, распространяющегося по строительным конструкциям.

4. Отсутствие заделки технических отверстий, что явилось основной причиной повышенных уровней шумового загрязнения в помещениях межквартирных коридоров, и как следствие, в жилых комнатах квартир-студий, расположенных на последнем этаже.

5. Применение самодельных отводов, тройников и врезок вместо заводских и проектных решений.

6. Некорректный монтаж виброопор вентиляторов.

При устранении данных проблем уровень проникающего шума в квартиры из коридоров стал соответствовать нормативным значениям.

**Выводы.** Шумовое загрязнение представляет собой угрозу для здоровья и благополучия человека и является серьезной проблемой в крупных городах по всему миру. Масштаб этого кризиса увеличивается с каждым годом вследствие роста численности населения, урбанизации и внедрения все более мощных, разнообразных и мобильных источников шума. Чрезмерное воздействие шума раздражает, вызывает стресс и накопленную усталость, ослабляет способность к общению и снижает работоспособность.

В настоящее время значительно увеличилось количество жалоб от жителей новостроек на шум, генерируемый механическими системами вентиляции, не только в квартире, но и местах общего пользования. Данный фактор показывает острую необходимость в проведении теоретических и натурных исследований с целью выявления допустимых уровней шума в жилых помещениях квартир.

По результатам натурных исследований было выявлено, что эквивалентные уровни звука в межквартирных коридорах жилого здания в дневное и ночное время суток превышают 40 дБ(А) для каждой контрольной точки измерений. Начиная с октавной полосы со среднегеометрической полосой 250, наблюдаются превышения проникающих шумов от вентиляционного оборудования в жилых комнатах квартир-студий, расположенных на последних этажах.

Проведение акустических расчетов на стадии проектирования и контроль уровня шума от вентиляционного оборудования в период сдачи объекта в эксплуатацию являются необходимой мерой при строительстве многоэтажных жилых зданий. Основными причинами формирования повышенных уровней звукового давления в помещениях межквартирных коридоров являлись некачественные монтажные работы вентиляционных систем.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineer. Pocket Guide for Air Conditioning, Heating, Ventilation, Refrigeration. USA: ASHRAE, 2014. 340 p.
2. Chauhan A. Study of noise pollution level in different places of Haridwar and Dehradun city (India) // Environment Conservation Journal. 2008. Vol. 9 (3). Pp. 21–25.
3. Yan G., Wu W., Lin J., Xu C., Zhao Q. Revision of Chinese national standard GB 50118 - Code for design of sound insulation of civil buildings // PROCEEDINGS of the 23rd International Congress on Acoustics 9 to 13 September 2019 in Aachen, Germany. 2019. Pp. 341–345.
4. Kim K. Sources, effects, and control of noise in indoor/outdoor living environments // Journal of the Ergonomics Society of Korea. 2015. Vol. 34 (3). Pp. 265–278. DOI: 10.5143/JESK.2015.34.3.265.
5. Caillou S., Dijckmans A. Improvement of the acoustical performance of mechanical ventilation systems in dwellings: a case study // 39th AIVC Conference "Smart Ventilation for Buildings", Antibes Juan-Les-Pins, France, 18-19 September 2018. 2018. Pp. 1–10.
6. Werner-Juszczuk A.N. Work comfort in a home office with mechanical ventilation—a case study // Environmental Sciences Proceedings. 2022. Vol. 18 (1). No. 2. DOI: <https://doi.org/10.3390/envirosciproc2022018002>
7. Robert Sean Smith R.S., Machimbarrena M., Fausti P., Gerretsen E., Ingelaere B., Kang J., Kurra S., Ordóñez R., Patricio J., Mahn J., Rasmussen B., Smith S. Building acoustics throughout Europe Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe. Denmark: DiScript Preimpresion SL, 2014. 258 pp.
8. Harvie-Clark J. Siddall M. Problems in residential design for ventilation and noise part 2: mechanical ventilation // Acoustics Bulletin. 2014. Pp. 33–38.
9. Birgit R. Sound classification of dwellings in the Nordic countries – Differences and similarities between the five national schemes // Proceedings of BNAM2012 Nordic Acoustic Association. Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting (BNAM). 2012. Pp. 1–8.
10. Harvie-Clark J., Siddall M. Problems in residential design for ventilation and noise // Proceedings of the Institute of Acoustics. 2013. Vol. 35 (1). Pp. 74–87.
11. Harvie-Clark J., Conlan N., Wei W., Siddall M. How loud is too loud? Noise from domestic mechanical ventilation systems // International Journal of Ventilation. 2019. Vol. 18 (4). Pp. 303–312.
12. World Health Organization. Burden of Disease from Environmental Noise. 2011. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe AcrobatReader. URL: [https://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0008/136466/e94888.pdf](https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf) (дата обращения: 20.10.2022).
13. Choi W., Pate M.B. An evaluation and comparison of two psychoacoustic loudness models used in low-noise ventilation fan testing // Building Environment. 2017. Vol. 120. Pp. 41–52. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.05.003.
14. Varjo J., Hongisto V., Naapakangas A., Maula H., Koskela H., Hyönä J. Simultaneous effects of irrelevant speech, temperature and ventilation rate on performance and satisfaction in open-plan offices // Journal of Environmental Psychology. 2015. Vol. 44. Pp. 16–33. DOI: 10.1016/j.jenvp.2015.08.001.
15. Lan L., Sun Y., Wyon D.P., Wargoocki P. Pilot study of the effects of ventilation and ventilation noise on sleep quality in the young and elderly // Indoor Air. 2021. Vol. 31(6). Pp. 2226–2238. DOI: 10.1111/ina.12861.
16. Fan X., Shao H., Sakamoto M., Kuga K., Lan L., Wyon D.P., Ito K., Bivolarova M.P., Liao C., Wargoocki, P. The effects of ventilation and temperature on sleep quality and next-day work performance: Pilot measurements in a climate chamber //

Building Environment. 2021. Vol. 209. 10866. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108666.

17. Hurtley C., Bengs D. Night noise guidelines for Europe. Denmark: WHO Regional Office for Europe. 2009. 184 p.

18. Катунин Г.Н. Акустика помещений: учебное пособие. Саратов: Издательство «Вузовское образование». 2017. 191 с.

19. NVW Editorial Staff. Noise reduction in ventilation systems // Noise & Vibration Worldwide. 2018. Vol. 49 (3). Pp. 96–98. DOI: 10.1177/0957456518763260

20. Hongisto V., Mäkilä M., Suokas M. Satisfaction with sound insulation in residential dwellings –

The effect of wall construction // Building and Environment. 2015. No. 85.

DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.12.010

21. Боломатов В.Н. Герметичность воздуховодов: проблемы и решения // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2017. № 6. С. 38–47.

22. Кожевникова Н.А., Шевкун Н.А., Драный А.В., Цымбал А.А., Трубилин Е.И., Коновалов В.И. Анализ характера распределения основных параметров воздушного потока в воздуховодах // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 161. С. 282–289.

#### Информация об авторах

**Абрамкина Дарья Викторовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция». E-mail: dabramkina@ya.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Центральный федеральный округ, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26.

**Иванова Ангелина Олеговна**, аспирант. E-mail: ivanova.angeli@yandex.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Центральный федеральный округ, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26.

Поступила 08.11.2022 г.

© Абрамкина Д.В., Иванова А.О., 2023

*\*Abramkina D.V., Ivanova A.O.*

*National Research Moscow State University of Civil Engineering*

*\*E-mail: dabramkina@ya.ru*

## STUDY OF NOISE LEVELS FROM VENTILATION SYSTEMS IN CORRIDORS OF RESIDENTIAL BUILDINGS

**Abstract.** Stained glass windows are applied in residential buildings more often nowadays, and therefore the natural ventilation is impossible to apply. The mechanical ventilation is good for apply in the situation. A lot of questions about the rationing of the noise in internal rooms in residential buildings are arisen. Residents complain the ventilation equipment noise from inter-corridor and the living area. Therefore, the question about study of noise generation in ventilation system and mechanical equipment that is applied in design, issue requires detailed research. For the study the question is necessary to do some research: analysis of foreign articles of noise regulation, measurement of noise in the inter-corridor and residential spaces, doing some calculations based on researching measurements, identification of normative noise characteristics for measurement data and carrying out measurements on noise measurement in the ventilation. This article presents the results of natural studies on noise levels from the operation of engineering equipment in the inter-apartment space of a residential building in the daytime (from 08:00 to 22:00 hours) and at night (from 00:00 to 06:00 hours) of the day. A theoretical study was carried out to compare the standard levels of sound pressure in residential buildings in different countries.

**Keywords:** noise, sound pressure, ventilation, mechanical ventilation, acoustic characteristics.

### REFERENCES

1. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineer. Pocket Guide for Air Conditioning, Heating, Ventilation, Refrigeration. USA: ASHRAE, 2014. 340 p.

2. Chauhan A. Study of noise pollution level in different places of Haridwar and Dehradun city (India). Environment Conservation Journal. 2008. Vol. 9 (3). Pp. 21–25.

3. Yan G., Wu W., Lin J., Xu C., Zhao Q. Revision of Chinese national standard GB 50118 - Code for design of sound insulation of civil build-

ings. PROCEEDINGS of the 23rd International Congress on Acoustics 9 to 13 September 2019 in Aachen, Germany. 2019. Pp. 341–345.

4. Kim K. Sources, effects, and control of noise in indoor/outdoor living environments. Journal of the Ergonomics Society of Korea. 2015. Vol. 34 (3). Pp. 265–278. DOI: 10.5143/JESK.2015.34.3.265.

5. Caillou S., Dijkmans A. Improvement of the acoustical performance of mechanical ventilation systems in dwellings: a case study. 39th AIVC Conference "Smart Ventilation for Buildings", Antibes Juan-Les-Pins, France, 18-19 September 2018. 2018. Pp. 1–10.

6. Werner-Juszczuk A.N. Work comfort in a home office with mechanical ventilation – a case study. Environmental Sciences Proceedings. 2022. Vol. 18 (1). No. 2. DOI: 10.3390/envirosciproc2022018002

7. Robert Sean Smith R.S., Machimbarrena M., Fausti P., Gerretsen E., Ingelaere B., Kang J., Kurra S., Ordóñez R., Patricio J., Mahn J., Rasmussen B., Smith S. Building acoustics throughout Europe Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe. Denmark: DiScript Preimpresion SL, 2014. 258 p.

8. Harvie-Clark J. Siddall M. Problems in residential design for ventilation and noise part 2: mechanical ventilation. Acoustics Bulletin. 2014. Pp. 33–38.

9. Birgit R. Sound classification of dwellings in the Nordic countries – Differences and similarities between the five national schemes. Proceedings of BNAM2012 Nordic Acoustic Association. Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting (BNAM). 2012. Pp. 1–8.

10. Harvie-Clark J. Siddall M. Problems in residential design for ventilation and noise. Proceedings of the Institute of Acoustics. 2013. Vol. 35 (1). Pp. 74–87.

11. Harvie-Clark J., Conlan N., Wei W., Siddall M. How loud is too loud? Noise from domestic mechanical ventilation systems. International Journal of Ventilation. 2019. Vol. 18 (4). Pp. 303–312.

12. World Health Organization. Burden of Disease from Environmental Noise. 2011. Adobe Acrobat Reader. URL: [https://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0008/136466/e94888.pdf](https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf) (date of the application: 20.10.2022).

13. Choi W., Pate M.B. An evaluation and comparison of two psychoacoustic loudness models used

in low-noise ventilation fan testing. Building Environment. 2017. Vol. 120. Pp. 41–52. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.05.003.

14. Varjo J., Hongisto V., Haapakangas A., Maula H., Koskela H., Hyönä J. Simultaneous effects of irrelevant speech, temperature and ventilation rate on performance and satisfaction in open-plan offices. Journal of Environmental Psychology. 2015. Vol. 44. Pp. 16–33. DOI: 10.1016/j.jenvp.2015.08.001.

15. Lan L., Sun Y., Wyon D.P., Wargocki P. Pilot study of the effects of ventilation and ventilation noise on sleep quality in the young and elderly. Indoor Air. 2021. Vol. 31(6). Pp. 2226–2238. DOI: 10.1111/ina.12861.

16. Fan X., Shao H., Sakamoto M., Kuga K., Lan L., Wyon D.P., Ito K., Bivolarova M.P., Liao C., Wargocki, P. The effects of ventilation and temperature on sleep quality and next-day work performance: Pilot measurements in a climate chamber. Building Environment. 2021. Vol. 209. 10866. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108666.

17. Hurlley C., Bengs D. Night noise guidelines for Europe. Denmark: WHO Regional Office for Europe. 2009. 184 p.

18. G.N. Katunin. Acoustics of premises: educational manual [Akustika pomeshchenii: uchebnoe posobie]. Saratov: Publishing «University education». 2017. 191 p. (rus)

19. NVW Editorial Staff. Noise reduction in ventilation systems. Noise & Vibration Worldwide. 2018. Vol. 49 (3). Pp. 96–98. DOI: 10.1177/0957456518763260

20. Hongisto V., Mäkilä M., Suokas M. Satisfaction with sound insulation in residential dwellings – The effect of wall construction. Building and Environment. 2015. No. 85. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.12.010

21. Bolomatov V.N. Air tightness of ducts: problems and solutions. [Germetichnost' vozdukhovodov: problemy i resheniya] AVOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and construction heat physics. 2017. No. 6. Pp. 38–47. (rus)

22. Kozhevnikova N.A., Shevkun N.A., Drany A.V., Tsimbal A.A., Trubilin E.I., Konovalov V.I. Analysis of the distribution of the main parameters of air flow in air ducts [Analiz kharaktera raspredeleniya osnovnykh parametrov vozdušnogo potoka v vozdukhovodakh]. Polychemical Network Electronic Journal of Kuban State Agrarian University. 2020. No. 161. Pp. 282–289. (rus)

#### Information about the authors

**Abramkina, Daria V.** Assistant professor, PhD. E-mail: [dabramkina@ya.ru](mailto:dabramkina@ya.ru). National research Moscow state university of civil engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26.

**Ivanova, Angelina O.** Post-graduate student. E-mail: [ivanova.angeli@yandex.ru](mailto:ivanova.angeli@yandex.ru). National research Moscow state university of civil engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26.

*Received 08.11.2022*

**Для цитирования:**

Абрамкина Д.В., Иванова А.О. Исследование уровней шума от вентиляционных систем в межквартирных коридорах жилых зданий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 1. С. 32–41. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-32-41

**For citation:**

Abramkina D.V., Ivanova A.O. Study of noise levels from ventilation systems in corridors of residential buildings. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 1. Pp. 32–41. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-32-41

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-42-52

<sup>1,\*</sup>Лобанов Д.В., <sup>2</sup>Звенигородский И.И., <sup>3</sup>Свирин М.В., <sup>2</sup>Сафонов С.А., <sup>3</sup>Семенов А.С.<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет<sup>2</sup>Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина<sup>3</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: LDV-36@mail.ru

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПОСТУПЛЕНИЙ ОТ ЧЕЛОВЕКА С УЧЕТОМ ЭНЕРГОТРАТ И ФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

**Аннотация.** Проведен анализ действующих нормативных документов и справочно-методической литературы, используемой при проведении расчетов, связанных с определением тепловыделений от людей, занятых различными видами труда. Выявлено неполное соответствие величин тепловыделений характеристикам тяжести выполняемой работы для различных видов деятельности с учетом возраста людей при их телосложении, соответствующем нормальной массе тела. Определены расчетные значения коэффициента физической активности для условного человека, а также величины тепловыделений мужчин с разделением их по возрастным категориям. Представлены графики энергетических трат для мужчин разного возраста, выполняющих работы различной тяжести, в соответствии с нормами. Проведено сравнение полученных величин энергозатрат с данными нормативных документов и справочно-методической литературы для различных категорий работ. Показана актуальность и необходимость учета данных по тепловыделениям от людей с учетом их возраста, антропометрических параметров и прочих условий при проектировании систем микроклимата, в том числе систем персональной и адаптивной вентиляции. Результаты исследования будут полезны инженерам-проектировщикам, реализующим схемные решения систем микроклимата, обеспечивающих комфортные параметры воздушной среды в помещениях различного назначения.

**Ключевые слова:** энергозатраты человека, тепловыделения, физические параметры человека, условный человек, средний человек, коэффициент физической активности.

**Введение.** При проектировании систем обеспечения микроклимата требуется выполнить расчет количества выделяемых в помещении вредных веществ, при этом их вид и количество зависят от его функционального назначения и категории тяжести выполняемых работ людьми. Для большинства общественных зданий основными вредными веществами являются тепло- и влаговыведения, а также газообразные вещества, выделяемые человеком [1]. В соответствии с СП 60.13330.2020 «...величина требуемого расхода приточного воздуха (воздухообмена) помещений определяется с учетом выделяемых в помещении вредных веществ отдельно для теплого и холодного периодов года».

Также в нормативных требованиях к системам вентиляции приведены минимальные расходы наружного воздуха на одного человека: «в зависимости от назначения помещения и наличия постоянных рабочих мест; его величина для производственных, общественных и административно-бытовых помещений (без естественного проветривания) составляет 60 м<sup>3</sup>/ч». Однако, согласно [2-5] данная величина требует корректировки с учетом появления современных экспериментальных данных [6] и систем микроклимата (персональная и адаптивная вентиляция) [7, 8], предназначенных для создания комфортных параметров воздушной среды в помещениях и ло-

кальных объемах рабочих зон с учетом предпочтений и фактических потребностей, находящихся людей.

Задачей данного исследования является уточнение величин тепловыделений от людей (с учетом их особенностей), занятых различными видами трудовой деятельности, с целью более точного определения поступающих тепловыделений, составления теплового баланса в помещении, а также расчета требуемого воздухообмена.

**Основная часть.** Труд человека может быть умственным или физическим. При мышечной (физической) работе освобождается тепловая и механическая энергия, а коэффициент полезного действия колеблется от 16 до 25 % [9]. Поэтому в дальнейшем под энергозатратами людей будем понимать их тепловыделения, что согласуется с данными справочно-методической литературы [10–15].

В нормативных документах приведено соответствие энергетических трат «условного человека», под которым понимается «мужчина возрастом 20-30 лет, проживающий в умеренном климате, с массой тела 70 кг и ростом 170 см, площадь поверхности тела которого равна 18000 см<sup>2</sup>» [16].

Представим в таблице 1 данные по удельным энергетическим тратам ( $q$ , Вт/м<sup>2</sup>), отнесенные к площади его поверхности, согласно Р2.2.2006-05

условного человека и определим их полные значения (Q, Вт). Также выполним сравнение полных энергетических трат «условного» человека для различных категорий тяжести выполняемых

работ, представленных в СанПиН 1.2.3685-21 приведены полные энергозатраты для категорий работ различной тяжести. Данные представим в таблице 2.

Таблица 1

### Удельные и полные энергетические траты «условного» человека

Категория работ по уровню энергозатрат	Удельный расход энергии, q	Средний удельный расход энергии, q	Расход энергии, Q	Средний расход энергии, Q
	Вт/м <sup>2</sup>		Вт	
Легкая, Ia	58	68	105	123
	77		139	
Легкая, Ib	78	88	141	159
	97		176	
Средней тяжести, Pa	98	113	177	204
	129		233	
Средней тяжести, Pb	130	145	235	262
	160		290	
Тяжелая, PIII	161	177	291	320
	193		349	

Таблица 2

### Сравнение полных энергетических трат «условного» человека

Категория работ по уровню энергозатрат	СанПиН 1.2.3685-21	P2.2.2006-05	Отклонение, %
	Расход энергии, Q Вт		
Легкая, Ia	105	105	0
	139	139	0
Легкая, Ib	140	141	0,71
	174	176	1,15
Средней тяжести, Pa	175	177	1,14
	232	233	0,43
Средней тяжести, Pb	233	235	0,86
	290	290	0
Тяжелая, PIII	291	291	0
	349	349	0

Таким образом, расхождения между энергетическими тратами условного человека, выполняющего различные виды работ, согласно нормативным документам минимальны и составляют примерно 1 %.

Для определения суточных энергозатрат человека пользуются формулой: «сумма затрат энергии на конкретные виды деятельности, каждая из которых рассчитывается как произведение величины основного обмена (ВОО) на соответствующий коэффициент физической активности и времени, в течение которого эти виды деятельности выполняются» [17]. Однако, в [18] указано, что необходимы уточнения значений величин коэффициентов физической активности (КФА) [19] с

учетом нормативных документов и возрастной периодизации мужчин [19, п.1.5] (женщин и детей в данной работе не рассматриваем).

Следует отметить, что в данной статье субъектом исследования являются мужчины с нормальной массой тела (индекс массы тела (ИМТ) составляет 20 – 25 кг/м<sup>2</sup>), в таблице 3 представлены их антропометрические параметры с учетом возраста. Определим суточные и часовые ВОО для каждой возрастной группы мужчин, результаты сведем в таблицу 4. В таблице 5 показано соответствие между группой активности людей, выполняемым видом деятельности и коэффициентами физической активности (КФА) согласно [19].

Таблица 3

**Антропометрические параметры мужчины с нормальной массой тела**

Возрастная группа	Среднее значение возраста в группе	Антропометрические параметры		Площадь поверхности по формуле Дюбуа м <sup>2</sup>
		масса тела, кг	рост, см	
≥75	75	66,7	169,6	1,77
65 – 74	69,5	68,9	172,1	1,81
45 – 64	54,5	70,9	174,6	1,86
30 – 44	37	72,3	176,7	1,89
18 – 29	23,5	72,1	177,5	1,89

Таблица 4

**Величины основного обмена (ВОО) мужского населения**

Среднее значение возраста в группе	ВОО, ккал/сут	ВОО, ккал/ч	ВОО, Вт
75	1362	57	66
69,5	1427	59	69
54,5	1536	64	74
37	1650	69	80
23,5	1719	72	83

Таблица 5

**Уровни физической активности человека**

Номер группы	Уровень активности	Вид деятельности	КФА
I	очень низкая физическая активность	работники преимущественно умственного труда	1,4
II	низкая физическая активность	работники, занятые легким трудом	1,6
III	средняя физическая активность	работники средней тяжести труда	1,9
IV	высокая физическая активность	работники тяжелого физического труда	2,2

Согласно физиологическим данным [20]: «мужчины разделены на 5 групп в зависимости от особенности профессии с указанием соответствующих КФА от 1,4 (работники, занятые преимущественно умственным трудом) до 2,5 (работники, занятые особо тяжелым физическим трудом)».

Решим обратную задачу. Определим значения величин КФА с учетом СанПиН 1.2.3685-21 и Р2.2.2006-05, а также физиологических данных [19, 20].

Сравним полученные КФА с данными [19] и представим в таблице 7.

Таблица 6

**Величины КФА в зависимости от категории работ по уровню энерготрат «условного» человека**

Категория работ по уровню энерготрат	Расход энергии		КФА
	Вт	ВОО Вт	
Легкая, Ia	105	78	1,3
	139	78	1,8
Легкая, Ib	141	78	1,8
	176	78	2,3
Средней тяжести, IIa	177	78	2,3
	233	78	3,0
Средней тяжести, IIб	235	78	3,0
	290	78	3,7
Тяжелая, III	291	78	3,7
	349	78	4,5

Отметим, что в справочно-методической литературе [10–15] представлены данные по тепловыделениям условного человека (мужчины) без деления категорий тяжести работ на подкатегории (Ia, Ib, IIa, IIб): легкая, средней тяжести, тяжелая.

Выполним расчет энергетических трат и построение графиков для различных категорий тяжести работ, выполняемых мужчинами разного возраста.

На рисунках 1–3 представлены графики зависимости энергетических трат от полученных КФА и возраста.

Таблица 7

Величины КФА «условного» человека

Категория работ по уровню энерготрат	Полученные значения	[19]
Легкая (Ia, Iб)	1,3; 1,8; 2,3	1,6
Средней тяжести (IIa, IIб)	2,3; 3,0; 3,7	1,9
Тяжелая (III)	3,7; 4,5	2,2

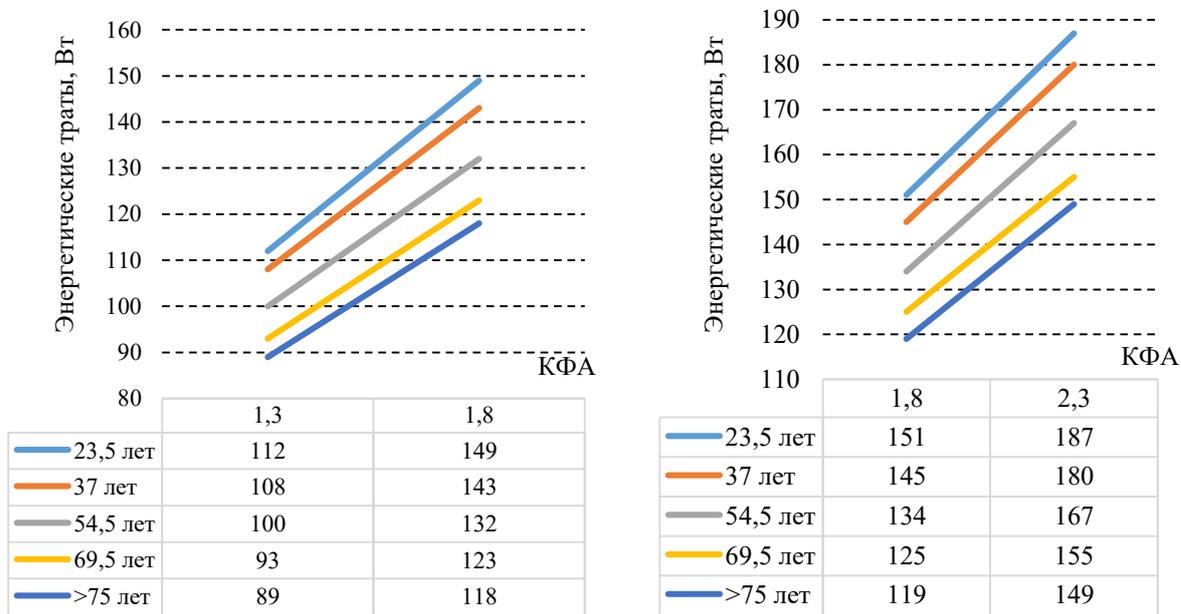


Рис. 1. Расход энергии мужчинами разного возраста для различных коэффициентов физической активности при выполнении легкой работ уровней Ia (а) и Ib (б)

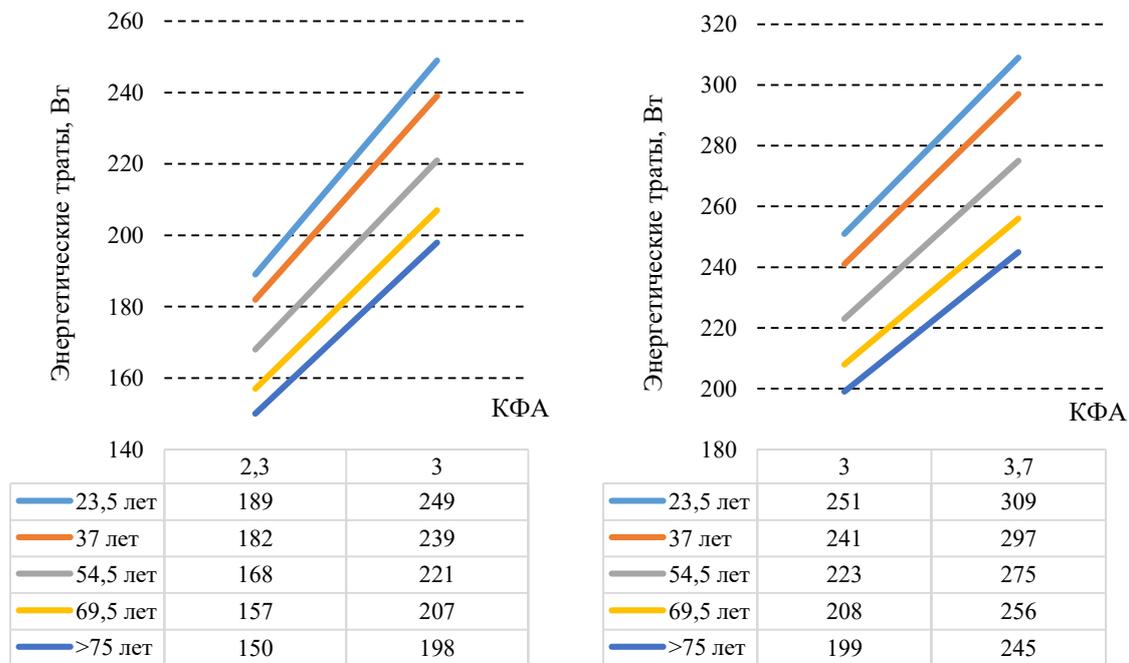


Рис. 2. Расход энергии мужчинами разного возраста для различных коэффициентов физической активности при выполнении работ уровней IIa (а) и IIб (б)

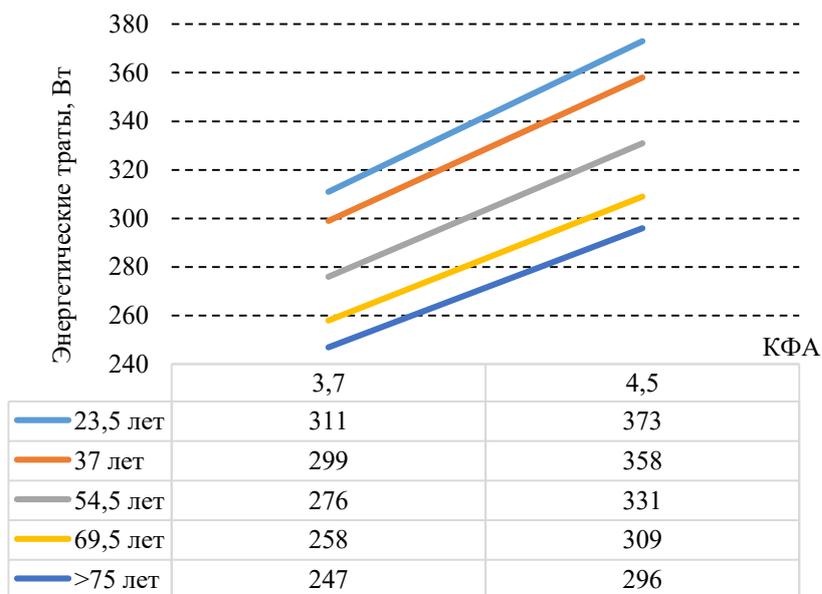


Рис. 3. Расход энергии мужчинами разного возраста для различных коэффициентов физической активности при выполнении тяжелой работы

Из рисунков 1-3 следует, что энергетические траты (соответственно, теплопоступления) людей нужно систематизировать не только в зависимости от вида выполняемой работы (коэффициента физической активности), но и с учетом их возрастной периодизации [19].

Представим в таблице 8 сравнение величин энергетических трат мужчин в зависимости от категории тяжести выполняемой работы с учетом их возраста.

Таблица 8

**Сравнение энергетических трат условного человека и мужчин разного возраста с нормальной массой тела**

Нормативные, справочно-методические данные				Полученные данные							
категория работ по уровню энерготрат	Энерготраты, Вт			Энерготраты, Вт							
	СанПиН 1.2.3685-21 Р2.2.2006-05		[10–15]	Возраст, лет					средние по возрасту	средние по работе	
	диапазон значений	среднее значение		18–29	30–44	45–64	65–74	≥ 75			
Легкая, Ia	105	122	150	112	108	100	93	89	100	117	
	139			149	143	132	123	118	133		
Легкая, Ib	140	157		151	145	134	125	119	135	151	
	174			187	180	167	155	149	168		
Средней тяжести, IIa	175	204		205	189	182	168	157	150	169	196
	232				249	239	221	207	198	223	
Средней тяжести, IIб	233	262	251		241	223	208	199	225	250	
	290		309		297	275	256	245	276		
Тяжелая, III	291	320	292		311	299	276	258	247	278	306
	349				373	358	331	309	296	333	

Использование полученных данных возможно при составлении теплового баланса здания, определения теплового комфорта человека [21–23], разработки моделей [24] и выполнения иных исследований [25]. Таким образом, при адаптивном расчете систем обеспечения микроклимата необходимо учитывать возраст человека (специфика определенных видов производств,

работы предприятий и т.д.), то данные таблицы 8 будут полезны проектировщикам.

Рассмотрим влияние уточненных данных при определении теплового комфорта человека. Подобная оценка базируется на исследованиях П.О. Фангера [26], на основе прогнозируемой средней оценки (PMV), используя который можно предугадать тепловое ощущение группы людей (табл. 9).

Таблица 9

## Соответствие ощущений человека и прогнозируемой средней оценки микроклимата [26]

значение $PMV$	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
тепловое ощущение	Жарко	Тепло	Немного тепло	Нейтрально	Немного прохладно	Прохладно	Холодно

Однако, чтобы получить более полное представление о восприятии микроклимата здания, необходимо учитывать уровень удовлетворенности находящихся в помещении людей. Для этого

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2), \quad (1)$$

Для расчета необходимо учитывать следующие параметры:

- параметры окружающей среды;
- температура воздуха в помещении;
- средняя температура окружающих поверхностей;
- влажность воздуха;
- скорость воздуха;
- личные факторы;
- скорость метаболизма – может изменяться в зависимости от уровня активности человека. В качестве единицы измерения принимают  $1 \text{ мет} = 58 \text{ Вт/м}^2$ , что соответствует энергии, производимой на единицу площади поверхности среднестатистического здорового человека, находящегося в сидячем положении в состоянии покоя. В стандартах приводятся значения скорости метаболизма для различных видов деятельности;
- уровень теплоизоляции одежды человека – единицей измерения принимается  $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ , что соответствует брюкам, рубашке с длинными рукавами и куртке. В стандартах указаны значения теплоизоляции как типовых комплектов одежды, так и отдельных её элементов.

Для демонстрации необходимости уточнения тепловыделения человека при его нахождении в помещении проведем расчёт. В качестве исходных данных примем следующие значения окружающей среды:

- температура внутреннего воздуха  $t_{\text{возд}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- средняя температура окружающих поверхностей  $t_{\text{пов}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- относительная влажность воздуха  $\phi = 50 \text{ \%}$ ;
- скорость воздуха  $V_{\text{возд}} = 0,1 \text{ м/с}$ ;
- теплоизоляция комплекта одежды  $I_{\text{cl}} = 0,5 \text{ кло}$ , соответствующее комплекту одежды

П.О. Фангер разработал дополнительное уравнение (1), которое отражает зависимость  $PMV$  с прогнозируемым процентом недовольных  $PPD$  [27]:

теплого сезона по ГОСТ Р ИСО 7730-2009: «комбинации одежды данной теплоизоляции: трусы, длинные легкие брюки, рубашка с открытой шеей и короткими рукавами, легкие носки и ботинки».

Прогнозируемый процент недовольных ( $PPD$ ), устанавливающий количественный прогноз процентной доли жителей, неудовольственных температурой в помещении, согласно *ISO 7730* не должен превышать 20 %. Данный показатель соответствует доле людей, испытывающих локальный дискомфорт, рассчитанный по уравнению теплового баланса между телом человека и окружающей средой. В расчетах учитывается скорость метаболизма (обмена веществ) принимается в соответствии с видом деятельности человека. Результаты расчета показателей  $PMV$  и  $PPD$  с представлены в таблице 10.

Однако подобный метод расчета не позволяет оценить тепловой комфорт человека в зависимости от его возраста и вида деятельности по степени тяжести. Применим данные, полученные в таблице 8, для расчета показателей. Полученные данные индекса теплового комфорта ( $PMV$ ) представлены в таблице 11.

Полученные данные показателя прогнозируемого процента недовольных ( $PPD$ ) представлены в таблице 12.

Сравнив полученные данные, можно отметить, что оценка комфортности человека с использованием полученных данных энергетических трат позволяет более гибко рассматривать тепловые состояния отдельных возрастных групп работников различного типа производств или жильцов многоквартирных домов, что даёт возможность более качественного регулирования внутреннего микроклимата конкретного помещения с учетом рассмотренных факторов.

Таблица 10

**Данные расчета показателей PMV и PPD с использованием состояний человека согласно  
ГОСТ Р ИСО 7730 «Эргономика термальной среды»**

Состояние	Скорость обмена веществ, Вт/м <sup>2</sup>	PMV	Ощущение	PPD, %
Полулежа	46	-4,13	Очень холодно	100
Сидя, расслабленно	58	-2,3	Прохладно	88,4
Сидячая работа (в офисе, дома, школе)	70	-1,42	Немного прохладно	46,67
Легкая двигательная активность, работа в позе стоя (покупка товаров, легкая промышленность)	93	-0,46	Нейтрально	9,43
Средняя двигательная активность, работа в позе стоя (продавец, работа по дому, механическая обработка)	116	0,11	Нейтрально	5,24
<b>Ходьба по горизонтальной поверхности:</b>				
2 км/ч	110	-0,02	Нейтрально	5,01
3 км/ч	140	0,57	Немного тепло	11,88
4 км/ч	165	1,02	Немного тепло	27,15
5 км/ч	200	1,65	Тепло	58,8

Таблица 11

**Данные расчета индекса теплового комфорта (PMV)**

Нормативные, справочно-методические данные				Полученные данные				
категория работ по уровню энерготрат	СанПиН 1.2.3685-21 Р2.2.2006-05	[10–15]		Возраст, лет				
				18–29	30–44	45–64	65–74	≥75
Легкая, Ia	-2,27	-1,56	-0,79	-2,19	-2,40	-2,83	-3,32	-3,38
	-1,05			-0,98	-1,11	-1,36	-1,55	-1,63
Легкая, Ib	-1,02	-0,65		-0,93	-1,06	-1,30	-1,49	-1,59
	-0,35			-0,29	-0,39	-0,55	-0,71	-0,76
Средней тяжести, Pa	-0,34	0,05		-0,27	-0,36	-0,54	-0,67	-0,74
	0,36			0,42	0,32	0,17	0,07	0,02
Средней тяжести, Pb	0,38	0,67	0,44	0,34	0,19	0,08	0,03	
	0,96		1,00	0,89	0,72	0,59	0,54	
Тяжелая, III	0,97	1,25	0,98	1,01	0,91	0,73	0,61	0,56
	1,54		1,60	1,46	1,26	1,12	1,06	

Таблица 12

**Данные расчета показателя прогнозируемого процента недовольных (PPD)**

Нормативные, справочно-методические данные				Полученные данные					
категория работ по уровню энерготрат	СанПиН 1.2.3685-21 Р2.2.2006-05	средние Сан-ПиН 1.2.3685-21 Р2.2.2006-05	[10–15]	Возраст, лет					
				18–29	30–44	45–64	65–74	≥75	
Легкая, Ia	87,32	53,99	18,14	84,59	91,02	98,07	99,73	99,90	
	28,12			25,12	31,18	43,14	53,89	57,89	
Легкая, Ib	27,01	13,8		23,27	28,90	40,04	50,18	55,90	
	7,62			6,80	8,18	11,41	15,61	17,07	
Средней тяжести, Pa	7,4	5,05		5,08	6,47	7,71	11,02	14,46	16,40
	7,77				8,64	7,15	5,61	5,09	5,01
Средней тяжести, Pb	7,93	14,57	8,99		7,43	5,78	5,13	5,02	
	24,28		25,95		21,67	16,02	12,39	11,19	
Тяжелая, III	24,68	37,74	25,08		26,74	22,40	16,32	12,91	11,68
	52,87				56,13	48,84	38,32	31,37	28,87

**Выводы.** Полученные величины коэффициентов физической активности (КФА) для мужчин с нормальной массой тела могут быть уточнены для других антропометрических параметров.

Полученные расчетные данные по энерготратам мужчин (средние величины по возрасту и работе) близки к нормативным и справочно-методическим величинам. Однако при адаптивном расчете систем обеспечения микроклимата необходимо учитывать возраст человека (специфика определенных видов производств, работы предприятий и т.д.), то данные таблицы 8 будут полезны проектировщикам. Использование полученных данных возможно при составлении теплового баланса здания, определения теплового комфорта человека, разработки моделей и выполнения иных исследований.

Следует отметить, что полученные данные, указанные в таблице 8, требуются при создании систем комфортного микроклимата, в том числе организации систем персональной (индивидуальной) и адаптивной вентиляции.

*Источник финансирования.* Исследования выполнены по гранту Президента РФ для ведущей научной школы (проект НШ-25.2022.4).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Банхиди Л. Тепловой микроклимат помещений. М.: Стройиздат, 1981. 248 с.
2. Губернский Ю.Д., Шилькрот Е.О. Сколько воздуха нужно человеку для комфорта? // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2008. № 4. С. 4–12.
3. Нормы воздухообмена: дискуссия специалистов // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2019. № 8. С. 32–39.
4. Устинов В.В. Определение минимального расхода наружного воздуха при проектировании систем вентиляции // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2016. №6. С. 36–44.
5. Dешко V., Buyak N. A model of human thermal comfort for analysing the energy performance of buildings // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 4. No 8(82). Pp. 42–48. DOI 10.15587/1729-4061.2016.74868.
6. Zvenigorodsky I., Lobanov D., Mershchiyev A., Sheps R. Carbon dioxide as the main hazard in the design of personal ventilation systems // E3S Web of Conferences. Rostov-on-Don. 2020. 11018. DOI 10.1051/e3sconf/202017511018.
7. Лобанов Д.В., Мершиев А.А., Соловьев С.А. Системы персональной энергосберегающей вентиляции офисных помещений // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2017. № 3(2). С. 60–69.
8. Системы адаптивной вентиляции: перспективные направления развития // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2011. № 7. С. 30–33.
9. Физиология человека: под ред. Г. И. Кошечко. М.: Медицина. 1985. 544 с.
10. Стомахина Г.И., Бобровицкий И.И., Малявина Е.Г., Плотникова Л.В. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: Жилые здания со встроенно-пристроенными помещениями общественного назначения и стоянками автомобилей. Коттеджи: Справочное пособие. М.: Пантори, 2003. 308 с.;
11. Титов В.П. Курсовое и дипломное проектирование по вентиляции промышленных зданий. М.: Стройиздат, 1985. 208 с.
12. Каменев П.Н., Тертичник Е.Н. Вентиляция. М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов. 2008. 614 с.
13. Щекин Р.В. Справочник по теплоснабжению и вентиляции. Книга вторая. Вентиляция и кондиционирование воздуха: 4-е изд., перераб. и доп. Киев: Будівельник, 1976. 416 с.
14. Таурит В.Р., Васильев В.Ф. Вентиляция в гражданских зданиях. Учебное пособие // СПб: АНТТ-Принт, 2008. 147 с.
15. Методические рекомендации по определению минимального воздухообмена в помещениях жилых и общественных зданий. Москва 2018 г. 62 с.
16. Бурназян А.И., Газенко О.Г. Справочник по космической биологии и медицине: 3-е изд., перераб. и доп. М.: Медицина. 1983. 352 с.
17. Human energy requirements. Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation Rome. World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations, United Nations University Publ. 2004. 96 p.
18. Лобанов Д.В., Звенигородский И.И., Новосельцев Б.П., Кононова М.С. Обоснование учета комплекса физических параметров человека при проектировании систем вентиляции // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2022. № 1(20). С. 48–58.
19. Методические Рекомендации 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации».
20. Покровский В. М., Коротько Г.Ф., Наточин Ю.В. Физиология человека (т.2) М.: Медицина. 1997. 368 с.
21. Turhan C., Gokcen Akkurt The relation between thermal comfort and human-body exergy consumption in a temperate climate zone // Energy and

Buildings. 2019. Vol. 205. 109548. DOI 10.1016/j.enbuild.2019.109548.

22. Mady C.E.K., Ferreira M.S., Yanagihara J.I., De Oliveira S. Human body exergy analysis and the assessment of thermal comfort conditions // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 77. Pp. 577–584. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.05.039.

23. Yang B., Li X. Non-invasive (non-contact) measurements of human thermal physiology signals and thermal comfort/ discomfort poses - A review // Energy and Buildings. 2020. № 224. 110261.

24. Albuquerque-Neto C. Yanagihara J.I. A passive model of the heat, oxygen and carbon dioxide transport in the human body // ASME Interna-

tional Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings. Lake Buena Vista, FL. 2010. Pp. 155–166.

25. Prek M. Thermodynamic analysis of human heat and mass transfer and their impact on thermal comfort // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2005. Vol. 48. No. 3–4. Pp. 731–739. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.09.006.

26. Fanger P.O. Thermal Comfort. New York : McGraw-Hill Book Company, 1973. 244 p.

27. Svirin M.V., Kosilov D.M., Seminenko A.S. Dependence of the temperature of the beginning of the heating season on the energy efficiency class of the building // Journal of Physics: Conference Series. 2021. T. 1926. 012070.

#### Информация об авторах

**Лобанов Дмитрий Валерьевич**, старший преподаватель кафедры жилищно-коммунального хозяйства. E-mail: LDV-36@mail.ru. ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». Россия, 394019, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

**Звенигородский Игорь Иванович**, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры. E-mail: zvendocent@mail.ru. ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 а.

**Свирин Максим Валерьевич**, инженер, аспирант кафедры теплогасоснабжения и вентиляции. E-mail: svirinmv@ua.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Сафонов Сергей Александрович**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры. E-mail: vgasu.gkh@gmail.com. ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 а.

**Семиненко Артем Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогасоснабжения и вентиляции. E-mail: seminenko.as@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 14.09.2022 г.

© Лобанов Д.В., Звенигородский И.И., Свирин М.В., Сафонов С.А., Семиненко А.С., 2023

<sup>1,\*</sup>Lobanov D.V., <sup>2</sup>Zvenigorodskij I.I., <sup>3</sup>Svirin M.V., <sup>2</sup>Safonov S.A., <sup>3</sup>Seminenko A.S.

<sup>1</sup>Voronezh state technical University

<sup>2</sup>Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin

<sup>3</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

\*E-mail: LDV-36@mail.ru

## DETERMINATION OF HEAT GAIN FROM A PERSON, TAKING INTO ACCOUNT ENERGY CONSUMPTION AND PHYSICAL ACTIVITY

**Abstract.** The analysis of the current regulatory documents and reference and methodological literature used in carrying out calculations related to the determination of heat emissions from people engaged in various types of work is carried out. The incomplete correspondence of the values of heat emissions to the characteristics of the severity of the work performed for various types of activities, taking into account the age of people with their physique corresponding to normal body weight, was revealed. The calculated values of the coefficient of physical activity for a conditional person, as well as the values of heat emissions of men with their division by age categories, are determined. The graphs of energy expenditure for men of different ages performing the following types of work are presented: light (Ia, Ib), moderate (IIa, IIb), heavy. The obtained values of energy consumption are compared with the data of regulatory documents and reference literature for various categories of work. The relevance and necessity of taking into account data on heat emissions from

people, taking into account their age, anthropometric parameters and other conditions when designing microclimate systems, including personal and adaptive ventilation systems, is shown. The results of the study will be useful to design engineers implementing circuit solutions of microclimate systems that provide comfortable parameters of the air environment in rooms for various purposes.

**Keywords:** human energy consumption, heat release, physical parameters of a person, conditional person, average person, coefficient of physical activity.

## REFERENCES

1. Banhidi L. Thermal microclimate of premises [Тепловои` микроклимат помешчении`]. M.: Stroyizdat, 1981. 248 p. (rus)
2. Gubernsky Yu.D., Shilkrot E.O. How much air does a person need for comfort? [Skol`ko vozduha nuzhno cheloveku dlia komforta?]. AVOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and construction thermophysics. 2008. No. 4. Pp. 4–12. (rus)
3. Norms of air exchange: discussion of specialists [Normy` vozduhoobmena: diskussiiia spetsialistov]. AVOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and construction thermophysics. 2019. No. 8. Pp. 32–39. (rus)
4. Ustinov V.V. Determination of the minimum outdoor air consumption in the design of ventilation systems [Opredelenie minimal'nogo rashoda naruzhnogo vozduha pri proektirovanii sistem ventilatsii]. AVOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and construction thermophysics. 2016. No.6. Pp. 36–44. (rus)
5. Deshko V., Buyak N. A model of human thermal comfort for analysing the energy performance of buildings. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 4. No. 8(82). Pp. 42–48. DOI:10.15587/1729-4061.2016.74868.
6. Zvenigorodsky I., Lobanov D., Mershchiyev A., Sheps R. Carbon dioxide as the main hazard in the design of personal ventilation systems. E3S Web of Conferences. Rostov-on-Don. 2020. Pp. 11018. DOI:10.1051/e3sconf/202017511018.
7. Lobanov D.V., Mershchiev A.A., Soloviev S.A. Systems of personal energy-saving ventilation of office premises [Sistemy` personal'noi` energosberegaiushchei` ventilatsii ofisny`kh pomeshchenii`]. Housing and communal infrastructure. 2017. No. 3(2). Pp. 60–69. (rus)
8. Adaptive ventilation systems: promising areas of development [Sistemy` adaptivnoi` ventilatsii: perspektivny'e napravleniia razvitiia]. AVOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and construction thermophysics. 2011. No. 7. Pp. 30–33. (rus)
9. Human physiology [Fiziologiiia cheloveka]: edited by G. I. Kositsky. M.: Medicine. 1985. 544 p. (rus)
10. Stomaxina G.I., Bobroviczkiy I.I., Mal'yavina E.G., Plotnikova L.V. Heating, ventilation and air conditioning: Residential buildings with built-in attached public spaces and parking lots. Cottages: Reference manual [Otoplenie, ventilatsiia i konditsionirovanie vozduha: Zhily'e zdaniia so vstroenno-pristroenny`mi pomeshcheniiami obshchestvennogo naznacheniiia i stoiankami avtomobilei`. Kottedzhi: Spravochnoe posobie]. M.: Pantori, 2003. 308 p. (rus)
11. Titov V.P. Course and diploma design for ventilation of industrial buildings [Kursovoe i diplomnoe proektirovanie po ventilatsii promy'shlenny`kh zdanii`]. Moscow: Stroyizdat, 1985. 208 p. (rus)
12. Kamenev P.N., Tertchnik E.N. Ventilation [Ventilatsiia]. M.: Publishing House Assoc. builds. universities. 2008. 614 p. (rus)
13. Shchekin R.V. Handbook of heat supply and ventilation. Book two. Ventilation and air conditioning [Spravochnik po teplosnabzheniiu i ventilatsii. Kniga vtoraiia. Ventilatsiia i konditsionirovanie vozduha]. Kiev: Budivelnik, 1976. 416 p. (rus)
14. Taurit V.R., Vasiliev V.F. Ventilation in civil buildings. Textbook [Ventilatsiia v grazhdanskikh zdaniiax. Uchebnoe posobie]. St. Petersburg: ANTT-Print, 2008. 147 p. (rus)
15. Methodological recommendations for determining the minimum air exchange in residential and public buildings [Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniiu minimal'nogo vozduhoobmena v pomeshcheniiax zhily`kh i obshchestvenny`kh zdanii`]. M., 2018 62 p. (rus)
16. Burnazyan A.I., Gizenko O.G. Handbook of Space Biology and [Spravochnik po kosmicheskoi` biologii i medicine] M.: Medicine. 1983. 352 p. (rus)
17. Human energy requirements. Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation Rome. World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations, United Nations University Publ. 2004. 96 p.
18. Lobanov D.V., Zvenigorodsky I.I., Novoseltsev B.P., Kononova M.S. Justification of taking into account the complex of physical parameters of a person when designing ventilation systems [Obosnovanie ucheta kompleksa fizicheskikh parametrov cheloveka pri proektirovanii sistem ventilatsii]. Housing and communal infrastructure. 2022. No. 1(20). Pp. 48–58. (rus)
19. Methodological Recommendations 2.3.1.0253-21 "Norms of physiological needs for energy and nutrients for various population groups of the Russian Federation" [Normy` fiziologicheskikh

potrebnosti` v e`nergii i pishchevy`kh veshchestvakh dlia razlichny`kh grupp naseleniia Rossii`skoi` Federacii]. (rus)

20. Pokrovsky V.M., Korotko G.F., Natochin Yu.V. Human physiology [Fiziologiya cheloveka] vol.2 M.: Medicine. 1997. 368 p. (rus)

21. Turhan C., Gokcen Akkurt G. The relation between thermal comfort and human-body exergy consumption in a temperate climate zone. Energy and Buildings. 2019. Vol. 205. 109548. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109548.

22. Mady C.E.K., Ferreira M.S., Yanagihara J.I., De Oliveira S. Human body exergy analysis and the assessment of thermal comfort conditions. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 77. Pp. 577–584. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.05.039.

23. Yang B., Li X. Non-invasive (non-contact) measurements of human thermal physiology signals and thermal comfort/ discomfort poses - A review.

Energy and Buildings. 2020. № 224. 110261.

24. Albuquerque-Neto C. Yanagihara J.I. A passive model of the heat, oxygen and carbon dioxide transport in the human body. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings. Lake Buena Vista, FL. 2010. Pp. 155–166.

25. Prek M. Thermodynamic analysis of human heat and mass transfer and their impact on thermal comfort. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2005. Vol. 48. No. 3-4. Pp. 731–739. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.09.006.

26. Fanger P.O. Thermal Comfort. New York. McGraw-Hill Book Company, 1973. 244 p.

27. Svirin M.V., Kosilov D.M., Seminenko A. S. Dependence of the temperature of the beginning of the heating season on the energy efficiency class of the building. Journal of Physics: Conference Series. 2021. T. 1926. 012070.

#### *Information about the authors*

**Lobanov, Dmitry V.** Senior Lecturer. E-mail: LDV-36@mail.ru. Voronezh state technical University. Russia, 394019, Voronezh, 20 letiya Oktyabrya str., 84.

**Zvenigorodsky, Igor I.** PhD, Assistant professor. E-mail: zvendocent@mail.ru. Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin. Russia, 394064, Voronezh, st. Old Bolsheviks, 54 a.

**Svirin, Maxim V.** Postgraduate student. E-mail: svirinmv@ya.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Safonov, Sergey A.** PhD, Assistant professor. E-mail: vgasu.gkh@gmail.com. Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin. Russia, 394064, Voronezh, st. Old Bolsheviks, 54 a.

**Semenenko, Artem S.** PhD, Assistant professor. E-mail: seminenko.as@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 14.09.2022*

#### **Для цитирования:**

Лобанов Д.В., Звенигородский И.И., Свиринов М.В., Сафонов С.А., Семиненко А.С. Определение теплопоступлений от человека с учетом энерготрат и физической активности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 1. С. 42–52. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-42-52

#### **For citation:**

Lobanov D.V., Zvenigorodskij I.I., Svirin M.V., Safonov S.A., Seminenko A.S. Determination of heat gain from a person, taking into account energy consumption and physical activity. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 1. Pp. 42–52. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-42-52

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-53-60

**\*Черныш А.С., Поляков А.И.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: geotex2005@mail.ru

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ ПОДЛЕЖАЩЕЙ РЕНОВАЦИИ

**Аннотация.** Оценка физического износа зданий и сооружений является дорогостоящим, длительным и в какой-степени субъективным процессом. Процесс принятия решения о необходимости ремонта, реконструкции или сноса здания растянут во времени, иногда затягиваясь на годы. При этом состояние здания или сооружения может претерпеть значительные изменения, в связи с чем, оперативность информации принимает решающее значение. Авторами статьи предложена методика оценки физического износа зданий и сооружений по результатам тепловизионной съемки, которая позволяет достаточно точно указывать области теплопотерь. Ограждающие конструкции здания совмещают в себе несущие и теплозащитные функции. Наличие дефектов (трещин, сколов, замачивания) приводят к формированию мостиков потерь тепла, которые и проявляются на тепловизионной съемке. Производство работ производится как стационарными сканерами, так и с применением беспилотных летательных аппаратов. Тепловизионную съемку следует проводить в отопительный период. Важным представляется возможность получения информации о наличии повреждений в труднодоступной части зданий. При использовании стационарных сканеров возможна комбинированная оценка состояния сооружения, включающая геометрические параметры. Камеральная обработка результатов съемки производится на основании стандартных методик, закрепленных нормативными документами. Являясь составной частью комплекса инженерных изысканий, проводимых с целью определения физического износа зданий и сооружений, эта методика позволяет дополнить количественными данными общую ситуацию, анализируемую при составлении итогового заключения.

**Ключевые слова:** тепловизионное обследование, тепловое излучение конструкций, управление объектами, долговечность, управление жизненным циклом, устойчивость, неразрушающая оценка, беспилотная воздушная система, инфракрасная термография.

**Введение.** Текущую ситуацию на рынках жилой, коммерческой и промышленной недвижимости можно описать как условно стабильную. Так по данным Росстат во II квартале 2022 г. руководители 71 % строительных организаций оценили экономическую ситуацию в строительстве как «удовлетворительную», 14 % – как «неудовлетворительную» и 13 % – как «благоприятную». Однако наблюдаются разнохарактерные трудности при строительстве новых площадей. Связано это в первую очередь с нехваткой ресурсов. Основными факторами, сдерживающими деятельность строительных организаций, являются: «высокая стоимость материалов, конструкций, изделий» (56 %), «недостаток квалифицированных рабочих» (21 %), «недостаток финансирования» (18 %), «недостаток заказов на работы» (17 %), «неплатежеспособность заказчиков» (15 %) (значения даны в процентном соотношении от общего числа респондентов) [1].

Финансирование многих строительных площадок было заморожено в период коронавирусных ограничений, а после их снятия, когда темпы строительства начали показывать положительную динамику, последовала новая экономическая угроза, связанная с введенными со стороны западных стран ограничениями. Помимо этого, в

густонаселенных районах России хорошо ощущается нехватка земельных ресурсов ввиду плотной застройки. А накладываемые нормативными документами требования техногенной и экологической безопасности существенно увеличивают требуемую площадь застройки. На ряду с этим возникает необходимость ввода в эксплуатацию заброшенной или законсервированной недвижимости, период невостребованности которой может составлять десятки лет [2].

Приведенные факторы говорят о том, что начало нового капитального строительства, будь оно жилое или промышленное, слишком дорого обходится компаниям застройщикам и государству. Поэтому целесообразнее использовать уже имеющуюся недвижимость, проведя соответствующие изыскания для определения степени её физического износа. Для жилого фонда это позволит предотвратить разной степени аварии и улучшить качество жизни жильцов, выполнив своевременный ремонт и модернизацию [3, 4, 5]. В свою очередь промышленные комплексы таким образом смогут закрыть вопрос о степени износа помещений при работающем оборудовании, предотвратить техногенные и экологические аварии с их стороны, а также определить возможность модернизации производства с минимальными издержками.

Исходя из этого авторами предложена методика оценки физического износа зданий по результатам тепловизионной съемки. Однако не стоит рассматривать её отдельно от комплекса инженерных изысканий, проводимых при обследовании зданий и сооружений. Предложенный алгоритм позволит получить количественные данные для формирования детальной картины, анализируемой при составлении итогового заключения.

**Материалы и методы.** В настоящее время ситуация в сфере нормативного регулирования и методического обеспечения оценки физического износа зданий и сооружений складывается таким образом, что отсутствует единый подход к обследованию. А предлагаемая методика не описывалась ранее.

Основными руководящими документами при обследовании технического состояния выступают межгосударственные и национальные стандарты, закрепляющие основные термины и определения (ГОСТ 20911-89), правила обследования и мониторинга технического состояния зданий и сооружений (ГОСТ 31937-2011, ГОСТ Р 54523-2011). Тепловизионная съемка в комплексе изысканий для определения технического состояния зданий и сооружений, как правило, применяется при оценке теплоизоляции ограждающих конструкций (ГОСТ Р 54852–2021).

На ряду с ГОСТ немаловажную роль играют строительные нормы Госгражданстроа (ВСН 53-86(р)) [6], дающие более развернутый ответ на вопросы о методике проведения обследования при технической инвентаризации, планировании и проектировании капитального ремонта жилищного фонда независимо от его ведомственной принадлежности. Однако они не распространяются на оценку физического износа зданий, пострадавших в результате стихийных бедствий. Наравне с этим применяются еще одни нормы, разработанные Госкомархитектуры (ВСН 57-88(р)), регламентируемые виды, объем, порядок организации и выполнения работ по техническому обследованию жилых зданий высотой до 25 этажей включительно независимо от их ведомственной принадлежности.

Для особо ответственных промышленных сооружений, требующих однозначной качественной оценки, разработан ряд руководящих документов, содержащих методические указания по обследованию [7, 8]. Помимо этого, обследование таких объектов регламентируется федеральными законами [9].

Комплекс инженерных изысканий для оценки физического износа зданий и сооружений направлен на определение степени утраты первоначальных технико-эксплуатационных качеств

(прочности, устойчивости, надежности и др.) в результате воздействия природно-климатических факторов и жизнедеятельности человека. Включает в себя следующие мероприятия: предварительное обследование, детальное инструментальное обследование, определение физико-технических характеристик в лабораторных условиях, обобщение результатов обследования (составление отчета) [10]. Узкими местами является наличие труднодоступных зон для визуального и инструментального обследования. Наличие таких мест, особенно при работе с многоэтажными жилыми зданиями, может составлять до 50 % и более объема здания. Этот факт значительно снижает качество и объективность оценки состояния зданий, поскольку необходимы замеры площадей, характеристика и описание повреждений. Эти виды работ затруднены из-за ограничения доступа в жилые помещения, наличия различных видов наружной и внутренней отделки.

Как известно основными видами деформаций зданий и сооружений является прогиб, выгиб, перекос, кручение и крен [11]. Причинами деформаций в основном становятся неравномерные осадки основания. Последствия данных видов деформаций проявляется в образовании трещин в несущих конструкциях и отклонении геометрических параметров здания или сооружения [12]. В свою очередь отклонение геометрических параметров приводит к изменению плотности ограждающих конструкций, что проявляется на тепловизионной съемке. Для фиксации излученной съемку следует проводить в период отопления. Логично предположить, чем меньше плотность ограждающей конструкции, тем выше интенсивность излучения. Для установления видов деформации проводится тепловизионное сканирование при помощи сканера с тепловизором, при этом, можно фиксировать не только области теплопотерь, но и геометрические параметры зданий. Анализ геометрических параметров позволяет дополнить результаты тепловизионной съемки. При оценке технического состояния крыш и кровли применяются беспилотные летательные аппараты, оснащенные тепловизионной камерой [13].

**Основная часть.** Процесс проведения обследования зданий и сооружений по предлагаемой методике стоит из трех этапов: подготовительные работы, полевые работы и интерпретации результатов тепловизионной съемки.

На этапе подготовительных работ выполняется определение возможности проведения изысканий и наиболее благоприятного времени для полевых работ. Возможность выполнения обследова-

дования зависит от разницы внутренней и наружной температур воздуха. Для этого вычисляют минимальный требуемый перепад температур, зависящий от характеристик используемого оборудования и теплотехнических показателей ограждающей конструкции.

Минимальный перепад температуры внешнего и внутреннего воздуха определяется для того, чтобы тепловизионное оборудование с заданной теплочувствительностью могло отразить проходящее через ограждающие конструкции излучение. Вычисляется по формуле:

$$\Delta t_{min} = 2\sigma R_o^{np} \frac{\alpha-r}{1-r} \quad (1)$$

где  $\sigma$  – заданная чувствительность тепловизионного оборудования, °C;

$R_o^{np}$  – проектное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции,  $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Bm}$ ;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи конструкции,  $\frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C}$ , принимаемый для кровель равным 23; для фасадов 11, 20 и 30 для скорости ветра 1, 3 и 6 м/с соответственно;

$r$  – относительное сопротивление теплоотдаче дефекта, определяемое как отношение требуемого нормативно-технической документацией сопротивления теплопередаче  $R_o^{нмд}$  к проектному значению  $R_o^{np}$  (но не более 0,85):

$$r = \frac{R_o^{нмд}}{R_o^{np}} \quad (2)$$

Если рассчитанное по формуле (1) значение соответствует погодным условиям на день проведения обследования, то вычисляется минимальное расстояние от тепловизионного оборудования до обследуемой ограждающей конструкции. При обследовании кровель с применением БПЛА оснащенных тепловизором это значение принимается как минимальная высота полета над конструкцией и рассчитывается по формуле:

$$H \leq \frac{\Delta s N_c}{10\gamma} \quad (3)$$

где  $\gamma$  – поле обзора тепловизора, рад,

$\Delta s$  – линейный размер определяемого дефекта:

– для наружной поверхности 0,2...1 м;

– для внутренней поверхности 0,01...0,2 м;

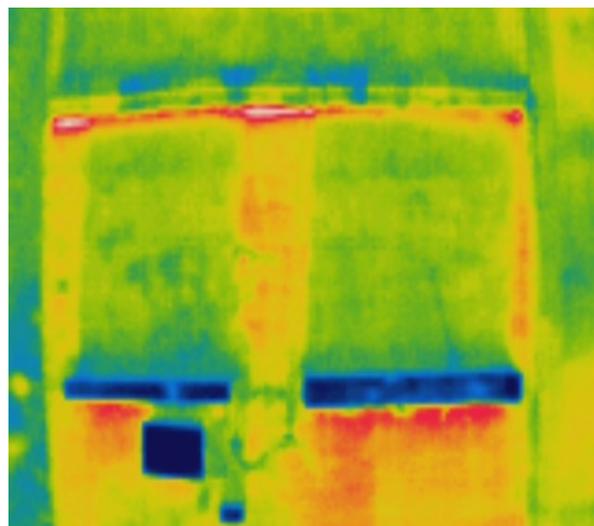
$N_c$  – высота матрицы тепловизионного оборудования, пкс.

При проведении полевых работ результатом является набор снимков. В зависимости от возможностей тепловизионного оборудования могут быть получены только тепловизионные снимки или пары снимков тепловизионный и соответствующий ему естественный (рис. 1).

Естественные изображения в дальнейшем можно использовать для визуальной оценки состояния ограждающих конструкций [14], выполнив их дешифрирование в ручном или автоматическом режиме [15], определяется тип дефектов, их площадь и процентное соотношение поврежденной поверхности к общей площади обследуемой.



а



б

Рис. 1. Исходный комплект фотографий, получаемый при выполнении полевых работ:  
а) натуральное изображение, б) тепловизионное изображение

Описываемая методика разрабатывается с учетом принятого алгоритма изыскательского производства. Это делается для того, чтобы без особых издержек применять её в практических

целях. Поэтому количественная оценка результатов адаптирована под действующие строительные нормы обследования и выполняется по известной формуле из ВСН 53-86(р):

$$\Phi_k = \sum_{i=1}^{i=n} \Phi_i \frac{P_i}{P_k} \quad (4)$$

где  $\Phi_i$  – физический износ участка ограждающей конструкции, %;

$P_i$  – площадь участка, определенного как поврежденный, м<sup>2</sup>;

$P_k$  – площадь ограждающей конструкции, для которой выполняется оценка, м<sup>2</sup>.

В приведенной формуле за физический износ участка ограждающей конструкции принимается уровень теплопотерь, который ранжируется по интенсивности. Затем составляется шкала для каждого вида ограждающей конструкции, по которой в дальнейшем и определяют уровень физического износа участка.

Рассчитанные по формуле 4 значения используются для оценки общего физического износа здания или сооружения:

$$\Phi_z = \sum_{i=1}^{i=n} \Phi_k \cdot l_i \quad (5)$$

где  $\Phi_k$  – физический износ отдельной конструкции, элемента или системы, %;

$l_i$  – коэффициент, соответствующий доле восстановительной стоимости отдельной конструкции, элемента или системы в общей восстановительной стоимости здания, принимаемый в соответствии с рекомендациями ВСН 53-86(р).

Рассмотрим предлагаемую методику на примере – материалах тепловизионного обследования кровли жилого пятиэтажного здания.

Для анализа из массива изображений кровельного полотна была отобрана пара снимков (Рис. 1), имеющего видимые дефекты и тепловые потери. Натурными измерениями была определена площадь поверхности изображенной на снимках  $P_k = 169,3$  м<sup>2</sup> и выполнено дешифрирование тепловизионного снимка по интенсивности излучения (Рис. 2). На этапе полевых работ, при съемке кровельного покрытия был выставлен диапазон фиксируемого излучения в пределах от температуры наружного воздуха до температуры внутреннего. Это позволило наилучшим образом распределить интенсивность выделяемого излучения.

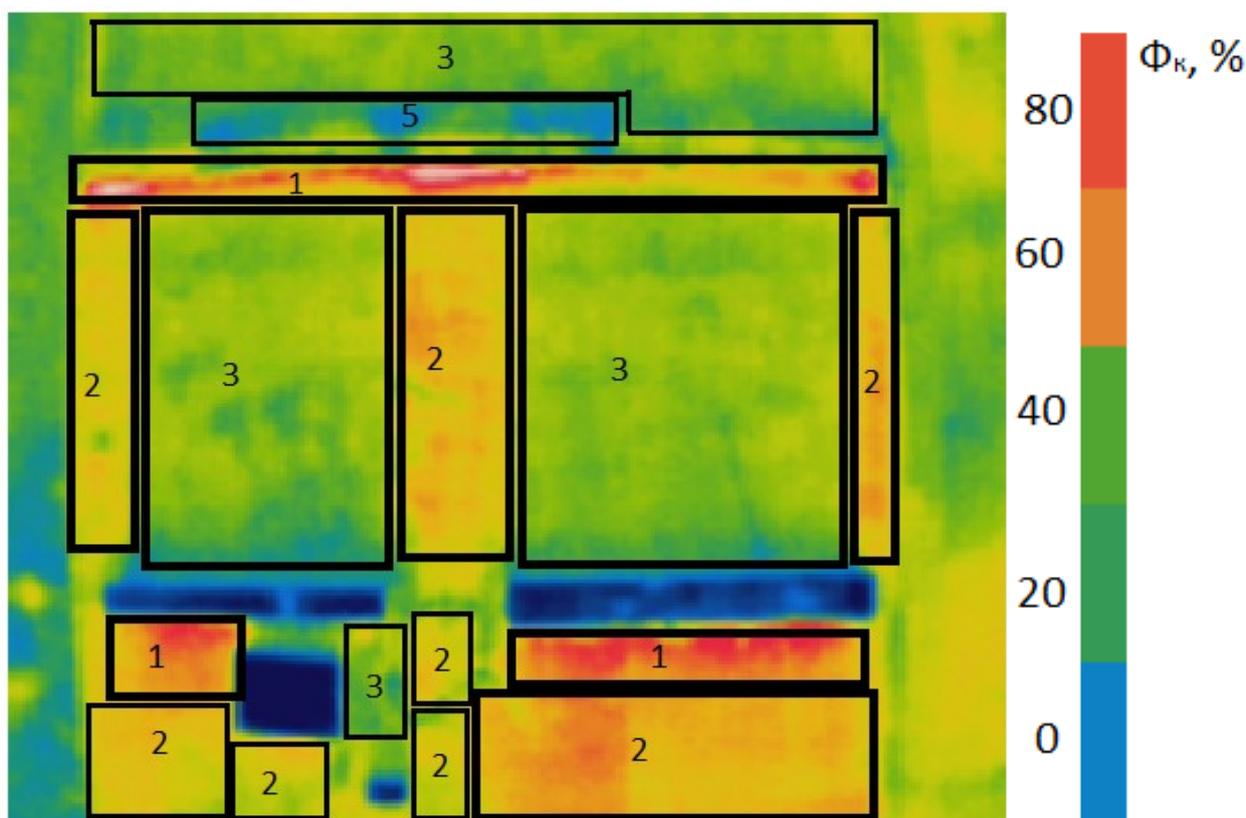


Рис. 2 Дешифрированное тепловизионное изображение

В ходе дешифрирования было выделено 5 наиболее характерных категорий физического износа кровельного покрытия в диапазоне от 0 до 80 %. По результатам камеральной обработки определены площади поврежденных участков, результаты представлены в таблице 1.

Суммировав значения  $\Phi_{ki}$  из таблицы 1 получим общий физический износ обследуемого элемента  $\Phi_k = 48,35$  %. Затем при наличии других обследуемых элементов, по формуле 5 вычисляется общий износ ограждающих конструкций здания или сооружения.

Таблица 1

**Результаты камеральной обработки тепловизионного снимка кровельного покрытия  
пятиэтажного жилого дома**

№, п.п.	$P_i, \text{м}^2$	$\Phi_i, \%$	$\Phi_{\kappa_i} = \Phi_i \frac{P_i}{P_{\kappa}}, \%$
1	19,5	40	4,61
2	11,2	80	5,29
3	6,6	60	2,34
4	25,9	40	6,12
5	11,1	60	3,93
6	35,0	40	8,27
7	4,5	60	1,59
8	7,7	80	3,64
9	4,7	60	1,67
10	2,2	60	0,78
11	1,9	40	0,45
12	1,5	60	0,53
13	1,8	60	0,64
14	6,2	80	2,93
15	15,7	60	5,56

**Выводы.** Описанная в строительной сфере ситуация ведет к росту спроса на услуги по определению физического износа зданий и сооружений. Помимо этого, предъявляются требования безопасности к обследованию промышленных и гражданских сооружений. В первую очередь они регламентируются федеральными законами и национальными стандартами.

Изложенная в статье методика с опорой на действующую нормативно-техническую документацию позволяет получить данные о физическом износе как отдельной ограждающей конструкции, так и их совокупностей, с учетом коэффициентов восстановительной стоимости. Помимо этого, она позволяет выполнить первичное обследование без проведения дорогостоящей оценки каждой строительной конструкции. Исходя из первичных результатов можно сделать вывод о целесообразности выполнения полного обследования. Также может применяться отдельно от комплекса инженерных изысканий в том случае, если требуется оценка только лишь ограждающих конструкций.

Предлагаемую методику можно отнести к этапу детального инструментального обследования и требующую детального научно-теоретического и опытного исследования в комплексе с уже применяемыми методами.

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральная служба государственной статистики «О деловой активности в строительстве во II квартале 2022 года». URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/del-akt\\_2k-2022.pdf](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/del-akt_2k-2022.pdf)
2. Воронов А.А., Попов Б.А. Комплексный геотехнический мониторинг зданий и сооружений воронежской атомной станции теплоснабжения (ВАСТ) // Студент и наука. 2018. №4 (7). С. 14–20
3. Akcamete A., Akinci B., Garrett J.H. Potential utilization of building information models for planning maintenance activities // Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. 2010. Pp. 151–157. <http://www.engineering.nottingham.ac.uk/icccbep/ceedings/pdf/pf76.pdf>
4. Barone G., Frangopol D.M. Life-cycle maintenance of deteriorating structures by multi-objective optimization involving reliability, risk, availability, hazard and cost // Struct. Saf. 2014. Vol. 48. Pp. 40–50. doi:10.1016/j.strusafe.2014.02.002
5. Wu J., Lepech M.D. Incorporating multi-physics deterioration analysis in building information modeling for life-cycle management of durability performance // Automation in Construction. 2020. Vol. 110. 103004. doi:10.1016/j.autcon.2019.103004
6. Гроздов В.Т. Дефекты строительных конструкций и их последствия; изд. 3-е. СПб.: ВИТУ, 2005. 136 с.

7. РД 03-610-03 Методические указания по обследованию дымовых и вентиляционных промышленных труб. URL:<http://gostrf.com/normadata/1/4294816/4294816742.htm>

8. РД 10-138-97. Методические указания. Комплексное обследование крановых путей грузоподъемных машин. URL:<http://gostrf.com/normadata/1/4294851/4294851398.pdf>

9. Федеральный закон от 21.07.1997 N 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов». URL:<http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102048376>

10. Пособие по обследованию строительных конструкций зданий. М.: АО «ЦНИИПРОМЗДАНИЙ». 1997. URL:<https://files.stroyinf.ru/Data1/5/5295/>

11. Гроздов В.Т. Признаки аварийного состояния несущих конструкций зданий и сооружений. СПб.: ВИТУ. 2000. 43 с.

12. Eberechi Ichi, Sattar Dorafshan, Effectiveness of infrared thermography for delamination detection in reinforced concrete bridge decks // Automation in Construction. 2022. Vol. 142. 104523. doi: 10.1016/j.autcon.2022.104523.

13. D'Accardi E., Palumbo D., Tamborrino R., Galietti U., Quantitative analysis of thermographic data through different algorithms // Procedia Structural Integrity. 2018. Vol. 8. Pp 354–367. doi:10.1016/j.prostr.2017.12.036.

14. Garrido I., Lagüela S., Sfarra S., Madruga F.J., Arias P. Automatic detection of moistures in different construction materials from thermographic images // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2019. Vol. 138 (2). Pp. 1649–1668. doi: 10.1007/s10973-019-08264-y

15. Yudin D.A., Adeshkin V., Dolzhenko, A.V., Polyakov A., Naumov A.E. Roof Defect Segmentation on Aerial Images Using Neural Networks // Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research IV. NEUROINFORMATICS 2020. Studies in Computational Intelligence. 2021. Vol 925. doi:10.1007/978-3-030-60577-3\_20

#### Информация об авторах

**Черныш Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, заведующий кафедры городского кадастра и инженерных изысканий. E-mail: [geotex2005@mail.ru](mailto:geotex2005@mail.ru) Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Поляков Александр Иванович**, инженер кафедры городского кадастра и инженерных изысканий. E-mail: [alex-pol12@yandex.ru](mailto:alex-pol12@yandex.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 28.10.2022 г.

© Черныш А.С., Поляков А.И., 2023

*\*Chernysh A.S., Polyakov A.I.*

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

*\*E-mail: geotex2005@mail.ru*

## METHODOLOGY FOR ASSESSING THE CONDITION OF ENCLOSING STRUCTURES OF BUILDINGS ON THE TERRITORY OF RESIDENTIAL DEVELOPMENT SUBJECT TO RENOVATION

**Abstract.** *The assessment of the physical deterioration of buildings and structures is an expensive, lengthy and to some extent subjective process. The process of making a decision on the need for repair, reconstruction or demolition of a building is stretched over time, sometimes dragging on for years. At the same time, the condition of a building or structure may undergo significant changes, and therefore, the efficiency of information is crucial. The authors of the article propose a method for assessing the physical wear of buildings and structures based on the results of thermal imaging, which allows you to accurately indicate the areas of heat loss. The building's enclosing structures combine load-bearing and heat-protective functions. The presence of defects (cracks, chips, soaking) lead to the formation of heat loss bridges, which are manifested in thermal imaging. The work is carried out both with stationary scanners and with the use of unmanned aerial vehicles. Thermal imaging should be carried out during the heating period. It is important to be able to obtain information about the presence of damage in a hard-to-reach part of buildings. When using stationary scanners, a combined assessment of the condition of the structure, including geometric parameters, is possible. The cam-*

era processing of the survey results is carried out on the basis of standard methods fixed by regulatory documents. Being an integral part of a complex of engineering surveys conducted to determine the physical wear of buildings and structures, this technique allows you to supplement the general situation analyzed when drawing up the final conclusion with quantitative data.

**Keywords:** thermal imaging examination, thermal radiation of structures, facility management, durability, life-cycle management, sustainability, non-destructive evaluation, unmanned aerial system, infrared thermography

## REFERENCES

1. Federal State Statistics Service "On BUSINESS Activity in Construction in the second quarter of 2022". [Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistiki «O delovoj aktivnosti v stroitel'stve vo II kvartale 2022 goda. URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/del-akt\\_2k-2022.pdf](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/del-akt_2k-2022.pdf) (rus)
2. Voronov A.A., Popov B.A. Integrated geotechnical monitoring of buildings and structures of the Voronezh nuclear power plant of heat supply (VAST) [Kompleksnyj geotekhnicheskij monitoring zdaniy i sooruzhenij voronezhskoj atomnoj stancii teplosnabzheniya (VAST)]. Student and science. 2018. No. 4 (7). Pp. 14–20 (rus)
3. Akcamete A., Akinci B., Garrett J.H. Potential utilization of building information models for planning maintenance activities. Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. 2010. Pp. 151–157 URL: <http://www.engineering.nottingham.ac.uk/iccbe/proceedings/pdf/pf76.pdf>
4. Barone G., Frangopol D.M. Life-cycle maintenance of deteriorating structures by multi-objective optimization involving reliability, risk, availability, hazard and cost. Struct. Saf. 2014. Vol. 48. Pp. 40–50. doi:10.1016/j.strusafe.2014.02.002
5. Wu J., Lepech M.D. Incorporating multi-physics deterioration analysis in building information modeling for life-cycle management of durability performance. Automation in Construction. 2020. Vol. 110. 103004. doi:10.1016/j.autcon.2019.103004
6. Grozdov V.T. Defects of building structures and their consequences [Defekty stroitel'nyh konstrukcij i ih posledstviya]. ed. 3-e. SPb.: VITU, 2005. 136 p. (rus)
7. GD 03-610-03 Guidelines for the inspection of smoke and ventilation industrial pipes [Metodicheskie ukazaniya po obsledovaniyu dymovyh i ventilyacionnyh promyshlennyh trub]. [Electronic resource]. URL: <http://gostrf.com/normadata/1/4294816/4294816742.htm>. (rus)
8. GD 10-138-97. Methodical instructions. Comprehensive inspection of crane tracks of lifting machines [Metodicheskie ukazaniya. Kompleksnoe obsledovanie kranovyh putej gruzopod'emnyh mashin]. URL: <http://gostrf.com/normadata/1/4294851/4294851398.pdf>. (rus)
9. Federal law No. 116-fz of 21.07.1997 "On industrial safety of hazardous production facilities". [Federal'nyj zakon ot 21.07.1997 N 116-FZ "O promyshlennoj bezopasnosti opasnyh proizvodstvennyh ob"ektov"]. (rus)
10. Manual on the survey of building structures of buildings Moscow. JSC "TSNIIPROMZDANIY". 1997 URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/5/5295/> (rus)
11. Grozdov, V. T. Signs of an emergency condition of load-bearing structures of buildings and structures [Priznaki avarijnogo sostoyaniya nesushchih konstrukcij zdaniy i sooruzhenij] St. Petersburg: VITU, 2000. 43 p. (rus)
12. Eberchi Ichi, Sattar Dorafshan, Effectiveness of infrared thermography for delamination detection in reinforced concrete bridge decks. Automation in Construction. 2022. Vol. 142. 104523. doi: 10.1016/j.autcon.2022.104523.
13. D'Accardi E., Palumbo D., Tamborrino R., Galiotti U., Quantitative analysis of thermographic data through different algorithms. Procedia Structural Integrity. 2018. Vol. 8. Pp 354–367. doi:10.1016/j.prostr.2017.12.036.
14. Garrido I., Lagüela S., Sfarra S., Madruga F.J., Arias P. Automatic detection of moistures in different construction materials from thermographic images. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2019. Vol. 138 (2). Pp. 1649–1668. doi: 10.1007/s10973-019-08264-y
15. Yudin D.A., Adeshkin V., Dolzhenko, A.V., Polyakov A., Naumov A.E. Roof Defect Segmentation on Aerial Images Using Neural Networks. Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research IV. NEUROINFORMATICS 2020. Studies in Computational Intelligence. 2021. Vol 925. doi:10.1007/978-3-030-60577-3\_20

### Information about the author

**Chernysh, Alexander S.** Assistant Professor, Head of the Department of Urban Cadastre and Engineering research. E-mail: [geotex2005@mail.ru](mailto:geotex2005@mail.ru) Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia

---

**Polyakov, Alexander I.** Engineer. E-mail: alex-pol12@yandex.ru . Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

---

*Received 28.10.2022*

**Для цитирования:**

Черныш А.С., Поляков А.И. Методика оценки состояния ограждающих конструкций зданий на территории жилой застройки подлежащей реновации // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 1. С. 53–60. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-53-60

**For citation:**

Chernysh A.S., Polyakov A.I. Methodology for assessing the condition of enclosing structures of buildings on the territory of residential development subject to renovation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 1. Pp. 53–60. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-53-60

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-61-73

**Петухова Н.М.**

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: [tama8nina@yandex.ru](mailto:tama8nina@yandex.ru)

## ОСОБЕННОСТИ СОХРАНЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ИСТОРИЧЕСКИХ АРХИТЕКТУРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

**Аннотация.** В статье рассмотрены и проанализированы основные особенности формирования архитектурных ансамблей железных дорог, обуславливающие принципы их сохранения и развития. Применен метод системного анализа на материалах архивных и библиографических источников, натурных исследований, нормативно-правовых актов и проектной документации в области государственной охраны объектов культурного наследия.

Изучены основные исторические этапы сооружения железных дорог и их типы – магистральные, пригородные, городские. Выявлена связь исторических этапов и типов железных дорог с принципами размещения станций. Выделены основные типы размещения станций – в существующих населенных пунктах или в незаселенной ранее местности, обуславливающие их объектный состав и особенности охраны – как монокомплексов или полицентрических комплексов на различных градостроительных уровнях – отдельного объекта, комплекса станции, совокупности станций железной дороги. Установлено, что основной базовой характеристикой железнодорожных станций, определяющих их историко-культурную ценность, особенно в малых городах, является комплексность их застройки. При этом наиболее распространенным является тип застройки на основе типовых проектов, в связи с чем каждое здание в отдельности не обладает самостоятельной историко-культурной ценностью, и ставить на охрану отдельные здания не представляется целесообразным.

На примере исторической станции Няндомы Северной железной дороги рассмотрен такой инструмент комплексной охраны и развития исторических территорий, как достопримечательное место. Установлены принципы формирования исторических станций железных дорог и научно-методическая проблематика в сфере их комплексной охраны и развития на базе вида объекта культурного наследия – достопримечательное место.

**Ключевые слова:** исторические станции железных дорог, архитектурный ансамбль железной дороги, станция Няндомы Северной железной дороги, достопримечательное место, комплексная охрана и развитие исторических территорий.

**Введение.** Станции железных дорог представляют собой многокомпонентные комплексы, включающие в себя, помимо здания вокзала, целый ряд зданий и сооружений. Состав станционных комплексов различается в зависимости от ряда причин, обусловленных, прежде всего, трассой прохождения железной дороги и ее расположения относительно населенных пунктов – через существующие населенные пункты, где и размещаются станции, или в незаселенной местности, где на основе железнодорожных станций возникают новые поселения, ядром и основной планировочной осью которых является железная дорога.

Железнодорожные станции, особенно там, где они послужили причиной формирования поселения, являются не просто визитной карточкой и воротами города, как принято говорить, но и его историческим ядром, что наделяет их уникальной историко-культурной ценностью. Совокупность новых поселений, расположенных вдоль железной дороги, формирует новую систему расселения, что обуславливает необходимость их комплексной охраны на различных градостроительных уровнях.

Преимущественно объектный подход, существующий в настоящее время в системе охраны объектов культурного наследия, обуславливает актуальность данного исследования, направленного на выявление основных принципов и параметров комплексного сохранения многокомпонентных протяженных архитектурных комплексов железных дорог. Особая актуальность их охраны определяется значительным увеличением рисков в последнее время, связанными как с внешними причинами – социально-экономической деятельностью (передача из ведения железных дорог, перепрофилирование, снос и т.д.), так и с внутриведомственными, связанными с изменением эксплуатационных требований и развитием высокоскоростного движения, что может привести к полной утрате исторических архитектурных ансамблей железных дорог [1]. Особо уязвимыми являются небольшие проходные станции, показательным примером которых является станция Няндомы Вологодско-Архангельской линии Северной железной дороги, являющаяся основным объектом данного исследования.

**Материалы и методы.** Исследование проведено на материалах архивных и библиографических источников, натуральных исследований, нормативно-правовых актов и проектной документации в области государственной охраны объектов культурного наследия. Некоторые результаты исследования представлены при защите диссертации на соискание ученой степени кандидата искусствоведения "Градостроительная роль железнодорожных вокзалов России и эволюция их архитектуры. 1830–1910-е годы", Санкт-Петербург, 2010 г.

Применен метод системного анализа, опирающийся на комплексный подход, включающий в себя изучение истории создания архитектурных комплексов железных дорог, направленный на систематизацию принципов их формирования, анализ существующей нормативно-правовой документации и конкретных примеров применения ее требований в комплексном сохранении и развитии исторических станций железных дорог. Данный метод позволил выявить основные этапы и принципы формирования исторических станций железных дорог и научно-методическую проблематику в сфере их комплексной охраны.

**Исторические этапы развития железных дорог и их связь с типами размещения станций.** Тип размещения станций – в населенном пункте или вне его, – достаточно четко соотносится с этапами развития железных дорог [2].

Первые железные дороги связывали между собой наиболее важные в социально-экономическом плане поселения. Их станции располагались преимущественно в границах населенного пункта или вблизи него. Комплексы станций при этом интегрируются в структуру населенного пункта, где располагается большинство обеспечивающих ее жизнедеятельность инфраструктурных объектов, и включают только здания, непосредственно необходимые для эксплуатации железной дороги – здание вокзала, паровозные депо, мастерские и пр. [3]

К данному типу станций относятся станции первой в России Царскосельской железной дороги, связавшей в 1836 году Санкт-Петербург и Царское село. Дорога имела небольшую длину и на ней располагались помимо Санкт-Петербурга, всего две станции – Павловск и Царское село, поэтому говорить о сформированном полицентрическом комплексе станций в данном случае не приходится [4]. Исторические вокзалы этих станций утрачены, существующие в настоящее время вокзалы, построенные в конце 1940-х–1950 годов, поставлены на охрану: как отдельный памятник в Павловске (выявленный ОКН «Вокзал станции Павловск») и как ансамбль в Царском селе (ОКН федерального значения «Вокзал», в

состав которого входят Главное здание, Павильоны привокзальные (три), пропилеи) [5].

В населенных пунктах располагались и станции первой магистральной железной дороги от Санкт-Петербурга до Москвы, построенной в период 1849–1851 гг. и сформировавшие первые в России полицентрические архитектурные ансамбли железных дорог [6]. В данном случае расположение диктовалось эксплуатационными требованиями железной дороги, в результате чего из крупных населенных пунктов станция «попала» только в Тверь, остальные станции располагались рядом с небольшими поселениями, давшими им свои названия.

В случае размещения в населенном пункте станции остаются, как правило, на уровне монокомплексов в их составе, формируя собственный локальный композиционный и архитектурно-градостроительный узел. Подобная локализация на местности позволяет осуществлять их комплексную охрану, а изначальная включенность в городскую среду допускает возможность оставаться при этом на уровне охраны монокомплекса, а не целостной охраны всего полицентрического комплекса комплексов станций. Существующая структура охраны станционного комплекса, предполагает в данном случае охрану отдельных зданий: вокзала, депо и прочего, как отдельных памятников, не объединяя их в ансамбль станции (рис. 1).

В конце XIX – нач. XX вв. появились еще два типа железных дорог, станции которых были связаны с уже существующими поселениями – городские и пригородные.

Из наиболее известных архитектурных ансамблей городских железных дорог можно упомянуть архитектурные ансамбли Венской железной дороги (1894–1901, арх. О. Вагнер), и Московской окружной железной дороги, арх. А.Н. Померанцев, инж. А.Д. Проскуряков, С. Карейша, П.Я. Каменцев, П. Рашевский, (1903–1908 гг.) [7]. В Санкт-Петербурге в начале XX в. задумывалась сеть «воздушных железных дорог», которые должны были проходить по эстакадам, связывая между собой железнодорожные вокзалы, но эта идея не получила реализации.

Развитие пригородных железных дорог началось в конце XIX века в связи с бурным ростом дачного строительства вокруг столиц, вызванным появлением железных дорог, что вызвало необходимость создания новых и реконструкции уже существующих пригородных станций. Расширяются и перестраиваются на иных, чем ранее принципах, расположенные вокруг Петербурга станции пригородных железных дорог –

Петергофской (Балтийской) (арх. П.С. Купинский, 1870-е–к.1880-х) и Финляндской (арх. Б. Грангольм, 1898 по 1914).

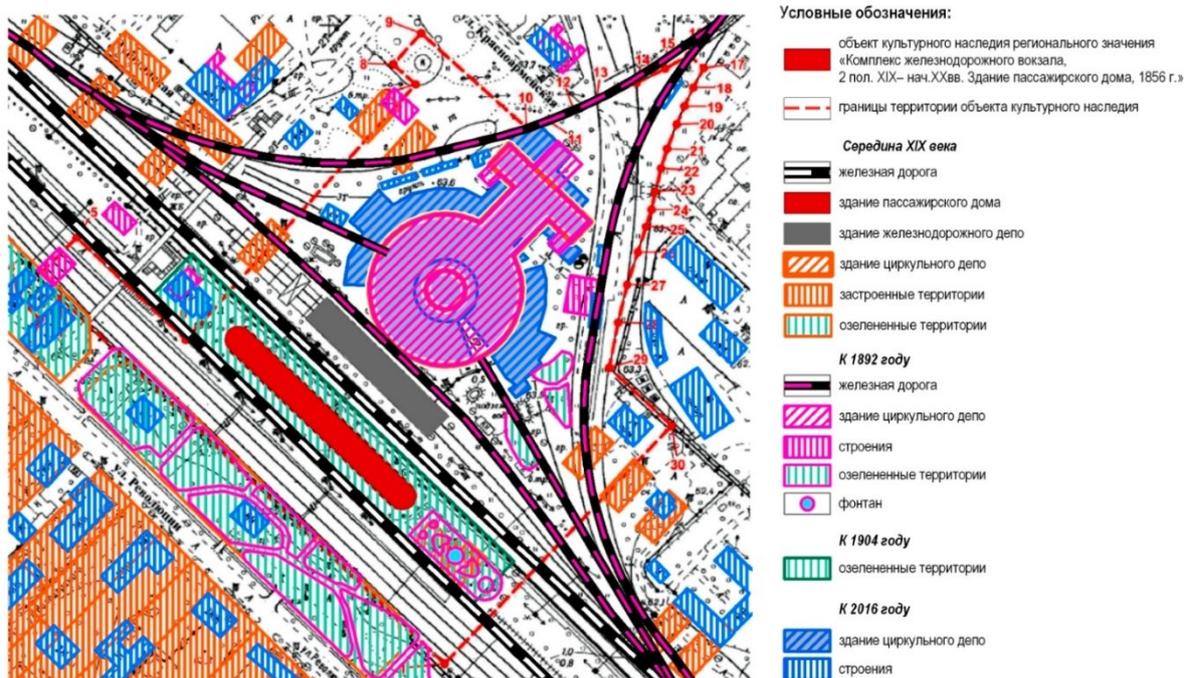


Рис. 1. Станция Малая Вишера Октябрьской (бывш. Николаевской) железной дороги. Историко-культурный опорный план

В конце XIX – начале XX веков происходит расширение географии железнодорожного строительства, что было вызвано необходимостью освоения новых баз сырьевых ресурсов и рынков сбыта, в связи с чем, *трассы железных дорог прокладываются по незаселенной ранее местности.*

Данная тенденция была характерна для всего мира. Колониальные страны развернули строительство железных дорог в колониях, главным образом, для вывоза из них сырья. В России также прокладываются железные дороги к сырьевым центрам: Донецкого и Криворожского горных бассейнов, создания выходов на Урал, в Сибирь, Среднюю Азию, на Дальний Восток и Север России. Наряду с экономическими факторами значительную роль играли интересы оборонного характера. Начинается строительство трансконтинентальных магистралей, таких как Великий Сибирский путь [8]. Железные дороги начинают рассматривать как основной фактор возрождения и развития отдаленных и ранее отсталых территорий. Они начинают оказывать значительное влияние на региональную планировку, способствуя появлению новых населенных пунктов и городов и создавая новую географию расселения и развития промышленного производства.

Данный период характеризуется усилением роли государства в развитии железнодорожного

строительства, формируется понимание необходимости организационного единства в вопросах строительства, эксплуатации и управления рельсовыми путями, что проявляется и в повсеместном повышении интереса к созданию архитектурных ансамблей железных дорог на данном этапе.

При строительстве железных дорог в незаселенной ранее местности, параллельно со строительством рельсового пути строятся станции, представляющие собой небольшие поселки, формирующиеся как монопоселения и включающие в себя, помимо зданий и сооружений, непосредственно связанных с железной дорогой, жилые дома для служащих и их семей с хозяйственными постройками и инфраструктурными объектами – больницами, банями, церквями, школами и пр. [9] В свою очередь, эти «монопоселения», центром которых является железнодорожная станция, ритмично располагаясь вдоль железной дороги, совместно с полустанциями и комплексами путевых построек, формируют полицентрические комплексы различной протяженности, облик которых определяет застройка станций и путевых построек, созданных, как правило, по единому проекту. Поскольку существующая застройка не вторгается в этот ансамбль, нарушая его единство, вдоль железных дорог формируются своеобразные протяженные дискретные фасады в едином стиле, формирующие новый облик

возрождаемого края при движении по железной дороге.

**Основная часть. Достопримечательное место «Первоначальный комплекс Вологодско-Архангельской линии Северной железной дороги. Станция Нядома».** Начало новому этапу в строительстве железных дорог в России было положено известным промышленником и меценатом С.И. Мамонтовым, остро чувствовавшим все новые и передовые тенденции и участвовавшим в формировании новых направлений, как в искусстве, так и в бизнесе. По сути, все построенные им дороги маркируют начало новых этапов железнодорожного строительства в России. В 1875–1882 гг. он строит Донецкую железную дорогу к каменноугольному бассейну, в 1894–1898 гг. – на Север к Архангельску. Значение железных дорог как средства развития отдаленных регионов, осознавалось в то время далеко не всеми, поэтому, и в том, и в другом случае, в адрес Мамонтова раздавались упреки в «бесплезности» пути, проходящем по пустынным местам.

Мамонтов подходил к строительству железных дорог, как к творческому акту, творя со смелостью художника новую среду обитания и, как выяснилось впоследствии, предчувствуя основные направления развития в государственном масштабе. Все значение Северной и Донецкой дорог было оценено лишь с началом Первой мировой войны, когда они в полном смысле слова оказались стратегическими, обеспечивающими связь страны с внешним миром. «Поэт грезит образами, деловой человек предприятиями: железными дорогами, заводами, подъездными путями. – Писал о С.И. Мамонтове в связи с новой железной дорогой на Север известный в то время журналист Влас Дорошевич, – Богатый, но запущенный, унылый, безлюдный край, – который оживает благодаря брошенной в него ветви железной дороги. Ветка железной дороги, которая соединяет его с центрами, замешивает в круговорот общей быстрой, деловой жизни, приносит ему жизнь, как артерия несет кровь от сердца. Такие предприятия рождаются в голове уже не дельца, а «художника дела» [10].

В 1894 году под председательством С.И. Мамонтова образуется Общество Московско-Ярославско-Архангельской железной дороги, и в период 1895–1898 гг. среди лесов и болот в продолжение существующей трассы строится железная дорога от Вологды до Архангельска. Будучи верен себе, Мамонтов вносит и в этот коммерческий проект «художественное направление», сделав дорогу не только поводом создания художественных произведений, но и превратив ее в са-

мостоятельное художественное событие. Он заказал проект всего комплекса зданий застройки архитектору Льву Кекушеву, считающемуся одним из первых архитекторов модерна в России. Совместно с архитектором И.А. Ивановым-Шницем в 1894–1895 гг. им был разработан альбом типовых проектов деревянных зданий в едином стиле, в котором впервые проявились черты модерна в творчестве Льва Кекушева. Здания, возведенные по этим проектам, сформировали единый полицентрический ансамбль длиной в 600 км, состоящий из 19 монопопулярных станций 3-го и 4-го классов (рис. 2) [11].

Архитекторами были разработаны типовые проекты всех архитектурных составляющих комплекса, включая самые незначительные служебные и хозяйственные постройки [12], а также линейные сооружения, расположенные между станциями [13]. Проекты включали в себя и разработку типовых элементов и декоративных деталей зданий: плотничных и филантовых дверей, кронштейнов и пр. [14]. Были разработаны 2 типа пассажирских зданий для станций 3 и 4-го классов площадью 35,33 кв.саж. и станций 4-го класса площадью 22,96 кв.саж.; 17 типов жилых домов [14]. Уже на стадии проектирования указывались названия станций, на которых предполагалось возведение того или иного из разработанных типов домов. Их различные сочетания во многом способствовали созданию своеобразия каждой станции (рис. 3).

"Тотальное" проектирование архитектурного комплекса от Вологды до Архангельска осуществлялось на всех градостроительных уровнях, начиная от планировки станций и заканчивая отдельными постройками и их элементами. В соответствии с этим, и их охрана должна осуществляться на всех градостроительных уровнях.

Существующая в настоящее время в России государственная система охраны объектов культурного наследия привязана к объекту – включает в себя охрану собственно памятника, осуществляемую через его предмет охраны и градостроительную охрану, осуществляемую установкой зон охраны (или защитных зон) на прилегающей к границам памятника территории. Вместе с тем, применение типовых проектов при застройке станций железных дорог, делает нецелесообразным ставить на охрану отдельные здания. Из всех имеющихся в российском законодательстве инструментов охраны характеристиками, позволяющими осуществлять средовую охрану на всех градостроительных уровнях, обладает такой вид объекта культурного наследия, как достопримечательное место [15, п. 3]. Этот вид объекта культурного наследия как нельзя более подходит для охраны монокомплексов станций.

Именно достопримечательное место по своим параметрам, по сути, создано для комплексного сохранения и развития исторических территорий, будучи средовым, территориальным памятником, изначально заключающим в себе не только охранные ограничения, но и возможность развития, регламентированную в целях сохранения

особенностей историко-культурной среды. Данный инструмент особенно актуален для малых городов, где статус достопримечательного места позволяет идентифицировать и популяризировать историческое ядро, составляющее основу идентичности места, становясь драйвером развития деградирующих поселений.

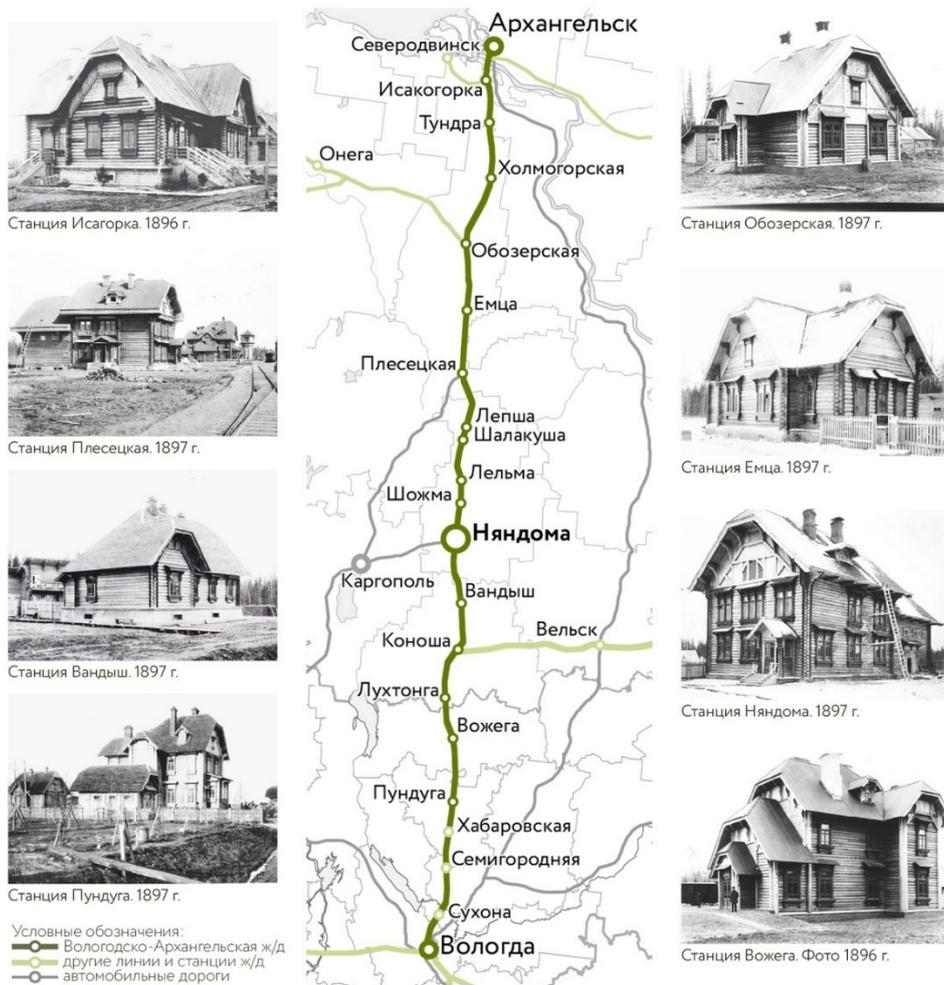


Рис. 2. Карта-схема Вологодско-Архангельской железной дороги. Отдельные элементы архитектурного комплекса железной дороги

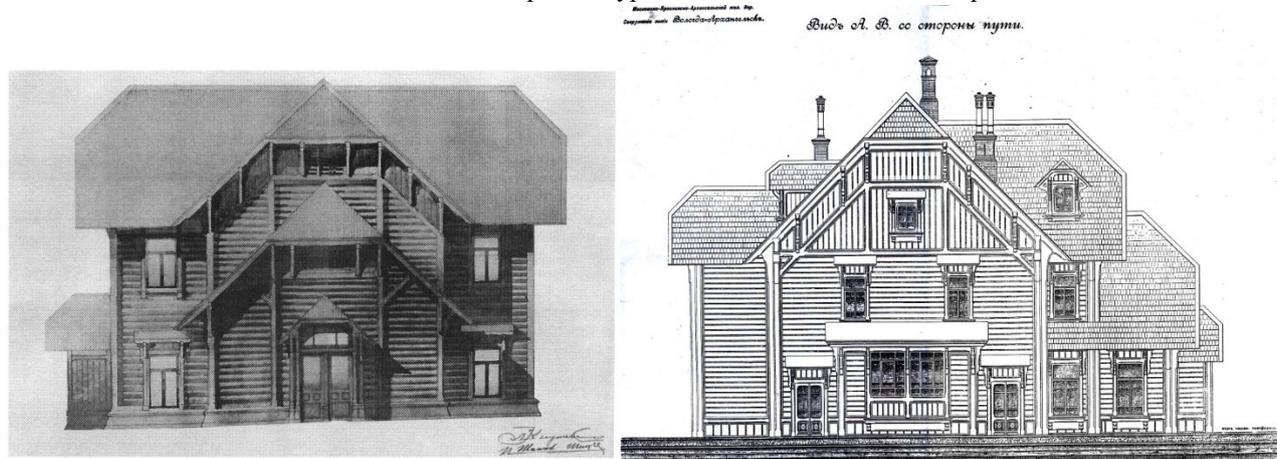


Рис. 3. Проект пассажирского здания 3 и 4 классов, площадью 35,33 кв. саж. для Вологодско-Архангельской линии Московско-Ярославско-Архангельской железной дороги. Арх. Л.Н. Кекушев, И.А. Иванов-Шиц. 1894 г. [14]

Ярким примером в этом отношении является город Няндома, историческим ядром которого является станция железной дороги от Вологды до Архангельска, построенной творческим тандемом С.И. Мамонтова и Л.Н. Кекушева. Историческая станция в 2018 г. была включена в реестр

как объект культурного наследия – достопримечательное место «Первоначальный ансамбль Вологодско-Архангельской линии Северной железной дороги. Станция Няндома» (рис. 4, 5) [16–18].



Рис. 4. Проект достопримечательного места «Первоначальный ансамбль Вологодско-Архангельской линии Северной железной дороги. Станция Няндома». Историко-культурный опорный план. ООО «Спецреставрация», ГАП Петухова Н.М., 2017 г.

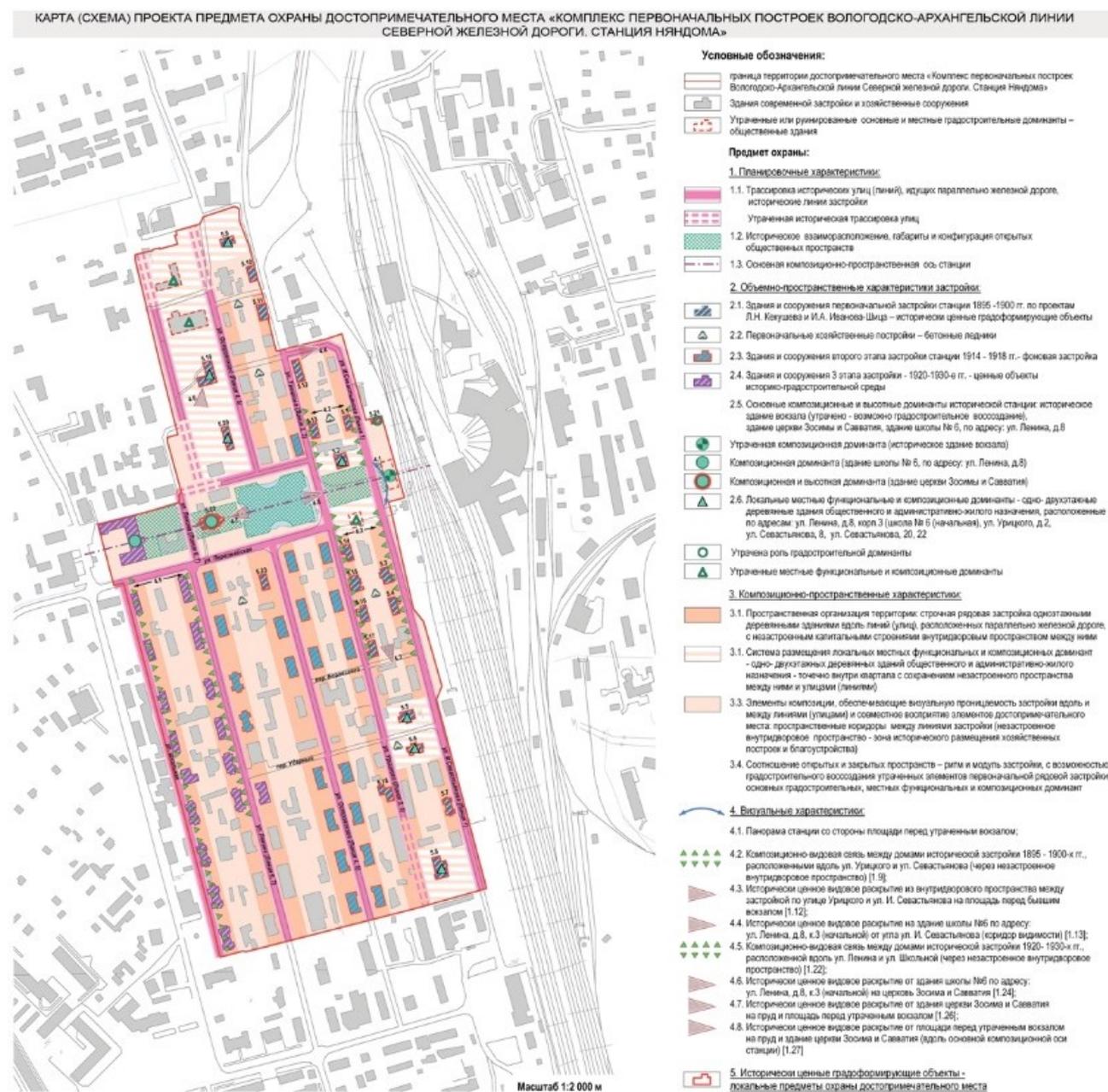


Рис. 5. Проект достопримечательного места «Первоначальный ансамбль Вологодско-Архангельской линии Северной железной дороги. Станция Няндомы». Карта (схема) проекта предмета охраны. ООО «Спецреставрация», ГАП Петухова Н.М., 2017 г.

Для Няндомы, как и для большинства станций этой железной дороги, достопримечательное место стало единственной возможностью охраны исторической среды, вследствие отсутствия в городе других видов объектов культурного наследия – памятников и ансамблей. Два других вида градостроительной охраны исторического наследия – зоны охраны и историческое поселение, привязаны к объектам культурного наследия и, в случае их отсутствия, их установление невозможно.

Придание статуса достопримечательного места исторической территории заставило жителей задуматься о ценности окружающей их среды и стало поводом и ядром различных программ и стратегий развития.

В 2020 году концепция благоустройства исторической станции Няндомы стала победителем федерального конкурса «Комфортная среда. Благоустройство малых городов и исторических поселений». В настоящее время работы по благоустройству территории исторической станции находятся в стадии завершения (рис. 6).

Уже в самом названии достопримечательного места в Няндоме прочитывается перспектива дальнейшего развития, предполагающая постановку на охрану остальных станций железной дороги от Вологды до Архангельска. К сожалению, единовременная постановка на охрану протяженных ансамблей железных дорог является крайне проблематичной, так как в нашем законодательстве об охране культурного наследия не

предусмотрены такие структуры, как «серийный объект» или «культурно-исторический маршрут», принятые в международном законодательстве. В рамках принятой в нашей стране структуры охраны объектов культурного наследия, с учетом дискретного характера ансамбля, наиболее реалистичным представляется постепенное пошаговое включение в Государственный реестр

отдельных исторических станций как достопримечательных мест. Данный подход является универсальным для всех типов станций, поскольку позволяет либо остаться на уровне станции как единичного локального достопримечательного места в структуре населенного пункта, либо постепенно связать локальные достопримечательные места в единую полицентрическую структуру.

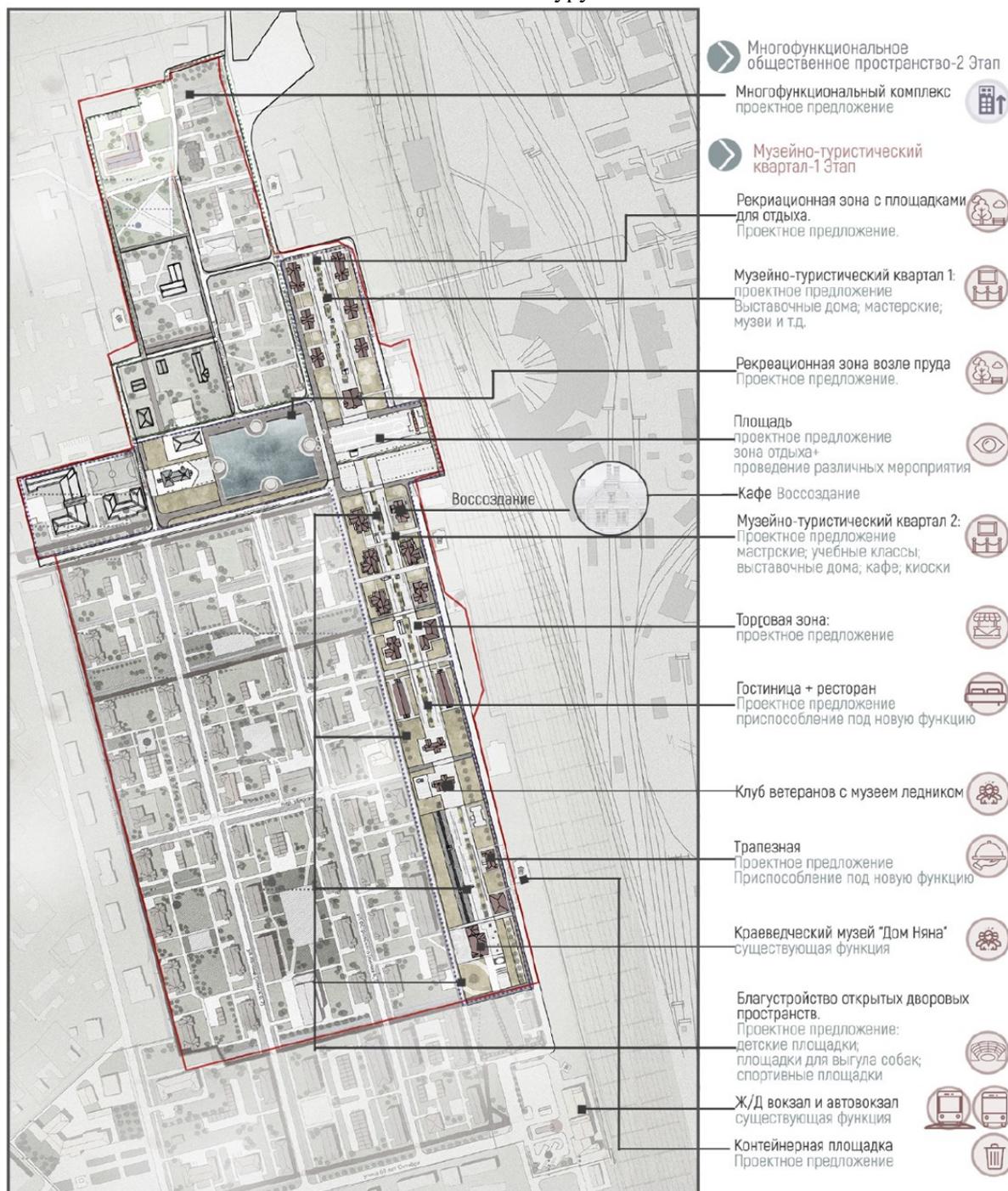


Рис. 6. Концепция благоустройства части территории достопримечательного места «Первоначальный ансамбль Вологодско-Архангельской линии Северной железной дороги. Станция Нядома» - победитель Всероссийского конкурса «Комфортная среда. Благоустройство малых городов и исторических поселений», 2020

В этом случае постановка на охрану отдельных монокомплексов станций как достопримечательных мест может рассматриваться как подготовительный этап к постановке на охрану всего протяженного полицентрического комплекса станций, для которого будут определены дополнительные градостроительные и нематериальные элементы предмета охраны, обеспечивающие его целостную охрану: взаиморасположение станций, видовые и визуально-композиционные характеристики, функциональное назначение и т.п. [19]. Сюда же можно в качестве нематериального предмета охраны включить и мемориальную ценность, что особенно актуально для железных дорог, построенных Саввой Мамонтовым, где прослеживается их «художественное направление», связанное с именами известных художников: Виктора Васнецова, Валентина Серова, Константина Коровина, Павла Кузнецова.

Таким образом, на базе существующей структуры охраны объектов культурного наследия постепенно будут созданы многосоставные объекты, объединяющие весь исторический комплекс станций и позволяющие осуществлять их комплексную охрану и развитие.

#### **Выводы.**

1. Выявлено, что станции железных дорог являются сложными многосоставным и многоуровневыми комплексами, формирование которых во многом зависит от их расположения в структуре железнодорожного пути – в существующем населенном пункте или в незаселенной ранее местности.

2. Выявлено, что при размещении станций в существующем населенном пункте, комплекс составляющих их зданий, как правило, ограничен, включая, в основном, здания, необходимые непосредственно для эксплуатации железной дороги. Формируется локальный композиционный и архитектурно-градостроительный узел, интегрированный в структуру населенного пункта. Включенность в общую застройку препятствует целостному восприятию станций на протяжении всего пути, вследствие чего целесообразно осуществлять их охрану на уровне отдельных зданий или монокомплексов отдельных станций.

3. Выявлено, что для станций магистральных железных дорог, проложенных в незаселенной ранее местности, объектный состав расширен, включая, кроме зданий и сооружений, непосредственно связанных с железной дорогой, жилые дома для служащих и их семей с хозяйственными постройками и инфраструктурными объектами – больницами, банями, церквями, школами и пр.

4. Показано, что «монопоселения» станций, ритмично располагаясь вдоль железной дороги,

совместно с полустанциями и комплексами путевых построек, формируют полицентрические комплексы различной протяженности, образуя целостное восприятие архитектурного ансамбля вдоль всей железной дороги. Изначальная целостность всего архитектурного комплекса железной дороги делает целесообразным осуществлять его охрану на уровне охраны всего полицентрического комплекса комплексов станций

5. Установлено, что основной базовой характеристикой железнодорожных станций, определяющих их историко-культурную ценность, особенно в малых городах, является комплексность их застройки. При этом наиболее распространенным является тип застройки на основе типовых проектов, в связи с чем каждое здание в отдельности не обладает самостоятельной историко-культурной ценностью, и ставить на охрану отдельные здания не представляется целесообразным.

6. Установлено, что элементы станций железных дорог взаимодействуют на различных градостроительных уровнях, в связи с чем, и их охрана должна носить комплексный характер и осуществляться на всех градостроительных уровнях – отдельных зданий и сооружений; комплексов станций, совокупности станций в составе железной дороги.

7. Установлено, что из всех имеющихся в российском законодательстве инструментов охраны характеристиками, позволяющими осуществлять комплексную средовую охрану, обладает такой вид объекта культурного наследия, как достопримечательное место. Этот вид объекта культурного наследия как нельзя более подходит для охраны монокомплексов станций и дает возможность их дальнейшего объединения в протяженные полицентрические комплексы железной дороги.

8. Показано, что данный инструмент особенно актуален для малых городов, где статус достопримечательного места позволяет идентифицировать и популяризировать историческое ядро, составляющее основу идентичности места, становясь драйвером развития деградирующих поселений.

*Источник финансирования. Статья публикуется по результатам проведения научно-исследовательской работы, проводимой в рамках конкурса грантов на выполнение научно-исследовательской работы научно-педагогическими работниками СПбГАСУ (ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет») в 2022 г.*

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Семенцов С.В. Славина Т.А., Антонов В., Векслер А. Комплекс сооружений ВСМ и проблемы городской среды современного Петербурга. Опыт градостроительной экспертизы. // Инженер путей сообщения: приложение к газете «Наш путь». 1996. 3(4). С. 84–93.
2. Амелин С.В., Фадеев Г.М., Богданов Г.И., Бернгард Ф.К., под общ. ред. Красковского Е.Я., Уздина М.М. История железнодорожного транспорта в России: 1836-1917 гг. : В 2 т. Санкт-Петербург – Москва: Иван Федоров, 1994. Т.1 336 с.
3. Петухова Н.М. Интеграция первых железнодорожных вокзалов Санкт-Петербурга в градостроительный контекст города. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 70–82. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-70-82.
4. Золотницкий И.П. Путеводитель по Царскосельской дороге : репринтное издание 1882 г. Санкт-Петербург: ЛИК, 2007. 238 с.
5. Перечень объектов культурного наследия и выявленных объектов культурного наследия Санкт-Петербурга. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: // [https://kgior.gov.spb.ru/deyatelnost/uchet/list\\_objec ts/](https://kgior.gov.spb.ru/deyatelnost/uchet/list_objec ts/) (дата обращения 25.07.2022).
6. Давыдова Л.А. (автор-составитель). От Царскосельской до Октябрьской. История. Развитие. Перспективы : альбом. 2-е изд., испр. и дополн. Санкт-Петербург: Лики России, 2007. 240 с.
7. Альбом сооружений Московской окружной железной дороги. 1903–1908 г.: альбом. Москва: Московская окружная железная дорога, б.д. 28 с.
8. Ильин Ю. Л., Колесов А. В., Лукьянин В. П, под общ. ред. Ю. Л. Ильина. Создание великого Сибирского пути : в 2 т. Санкт-Петербург: Группа компаний «Евросиб», 2005. Том 1. 296 с.
9. Кульжинский, С.Н. (Инж.) Основные элементы проектирования станций. Часть 1. Промежуточные (малые) станции и поселки-города при железнодорожных станциях. Петроград: Редакция специальных изданий, 1922. 220 с.
10. Дорошевич В.М. Воспоминания. Москва: Новое литературное обозрение, 2008. 247 с.
11. Петухова Н.М. Формирование архитектурного комплекса железной дороги Вологда – Архангельск // Архитектурное наследие. Москва: НИИТАГ. 2008. №49. С. 255–273.
12. Проекты жилых домов и пассажирских зданий за исключением пассажирского здания станции Вологда, с приложением пояснительной записки. Фасады, планы, разрезы. // РГИА. Ф.350. Оп. 41. Д. 1104.
13. Проекты линейных построек, путевых казарм, двойных и одиночных будок с деталями дверей. // РГИА. Ф.350. Оп. 41. Д.1106.
14. "Общество Московско-Ярославско-Архангельской железной дороги. Сооружение линии Вологда-Архангельск. Гражданские постройки". Санкт-Петербург: Библиотека института инженеров путей сообщения Императора Александра 1, б/д.
15. Федеральный закон от 29.06.2002 г. №73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации».
16. Постановление Инспекции по охране объектов культурного наследия Архангельской области от 07 мая 2019 года №1-п о постановке на государственную охрану объекта культурного наследия (памятника истории и культуры) народов Российской Федерации регионального значения - достопримечательное место «Комплекс первоначальных построек Вологодско-Архангельской линии Северной железной дороги. Станция Нядома», 1895-1900-е годы, архитекторы Л.Н. Кекушев, И.А. Иванов-Шиц, 1914-1918 годы, 1920-е-1930-е годы.
17. Постановление Инспекции по охране объектов культурного наследия Архангельской области от 10 октября 2019 г. № 11-п об установлении предмета охраны объекта культурного наследия регионального значения достопримечательное место «Комплекс первоначальных построек Вологодско-Архангельской линии Северной железной дороги. Станция Нядома», 1895-1900-е годы, архитекторы Л.Н. Кекушев, И.А. Иванов-Шиц, 1914-1918 годы, 1920-е-1930-е годы.
18. Постановление Инспекции по охране объектов культурного наследия Архангельской области от 11 октября 2019 г. № 12-п об утверждении границ объекта культурного наследия регионального значения достопримечательное место «Комплекс первоначальных построек Вологодско-Архангельской линии Северной железной дороги. Станция Нядома», 1895-1900-е годы, архитекторы Л.Н. Кекушев, И.А. Иванов-Шиц, 1914-1918 годы, 1920-е-1930-е годы.
19. Михайлов А.В. Градостроительные и нематериальные аспекты предмета охраны объектов культурного наследия в исторической среде Санкт-Петербурга: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата архитектуры. Санкт-Петербург, 2022.

## Информация об авторах

**Петухова Нина Михайловна**, кандидат искусствоведения, доцент кафедры Архитектурного и градостроительного наследия. E-mail: mama8nina@yandex.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Поступила 15.08.2022 г.

© Петухова Н.М., 2023

**Petukhova N.M.**

*Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*

*E-mail: mama8nina@yandex.ru*

## FEATURES OF PRESERVATION AND DEVELOPMENT OF HISTORICAL ARCHITECTURAL COMPLEXES OF RAILWAYS

**Abstract.** *The article considers and analyzes the main features of the formation of architectural ensembles of railways, which determine the principles of their preservation and development. The method of system analysis was applied on the materials of archival and bibliographic sources, field studies, legal acts and project documentation in the field of state protection of cultural heritage objects.*

*The main historical stages of the construction of railways and their types - mainline, suburban, urban were studied. The connection of historical stages and types of railways with the principles of station placement is revealed. The main types of station placement are identified - in existing settlements or in previously uninhabited areas, which determine their object composition and protection features - as mono-complexes or polycentric complexes at various urban planning levels - a separate object, a station complex, a set of railway stations. It has been established that the main basic characteristic of railway stations, which determine their historical and cultural value, especially in small towns, is the complexity of their development. At the same time, the most common type of development is based on standard projects, in connection with which each building separately does not have an independent historical and cultural value, and it does not seem appropriate to protect individual buildings.*

*On the example of the historical station Nyandoma of the Northern Railway, such a tool for the integrated protection and development of historical territories as a place of interest is considered. The principles of the formation of historical railway stations and scientific and methodological issues in the field of their integrated protection and development on the basis of the type of cultural heritage object - a place of interest are established.*

**Keywords:** *historical railway stations, architectural ensemble of the railway, Nyandoma Station of the Northern Railway, interesting place, comprehensive protection and development of historical territories.*

### REFERENCES

1. Sementsov S.V., Slavina T.A., Antonov V., Veksler A. Complex of High-Speed Rail Structures and Problems of the Urban Environment of Modern Petersburg. Experience in urban planning expertise. [Kompleks sooruzhenij VSM i problemy gorodskoj sredy sovremennogo Peterburga. Opyt gradostroitel'noj ekspertizy]. Inzhener putej soobshcheniya: prilozhenie k gazete «Nash put'». 1996. No 3 (4). Pp. 84–93. (rus)

2. Amelin S.V., Fadeev G.M., Bogdanov G.I., Bernhard F.K., ed. ed. Kraskovsky E.Ya., Uzdina M.M. History of railway transport in Russia: 1836-1917. [Istoriya zheleznodorozhnogo transporta v Rossii: 1836-1917 gg]: In 2 volumes. St. Petersburg-Moscow, 1994. Vol.1. 336 p. (rus)

3. Petukhova N.M. Integration of the first railway stations of St. Petersburg into the urban context of the city. [Integraciya pervyh zheleznodorozhnyh vokzalov Sankt-Peterburga v gradostroitel'nyj kontekst goroda]. Bulletin of BSTU named after

V.G. Shukhov 2022. No. 1. Pp. 70–82. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-70-82. (rus)

4. Zolotnitsky I.P. Guide to the Tsarskoye Selo Road [Putevoditel' po Carskosel'skoj doroge]: reprint edition of 1882 St. Petersburg: LIK, 2007. 238 p. (rus)

5. List of objects of cultural heritage and identified objects of cultural heritage of St. Petersburg [Perechen' ob'ektov kul'turnogo naslediya i vyavlennyh ob'ektov kul'turnogo naslediya Sankt-Peterburga]. AdobeAcrobatReader. URL: // [https://kgiop.gov.spb.ru/deyatelnost/uchet/list\\_objects/](https://kgiop.gov.spb.ru/deyatelnost/uchet/list_objects/) (date of treatment: 25.07.2022). (rus)

6. Davydova L.A. (author-compiler). From Tsarskoye Selo to Oktyabrskaya. Story. Development. Perspectives [Ot Carskosel'skoj do Oktyabr'skoj. Istoriya. Razvitie. Perspektivy]: an album. 2nd ed., rev. and additional. St. Petersburg: Faces of Russia, 2007. 240 p. (rus)

7. Album of buildings of the Moscow district railway. 1903–1908 [Al'bom sooruzhenij Moskovskoj okruzhnoj zheleznoj dorogi. 1903–1908 g.]: album. Moscow: Moscow District Railway, b.d. 28 p. (rus)

8. Ilyin Yu.L., Kolesov A.V., Lukyanin V.P., ed. ed. Yu.L. Ilyina. Creation of the great Siberian way: in 2 volumes [Sozдание velikogo Sibirskogo puti]. St. Petersburg: Eurosib Group of Companies, 2005. Vol. 1. 296 p. (rus)

9. Kulzhinsky S.N. Basic elements of station design. Part 1. Intermediate (small) stations and settlements-cities at railway stations [Osnovnye elementy proektirovaniya stancij. CHast' 1. Promezhutochnye (malye) stancii i poselki-goroda pri zheleznodorozhnyh stanciyah]. Petrograd: Edition of special editions, 1922. 220 p. (rus)

10. Doroshevich V.M. Memories. [Vospominaniya]. Moscow: New Literary Review, 2008. 247 p. (rus)

11. Petukhova N.M. Formation of the architectural complex of the railway Vologda - Arkhangelsk [Formirovanie arhitekturnogo kompleksa zheleznoj dorogi Vologda – Arhangel'sk]. Architectural heritage. Moscow: NIITAG, 2008. No. 49. Pp. 255–273. (rus)

12. Projects of residential buildings and passenger buildings, with the exception of the passenger building of the Vologda station, with an explanatory note attached. Facades, plans, sections. [Proekty zhi-lyh domov i passazhirskih zdaniy za isklyucheniem passazhirskogo zdaniya stancii Vologda, s prilozheniem poyasnitel'noj zapiski. Fasady, plany, razrezy]. RGIA, coll.350, aids. 41, fol.1104. (rus)

13. Projects of linear buildings, traveling barracks, double and single booths with door details. [Proekty linejnyh postroek, putevyh kazarm, dvojnnyh i odinochnnyh budok s detalyami dverej]. RGIA, coll.350, aids. 41, fol.1106. (rus)

14. "Society of the Moscow-Yaroslavl-Arkhangelsk railway. Construction of the Vologda-Arkhangelsk line. Civil buildings". [Obshchestvo Moskovsko-Yaroslavsko-Arhangel'skoj zheleznoj dorogi. Sooruzhenie linii Vologda-Arhangel'sk. Grahdanskije postrojki]. St. Petersburg: Library of the Institute of Railway Engineers of Emperor Alexander 1, b/d. (rus)

15. Federal Law of June 29, 2002, No. 73-FZ "On objects of cultural heritage (monuments of history and culture) of the peoples of the Russian Federation" [Federal'nyj zakon ot 29.06.2002 g. No. 73-FZ «Ob ob'ektah kul'turnogo naslediya (pamyatnikah istorii i kul'tury) narodov Rossijskoj Federacii)]. (rus)

16. Decree of the Inspectorate for the Protection of Cultural Heritage Objects of the Arkhangelsk Re-

gion dated May 07, 2019 No. 1-p on the state protection of a cultural heritage object (monument of history and culture) of the peoples of the Russian Federation of regional significance - a sightseeing place "The complex of the original buildings of the Vologda-Arkhangelsk line Northern Railway. Nyandoma station", 1895-1900s, architects L.N. Kekushev, I.A. Ivanov-Shitz, 1914-1918, 1920s-1930s. [Postanovlenie Inspekcii po ohrane ob'ektov kul'turnogo naslediya Arhangel'skoj oblasti ot 07 maya 2019 goda No. 1-p o postanovke na gosudarstvennyu ohranu ob'ekta kul'turnogo naslediya (pamyatnika istorii i kul'tury) narodov Rossijskoj Federacii regional'nogo znacheniya - dostoprimechatel'noe mesto «Kompleks pervonachal'nyh postroek Vologodsko-Arhangel'skoj linii Severnoj zheleznoj dorogi. Stanciya Nyandoma», 1895-1900-e gody, arhitektory L.N. Kekushev, I.A. Ivanov-SHic, 1914-1918 gody, 1920-e-1930-e gody]. (rus)

17. Decree of the Inspectorate for the Protection of Cultural Heritage Objects of the Arkhangelsk Region dated October 10, 2019 No. 11-p on the establishment of the object of protection of a cultural heritage object of regional significance - a sightseeing place "The complex of the original buildings of the Vologda-Arkhangelsk line of the Northern Railway. Nyandoma station", 1895-1900s, architects L.N. Kekushev, I.A. Ivanov-Shitz, 1914-1918, 1920s-1930s. [Postanovlenie Inspekcii po ohrane ob'ektov kul'turnogo naslediya Arhangel'skoj oblasti ot 10 oktyabrya 2019 g. No. 11-p ob ustanovlenii predmeta ohrany ob'ekta kul'turnogo naslediya regional'nogo znacheniya dostoprimechatel'noe mesto «Kompleks pervonachal'nyh postroek Vologodsko-Arhangel'skoj linii Severnoj zheleznoj dorogi. Stanciya Nyandoma», 1895-1900-e gody, arhitektory L.N. Kekushev, I.A. Ivanov-SHic, 1914-1918 gody, 1920-e-1930-e gody]. (rus)

18. Decree of the Inspectorate for the Protection of Cultural Heritage Objects of the Arkhangelsk Region dated October 11, 2019 No. 12-p on approving the boundaries of a cultural heritage object of regional significance, a place of interest "The complex of the original buildings of the Vologda-Arkhangelsk line of the Northern Railway. Nyandoma station", 1895-1900s, architects L.N. Kekushev, I.A. Ivanov-Shitz, 1914-1918, 1920s-1930s. [Postanovlenie Inspekcii po ohrane ob'ektov kul'turnogo naslediya Arhangel'skoj oblasti ot 11 oktyabrya 2019 g. No. 12-p ob utverzhdenii granic ob'ekta kul'turnogo naslediya regional'nogo znacheniya dostoprimechatel'noe mesto «Kompleks pervonachal'nyh postroek Vologodsko-Arhangel'skoj linii Severnoj zheleznoj dorogi. Stanciya Nyandoma», 1895-1900-e gody, arhitektory L.N. Kekushev, I.A. Ivanov-SHic, 1914-1918 gody, 1920-e-1930-e gody]. (rus)

19. Mikhailov A.V. Urban planning and intangible aspects of the subject of protection of cultural heritage in the historical environment of St. Petersburg. [Gradostroitel'nye i nematerial'nye aspekty

predmeta ohrany ob"ektov kul'turnogo naslediya v istoricheskoy srede Sankt-Peterburga]: Abstract of the dissertation for the degree of candidate of architecture. St. Petersburg, 2022. (rus)

*Information about the authors*

**Petukhova, Nina M.** PhD. E-mail: mama8nina@yandex.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia, 190005, St. Petersburg, st. 2 Krasnoarmeyskaya, 4.

---

*Received 15.08.2022*

**Для цитирования:**

Петухова Н.М. Особенности сохранения и развития исторических архитектурных комплексов железных дорог // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 1. С. 61–73. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-61-73

**For citation:**

Petukhova N.M. Features of preservation and development of historical architectural complexes of railways. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 1. Pp. 61–73. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-61-73

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-74-88

*\*Василенко Н.А., Черныш Н.Д.**Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова**\*E-mail: nvasilenko\_domik@mail.ru*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

**Аннотация.** Данная статья посвящена определению и обоснованию функциональной структуры архитектурных объектов (зданий, сооружений, их комплексов, а также объектов уровня градостроительства и районной планировки) как целостных систем. Показано, что решение актуальных задач по реконструкции существующих и созданию новых зданий и сооружений, развитие архитектурно-градостроительных систем возможны путем внедрения передовых цифровых технологий на основе математических моделей, описывающих структуру и «поведение» архитектурных объектов с точки зрения системного подхода и принципов общей теории систем. В статье значительное место уделено обсуждению новой для архитектуры методологической концепции, занимающейся исследованием и проектированием архитектурно-градостроительных объектов как целостных архитектурных систем. На основе данной концепции даны определение и обоснование функциональной структуры любого архитектурного объекта, раскрывающие его системную сущность и строение. Подобие (изоморфность) частей и целого элементов и подсистем архитектурных объектов всех уровней иерархии позволяет рассматривать функциональную структуру архитектурного объекта любой сложности с учетом организации процессов четырех видов жизнедеятельности населения и применимо к архитектурным объектам, начиная с его элементарного уровня, – помещения, здания и заканчивая уровнем города и системы населенных мест.

**Ключевые слова:** функциональная структура, функционально-планировочная структура, архитектурный объект, системный подход, системный принцип.

**Введение.** В настоящее время в архитектурной науке отсутствует единый подход к определению объекта и предмета архитектурной деятельности, методов исследований и проектирования архитектурных объектов, обоснования и определения их функциональной и функционально-планировочной структуры. Возрастающая сложность архитектурно-градостроительных объектов, экологическая и экономическая ответственность исследователей и проектировщиков за принимаемые решения все острее актуализируют необходимость введения количественного измерения качества архитектурно-градостроительных решений. Вопросы оптимизации параметров, строения и функционирования объекта на разных стадиях его проектирования связаны с необходимостью точного понимания функциональной структуры объекта как системы и определения количественного критерия качества – показателя эффективности системы.

Согласно опубликованному РААСН документу «Прогноз развития фундаментальных исследований в области архитектуры, градостроительства и строительных наук до 2030 года» в разделе 2 «Основные направления фундаментальных исследований в области архитектуры» отмечается, что «... архитектура в XXI в., несомненно, будет переживать качественные структурные изменения, связанные с формированием новой научной картины мира ...» [1]. Одними из

приоритетных направлений развития фундаментальных научных исследований, проводимых РААСН, являются: «... создание среды жизнедеятельности, биосферно-совместимой и благоприятной для развития человека и общества; создание условий для развития человека и общества средствами архитектурно-градостроительной и строительной деятельности на принципах биосферной совместимости; ... фундаментальные основы архитектурной, градостроительной и строительной профессиональной культуры и образования; выявление и анализ новейших направлений архитектурно-теоретической мысли и творческих концепций архитекторов ... Постоянные направления исследований, актуальные в ближайшем будущем: 1 Инновационная проблематика. Перечень инновационных направлений, которые желательно держать в сфере внимания: архитектура в меняющемся пространстве современного социума; архитектура и трансформации властных структур; архитектура и геоэкономика; архитектура и геокультура; архитектура и духовная жизнь человека в информационном обществе; архитектура и массовая культура; архитектура и экология ... К 2030 г. ожидается достижение качественно нового уровня единения и продуктивного взаимодействия научно-исследовательской и проектно-творческой деятельности архитекторов и градостроителей» [1].

В современной архитектурно-градостроительной теории и практике отсутствует единый

подход к пониманию структуры и принципов «поведения» архитектурных объектов, в которых протекают сложные функционально-технологические процессы. Это говорит о том, что архитектурно-градостроительная наука не имеет методического «инструмента» целенаправленного поиска оптимальных решений.

Вопросы функциональной структуры архитектурных объектов любого уровня иерархии тесно связаны с типологией зданий и сооружений, классификацией видов деятельности, для которых предназначена архитектурная среда. Традиционное выделение основных видов жизнедеятельности населения: труд, быт и отдых усложняется многообразием представлений о форме, строении и закономерностях развития архитектурных объектов на разных уровнях их архитектурной организации, начиная от помещения, здания и заканчивая уровнем «город» и системой населенных мест. Значимой преградой на пути определения функциональной структуры архитектурных объектов является большое количество типов объектов, а, следовательно, и моделей этих объектов.

Основы концепции функционально-пространственной организации города отражены в теории А.Э. Гутнова, закрепившего понятия «каркаса» и «ткани» города [2]. Кевин Линч в исследовании [3] предлагает классификацию элементов города (пути, границы, район и др.) и раскрывает особенности их взаимодействия при зрительном восприятии.

Междисциплинарным исследованиям структуры современного города как антропогенно-природной системы посвящены исследования А.А. Бычковой [4], А.В. Крашенинникова, А.Д. Анисимовца [5]. Результаты исследований функционально-планировочной структуры городов по комплексу факторов на основе конфликтологического подхода приведены в исследованиях М.В. Перьковой, А.Г. Вайтенса, Е.В. Баклаженко [6]. Вопросы моделирования функционально-планировочной структуры города с учетом транспортных потребностей изложены в исследовании С.В. Скирковского, Д.В. Капского, Л.А. Лосина [7]. Вопросам эколого-градостроительной интеграции прибрежных территорий в функционально-планировочную структуру города посвящены исследования Д.В. Бобрышева, С.Э. Вершининой [8] и др.

Аспекты комплексного подхода к исследованию и оценке функционально-планировочной структуры архитектурно-градостроительных объектов изложены в работах А.П. Ромма [9], Делла Спина Л. [10]. В исследовании [11] понимание функционально-планировочной структуры и функционально-планировочной схемы

здания основано на комплексном подходе. С другой стороны, в работе [12] показана системная взаимосвязь функциональных процессов, осуществляемых в здании, и средств повышения их эксплуатационных характеристик. В ряде работ рассматривается концепция формирования функционально-планировочной структуры современного общественного здания на основе многоуровневой системы пространств [13] или как саморегулирующейся системы [14]. Особенности организации функционально-планировочной структуры ряда общественных зданий, специфике компоновки их функциональных схем в соответствии с нормативными документами посвящены исследования [15, 16].

Верхний иерархический уровень архитектурной деятельности – градостроительство граничит с областью экономической географии – уровнем территориального (отраслевого) планирования (социально-экономические, природно-географические и другие подобные объекты), результатами деятельности которого являются ограничения, нормативы, рекомендации и тому подобное, как юридическая основа для планировочных разработок. Информация по структуре и размещению производительных сил, получаемая на уровне территориального планирования, для уровня районной планировки имеет указательный, директивный характер. В градостроительном кодексе Российской Федерации [17] это положение не отражено, следовательно, на уровне разработки и принятия градостроительных решений происходит нарушение системного принципа иерархичности структуры между управляющим и управляемым объектами. В действующем градостроительном кодексе Российской Федерации отмечается ряд противоречивых положений, связанных с:

- общепринятой в настоящее время в градостроительстве «комплексной» методологической концепции, не отражающей особенности функциональной структуры градостроительных объектов как экологических систем типа «население ↔ среда»;

- несоответствием функциональных границ исследуемых объектов их объективным границам, в частности, смешением определений «территориальное (отраслевое) планирование» и «планирование развития территории»;

- несовершенство методологии принятия решений и отсутствие научно обоснованных инструментов целенаправленного анализа, выбора и оценки оптимальных решений в процессе исследований и проектных разработок.

Решение данных проблем возможно лишь на основе применения в архитектуре и градостроительстве принципов общей теории систем. В ряде

научных исследований подчёркивается актуальность и перспективность понимания объекта и предмета архитектурной деятельности с позиций системного подхода. Так, С.Д. Митягин, С.А. Ершова, Н.В. Осипова, П.П. Спиринов, З.А. Гаевская [18–21] отмечают необходимость учета иерархической структуры архитектурно-градостроительных объектов. М.В. Шубенков и М.Ю. Шубенкова определяют современные архитектурные объекты уровня «город» как сложные самоорганизующиеся, саморегулирующиеся и саморазвивающиеся урбанизированные экологические системы [22].

А.Е. Гашенко в работе [23] дает определение городскому пространству как системе элементов и связей и выделяет архитектурно-планировочный, функциональный, социальный, семиотический, стилистический (средовой) аспекты существующих архитектурно-градостроительных концепций в исследовании функциональной и планировочной структуры города. В исследованиях А.Е. Енина, В.С. Пахомовой на основе системного подхода рассматриваются особенности функционально-планировочной структуры технопарков с учетом их типологии и таксономии [24].

Системный подход отражает специфику строения и функционирования не только архитектурных объектов. В изданиях под редакцией В.С. Тюхтина, Ю.А. Урманцева [25] и Ф. Капра, П.Л. Луизи [26] на базе общей теории систем (ОТС), предложенной Людигом фон Бергаланфи [27] раскрывается практическое значение системного подхода для решения разнообразных научных проблем и диалектические закономерности в строении, функционировании и развитии сложных системных объектов в живой и неживой природе, обществе и технике, а также особенности их познания. Подчеркивается целесообразность системного подхода к их исследованию, в том числе к таким сложным объектам, как объекты архитектурные. Ю.А. Урманцев [28, 29] развивает и обобщает общую теорию систем, предлагая новый инструментарий для широкого спектра исследований в любой научной области на основе системного мировоззрения.

В исследованиях Г.И. Лаврика, А.И. Анисимова [30, 31, 32] апробирована новая для архитектуры методологическая концепция, основанная на принципах общей теории систем, занимающейся исследованием и проектированием систем типа «население ↔ среда» – демозкосистем (целостных архитектурных систем). Указанное системное научное направление и предопределило цель и задачи данного исследования.

**Материалы и методы.** Ведущим аспектом данного исследования является представление архитектурных объектов как экологических систем типа «население ↔ среда», предопределяющим системную взаимозависимость человека и его жизненной среды. В силу своей высокой сложности, динамичности и целостности, архитектурные объекты требуют системного подхода. Они включают множество взаимосвязанных элементов, и изменение хотя бы одного из них влечет за собой изменение других, а иногда и многих элементов.

Предметом данного исследования является функциональная составляющая структуры архитектурных объектов (зданий, сооружений, их комплексов, включая города, объекты районной планировки и градостроительства). Целью исследования является системное определение и обоснование функциональной структуры целостных архитектурных объектов как экологических систем типа «население ↔ среда». Под целостным архитектурным объектом в данном исследовании понимается локализованный в пространстве объект (среда), в котором помимо основной (профильной) функции реализуются все необходимые для осуществления нормальной человеческой жизнедеятельности функции. Целостная архитектурная система включает три функционально-пространственные подсистемы: искусственную (архитектурно-градостроительную) среду, природную (естественную) среду и население, находящиеся в системной взаимосвязи и взаимозависимости [30–33]. Модель такой экологической системы представлена на рисунке 1.

Методика исследования основана на идеологических воззрениях общей теории систем применительно к архитектурным объектам разных уровней иерархии. В настоящее время в понятии «система» подчеркивается ряд общих для всех системных объектов свойств, и в первую очередь, свойств целостности и упорядоченности [30, 32–34].

Успешно апробированные термины «демозкосистема» (от греческих слов *demos* – народ, население; *oikos* – жилище, дом, родина) и «демозкология» определяют объект архитектурной деятельности как экологическую систему типа «население ↔ среда» – целостную архитектурную систему [30–34]. В рамках данного исследования необходимо определить границы системного объекта путем вычленения его системообразующих элементов и абстагироваться от несущественных для принятия решения элементов и связей.

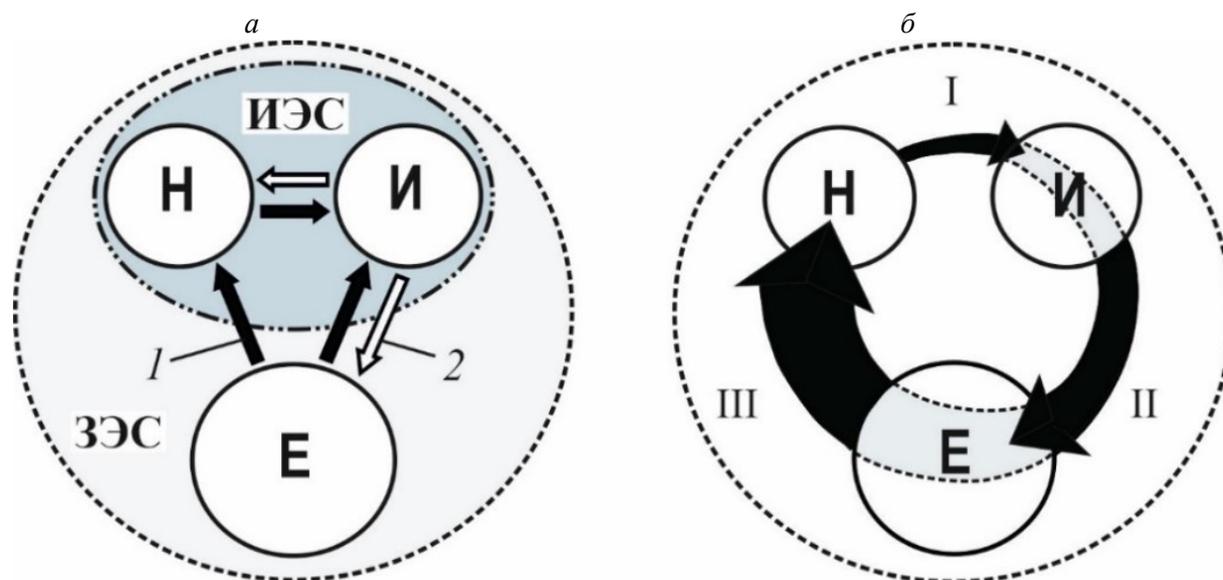


Рис. 1. Структурно-функциональная модель экосистемы «население ↔ среда»:

*а* – функциональная модель экосистемы; *б* – принципиальная модель взаимосвязи и взаимовлияния элементов системы; Н – население; Е – естественная (нерукотворная, природная) среда;

И – искусственная (архитектурная, созданная населением) среда; ИЭС – искусственная экосистема; ЗЭС – земная (естественная и искусственная) экосистема; 1 – связь прямая; 2 – связь обратная; I – ошибка, допущенная на этапе исследований и /или разработки проекта; II – материализованная в течение времени ошибка негативно воздействует на естественную среду; III – системное отрицательное воздействие нарушенных естественных экосистем на здоровье населения. Сост.: Василенко Н.А., Лаврик Г.И.

**Основная часть.** Термин «объект капитального строительства», выступающий специальным понятием градостроительного законодательства [17], в данном исследовании является синонимом термина «архитектурный объект» уровня зданий и сооружений. Согласно Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [35] объект капитального строительства – это объект (или комплекс объектов), возведенный с целью длительной эксплуатации и образующий с земельным участком единое архитектурно-градостроительное, объемно-пространственное, функциональное, инженерно-техническое и технологическое целое. В зависимости от функционального назначения и характерных признаков объекты капитального строительства разделяют на виды [17]:

а) объекты производственного назначения (здания, строения, сооружения производственного назначения, в том числе объекты обороны и безопасности), за исключением линейных объектов;

б) объекты непромышленного назначения (здания, строения, сооружения жилищного фонда, социально-культурного и коммунально-бытового назначения, а также иные объекты капитального строительства непромышленного назначения);

в) линейные объекты (трубопроводы, автомобильные и железные дороги, линии электропередачи, линии связи и другие).

Здание – результат строительства (продукт строительной деятельности), представляющий собой объемную строительную систему, имеющую надземную и (или) подземную части, включающую помещения, сети инженерно-технического обеспечения и системы инженерно-технического обеспечения и предназначенную для проживания и (или) деятельности людей, размещения производства, хранения продукции или содержания животных [35].

Помещение – это часть объема здания или сооружения, имеющая определенное назначение и ограниченная строительными конструкциями [35].

Строение – совокупность капитальных архитектурно-строительных объектов, включая здания, сооружения, объекты незавершенного строительства и их разновидности. В юридическом смысле строение можно считать синонимом понятия «объект капитального строительства».

Сооружение – результат строительства (продукт строительной деятельности), представляющий собой объемную, плоскостную или линейную строительную систему, имеющую наземную, надземную и (или) подземную части, состоящую из несущих, а в отдельных случаях и ограждающих строительных конструкций и

предназначенную для выполнения производственных процессов различного вида, хранения продукции, временного пребывания людей, перемещения людей и грузов [35].

Согласно [17] объекты капитального строительства различают федерального, регионального и местного значения.

Структура архитектурно-градостроительных объектов как целостных экологических систем (вне зависимости от их уровня иерархии) должна отражать все необходимые (системообразующие) виды деятельности, характеризующие её как целостную систему, в которой основной подсистемой является человек, население. Следовательно, решающими в определении качества архитектурной среды должны быть не технические и технико-экономические, а «человеческие» критерии оптимальности.

Содержательный анализ всего множества архитектурных объектов и осуществляемых в них функциональных процессов позволил выделить четыре невазменяемых вида человеческой деятельности [30, 33, 36]:

- производство (процессы, направленные на производство «вещного» мира человеческого общества, материальной среды обитания, а также производство информации и энергии (наука и энергетика);

- социальная инфраструктура (процессы, связанные с социально-культурным и коммунально-бытовым обслуживанием населения, воспитанием и формированием личности);

- рекреация (процессы, направленные на отдых, восстановление и оздоровление населения и биологических систем, а также на восстановление утраченных свойств и модернизацию технических систем производства, социальной инфраструктуры и связей (коммуникаций));

- связи (коммуникации, осуществляющие обмен энергией, веществом и информацией между элементами системы).

Функциональную структуру архитектурного объекта любой сложности можно рассматривать с учетом организации процессов четырех видов жизнедеятельности населения: производственных (*П*), бытовых (*Б*), рекреационных (*Р*) и коммуникационных (*С*), выступающих компонентами архитектурных систем. На рисунке 2 приведены системообразующие компоненты (системообразующие функции) целостных архитектурных систем с выделением рекреационной функции. Отличие рекреационной деятельности от производственных процессов и сферы социально-культурного обслуживания населения состоит в том, что рекреация нацелена на восстановление утраченных в процессе функциониро-

вания моральных и физических свойств рекреируемых объектов (биологических, технических), а не на их численное увеличение.

Под функциональной структурой архитектурного объекта (объекта капитального строительства в том числе) подразумевается совокупность взаимосвязанных функциональных процессов жизнедеятельности населения, выступающих составными элементами, подчиненными свойству целостности системы и связанных между собой в единое целое системой коммуникаций (связей). Чёткие связи, включающие все виды коммуникаций материального, информационного, энергетического характера между функциональными процессами (элементами), обеспечивают целостность системы. Специализация связей делает их необходимыми друг для друга в интересах системы. Понятие функционально-планировочной структуры целостного архитектурного объекта включает помимо совокупности взаимосвязанных функциональных процессов жизнедеятельности населения, предназначенные для этих целей функциональные зоны и планировочные элементы, связанные системой коммуникаций (связей) [36].

Общность целостных архитектурных систем с другими системами позволяет утверждать, что они функционируют в соответствии с практически всеми общесистемными принципами – целостности, иерархичности структуры, обратной связи, сигнатур (определяющих признаков), инвариантности и др. Некоторые из общесистемных принципов в архитектурных системах имеют специфическую форму проявления. По характеру своего действия их условно можно разделить на качественные (целостности, иерархичности, инвариантности структуры) и количественные (сигнатур, компактности (принцип «максимальной простоты» или «адекватной конструкции») [30, 34, 36].

На рисунке 3 приведена схема, отображающая развитие архитектурной методологии от Витрувия до наших дней и становление актуального в настоящее время понимания целостной структуры объекта архитектурной деятельности. В основе системного синтеза дифференцировавшиеся органически составляющие системы «человек ↔ среда»: производство вещного мира, социальная сфера (инфраструктура), рекреация (восстановление) здоровья человека и материальной среды, а также коммуникации (связи) системы.

На рисунке 4 представлено графическое изображение функциональной структуры основных подсистем и компонентов целостной архитектурной системы в форме диаграмм Эйлера-

Венна. Среди системообразующих видов деятельности (компонентов целостной архитектурной системы) нормируемыми выступают бытовые, производственные и рекреационные процессы, что обусловлено возможностью на стадии разработки проектного решения определить

(нормировать) габариты и площади необходимых помещений бытового, производственного и рекреационного назначения согласно специфике технологических процессов, технического задания, пропускной способности объекта.

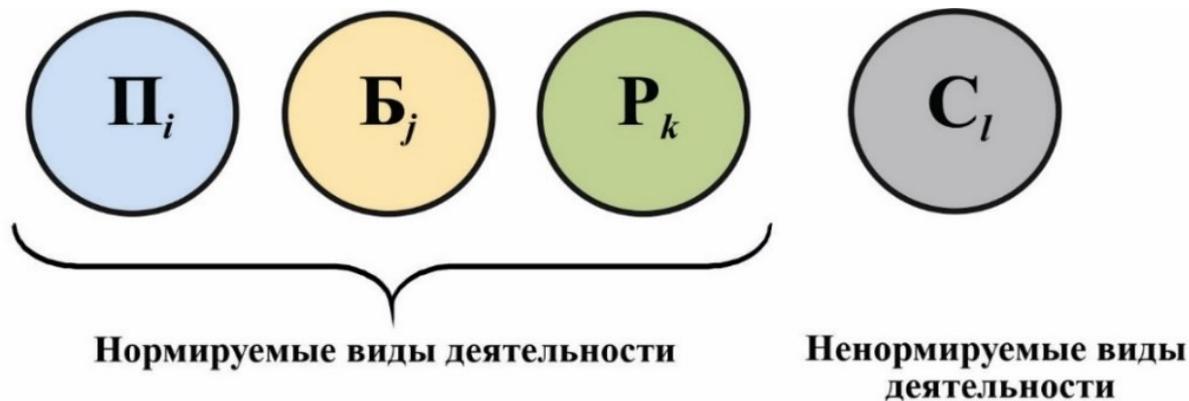


Рис. 2. Системообразующие виды деятельности (компоненты) архитектурных систем:  $P_i$  – производство материальной среды обитания (вещного мира),  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $B_j$  – социальная сфера (коммунально-бытовое и социально-культурное обслуживание населения),  $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $P_k$  – рекреация,  $k = 1, 2, \dots, p$ ;  $C_l$  – коммуникации (связи) системы,  $l = 1, 2, \dots, s$ . Сост.: Василенко Н.А., Лаврик Г.И.

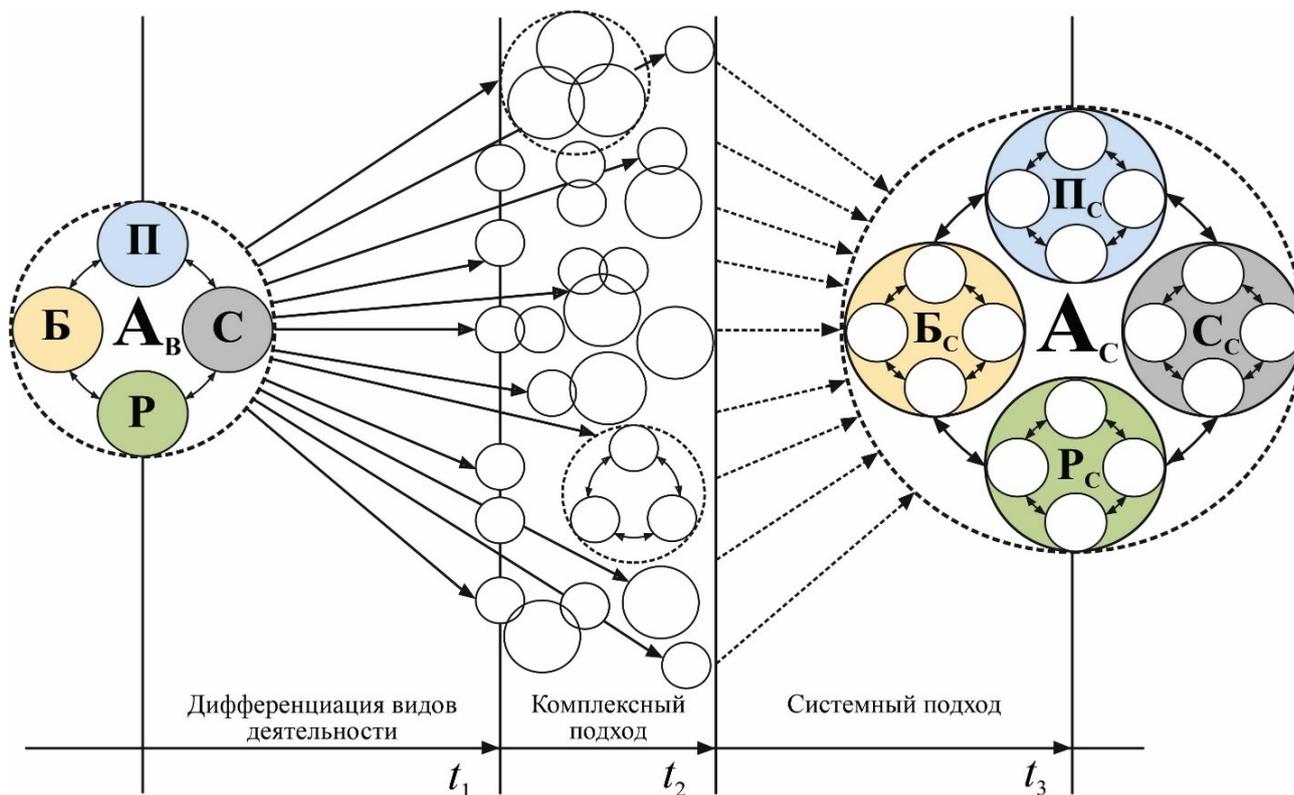


Рис. 3. Становление архитектурной методологии от Витрувия до наших дней:  $A_v$  – целостная структура объекта архитектурной деятельности в I в. до н.э.;  $A_c$  – предполагаемый системный синтез дифференцировавшихся органических составляющих системы «человек ↔ среда»;  $P$  – производство вещного мира;  $B$  – социальная сфера (инфраструктура);  $R$  – рекреация (восстановление) здоровья человека и материальной среды;  $C$  – коммуникации (связи) системы;  $t_1$  – период начала и становления процесса общественного разделения труда (специализация и дифференциация);  $t_2$  – период осознания экономической и социальной нецелесообразности дальнейшего процесса расщепления бывших целостных видов деятельности;  $t_3$  – время методологических поисков синтеза. Сост. Василенко Н.А.

## ПОДСИСТЕМЫ

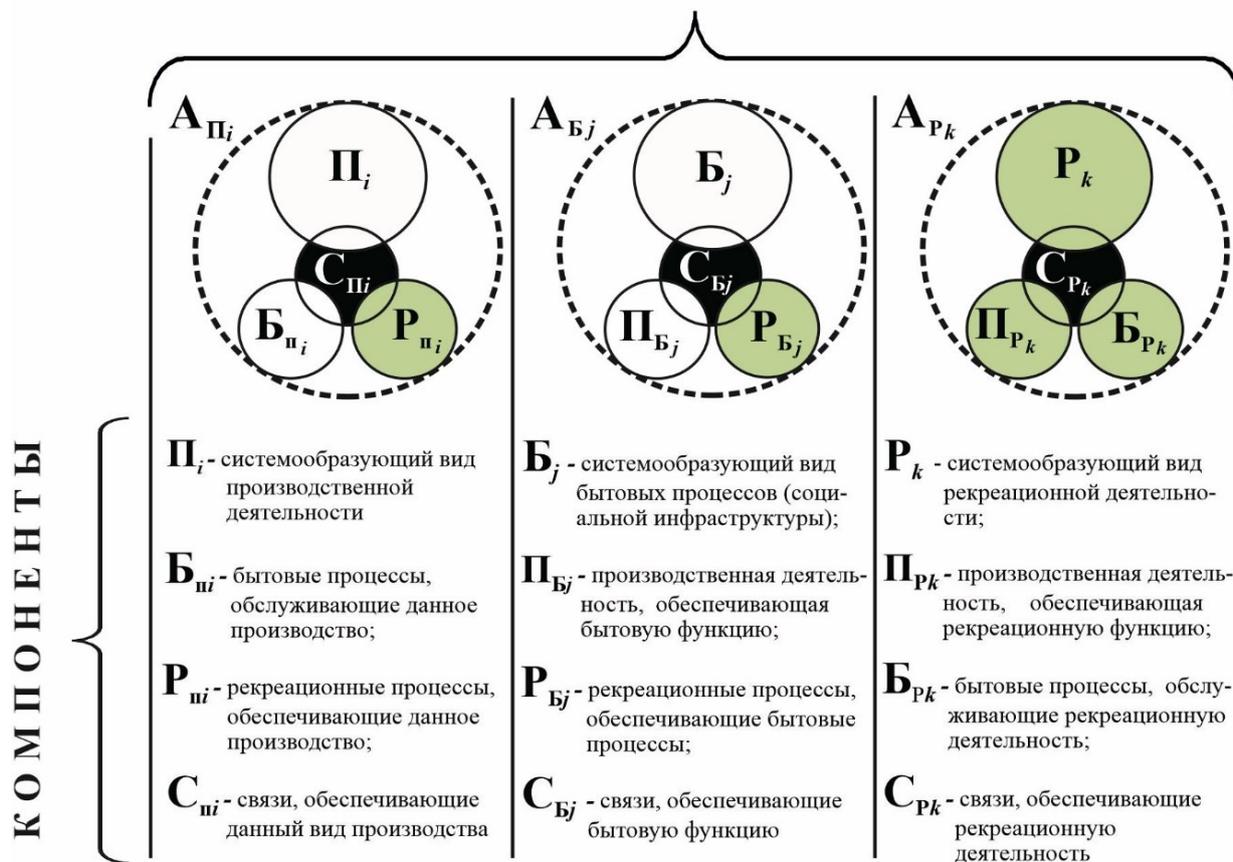


Рис. 4. Функциональная структура основных подсистем и компонентов целостных архитектурных систем:  $A_{Pi}$  – производственная подсистема, профиль  $i$ -го типа;  $A_{Bj}$  – бытовая подсистема (социально-культурное и коммунально-бытовое обслуживание), профиль  $j$ -го типа;  $A_{Pk}$  – рекреационная подсистема, профиль  $k$ -го типа.  
Сост.: Василенко Н.А., Лаврик Г.И.

Для осуществления коммуникационных процессов на уровне зданий предусмотрены транзитные помещения (коридоры, шлюзы, проходы, лестнично-лифтовые узлы и тому подобное), на уровне жилых районов, населенных мест – проезды, автомобильные и железные дороги, пешеходные пути (тротуары, площадки, лестницы) и другие линейные объекты, для которых задается нормируемая ширина (глубина) согласно технологических решений объекта, нормативных требований к путям эвакуации (для зданий и сооружений), объемов движения пешеходов и транспорта конкретной коммуникации (категории улиц и дорог в соответствии с их основным назначением) [30, 31, 36].

На уровне зданий общая протяженность транзитных помещений ограничивается, как правило, нормативной длиной путей эвакуации, на уровне населенных мест и районной планировки – расчетной скоростью движения транспорта, числом и шириной полос движения, соответствующей шириной пешеходной части тротуара для той или категории улиц и дорог, и заранее предугадать (нормировать) их общую площадь и протяженность в процессе разработки проекта не

представляется возможным, что и отражает смысл «ненормируемости» транзитной площади и коммуникационных процессов в целом.

Адаптация системного принципа компактности (принципа «максимальной простоты» или «адекватной конструкции») применительно к целостным архитектурным объектам отражает стремление к сокращению затрат энергии и материала в процессе функционирования объекта-системы и выражается в минимизации показателей ее связей (коммуникаций). Стремление фактических (проектных) показателей  $i$ -го вида деятельности первой группы (нормируемых процессов) к нормативным параметрам и стремление показателей  $l$ -го вида деятельности второй (коммуникационной, С) группы к минимуму отражают достижение компактности проектного решения, то есть эффективности транспортных, трудовых, энергетических и других материальных затрат внутри объекта-системы с экономической точки зрения.

Согласно системному принципу инвариантности структуры указанные зависимости показателей нормируемых и ненормируемых видов деятельности применимы к проектным решениям

архитектурных объектов любой сложности, уровня иерархии и профиля. На рисунке 5 приведена обобщенная схема системного соответствия функций архитектурных объектов по уровням сложности. Данная схема отражает многоуровневость и взаимоподчиненность функционально целостных архитектурных объектов.

На рисунке 6 приведена схема, определяющая взаимосвязь и взаимоподчиненность основных типов и уровней функционально целостных архитектурных объектов типа «население ↔ среда».

Количественными (метрическими) критериями (признаками) выделения уровней иерархии архитектурных систем выступают: мощность объекта, периодичность использования, сложность структуры (увеличение элементов и связей системы с изменением информативности среды), вид и мера воздействия факторов (информационного, материального и энергетического характера). Качественный характер носят критерии: функциональная целостность, самодостаточность уровня (уровневость управления и подчинения).

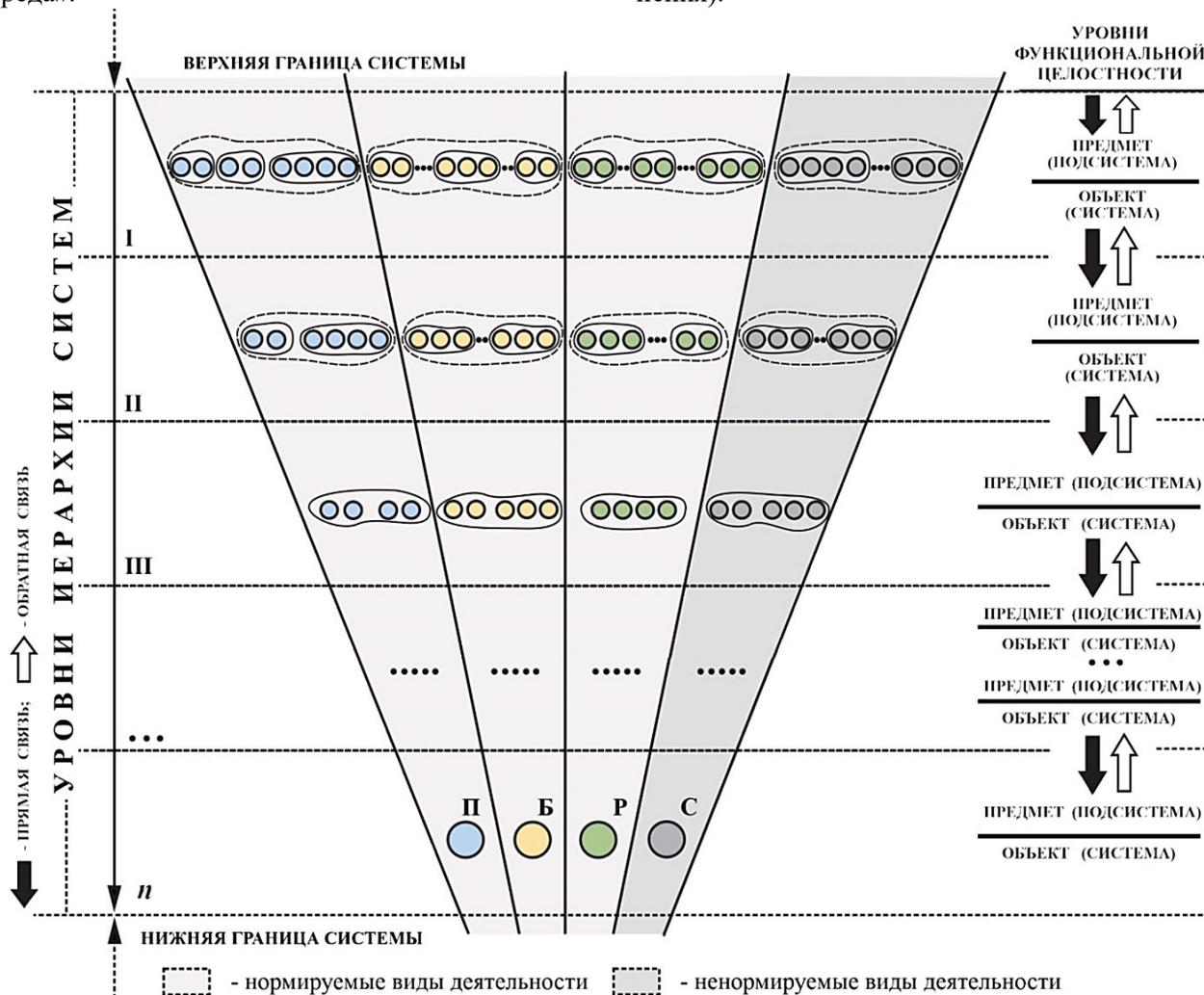


Рис. 5. Схема соответствия системообразующих функций архитектурных объектов уровням сложности:

П – производственная функция («производство первого рода»); Б – бытовая функция («производство второго рода»), социально-культурное и коммунально-бытовое обслуживание); Р – рекреационная функция,  $k = 1, 2, \dots, p$ ; С<sub>1</sub> – коммуникации (связи) системы. Сост.: Василенко Н.А., Лаврик Г.И.

**Выводы.**

1. Исследование любого архитектурного объекта начинается с определения его сущности, – функциональных и пространственных границ. Становление актуального в настоящее время понимания целостной структуры объекта архитектурно-градостроительной деятельности основано на системном синтезе органических составляющих системы «человек ↔ среда».

2. Представление объекта архитектурной деятельности в виде объекта-системы типа «население ↔ среда» позволяет конкретизировать его функциональную структуру, выделив систему объектов одного и того же «рода». В целостных архитектурных объектах (зданиях, их комплексах, пространственно локализованных градостроительных объектах (среде)) осуществляются согласно принципу инвариантности структуры четыре вида невазаимозаменяемых процессов

жизнедеятельности. Нормируемые виды деятельности (производственные процессы, бытовые процессы (социально-культурное и коммунально-бытовое обслуживание) и рекреационные процессы) отождествимы с элементами архитек-

турных систем. Коммуникации (информационные, энергетические, материальные) являются связями системы, объединяющими указанные элементы в единую функционально-пространственную структуру.

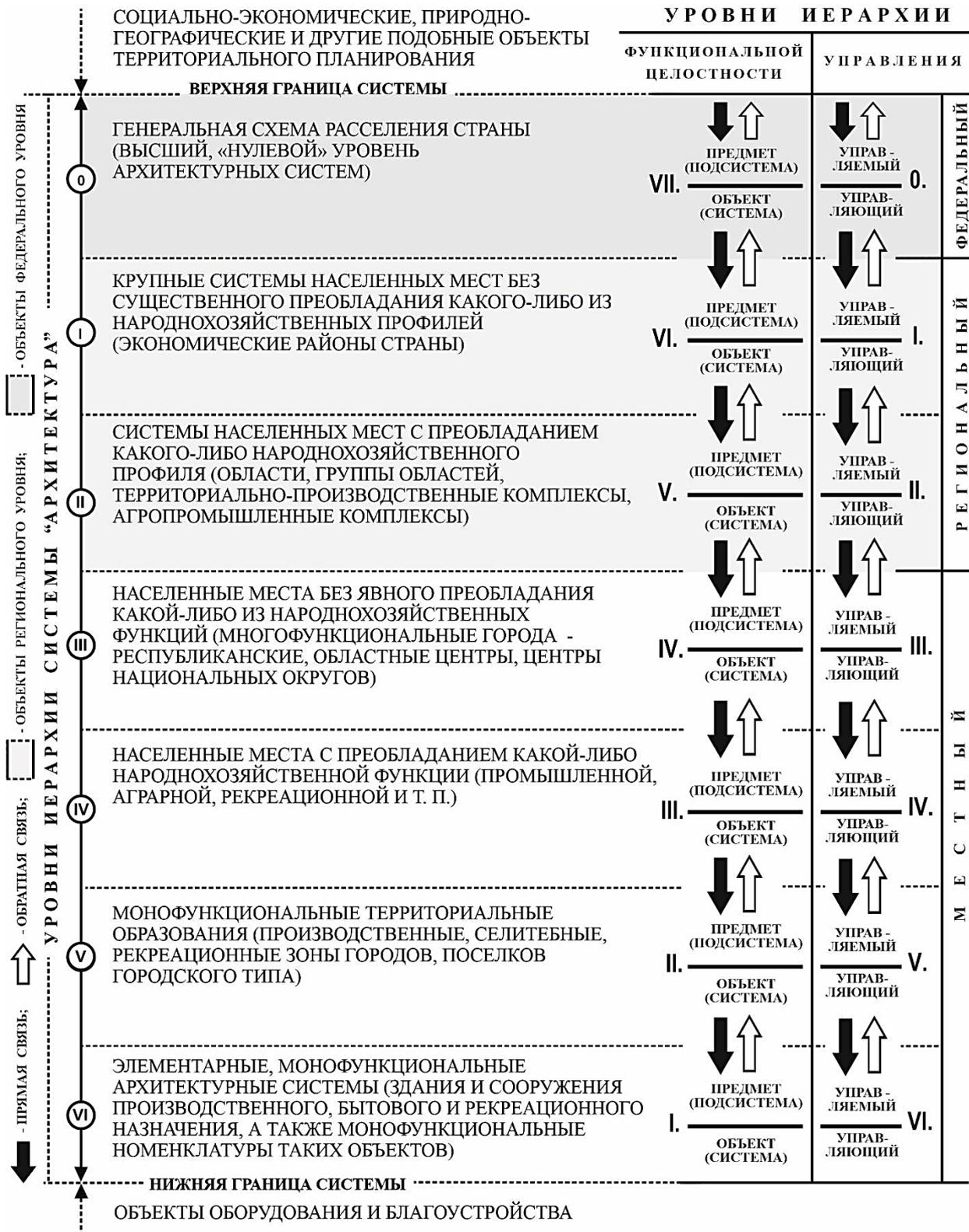


Рис. 6. Принципиальная схема взаимосвязи и взаимоподчиненности основных типов и уровней целостных архитектурных систем. Сост.: Василенко Н.А., Лаврик Г.И.

3. В соответствии с обобщенным учением о системном изоморфизме ОТС (однообразии объектов разных сущностей) четырехчастная функциональная структура присуща архитектурным объектам любой сложности и любому уровню иерархии. Какие бы превращения архитектурные объекты-системы не испытывали, системное сходство сохраняется согласно закону сохранения системного сходства. Количество иерархических уровней находится в прямой зависимости от характера организации коммуникаций (связей) архитектурной системы. Стремление проектных показателей нормируемых процессов к нормативным параметрам, а показателей коммуникационной группы к минимуму отражает в архитектурных системах действие системного принципа компактности.

4. Актуальным направлением в архитектурно-градостроительной теории и практике является создание и внедрение эффективных информационно-компьютерных технологий, базирующихся на системной методологии с целью объективной оценки, анализа и выбора оптимальных решений. Условиями объективности исследовательских и проектных результатов выступают: определение функциональной целостности системы (подсистемы) и её функциональная самодостаточность.

5. Новизна данного исследования состоит в системном определении и обосновании термина «функциональная структура архитектурного объекта», согласно которому это совокупность взаимосвязанных функциональных процессов жизнедеятельности населения (составных элементов), объединенных связями (коммуникациями), подчиненных свойству целостности объекта как системы.

6. Впервые авторами исследования на основе предложенных схем (принципиальных моделей) соответствия системообразующих функций архитектурных объектов уровням сложности, а также взаимосвязи и взаимоподчиненности основных типов и уровней архитектурных систем показано, что в основе построения функциональной структуры архитектурных объектов как самодостаточных систем (независимо от их сложности и основной функции) положен общесистемный принцип целостности – стремление каждого объекта (подсистемы) к достижению главной цели системы как целого. Данные модели отражают качественно новое системное свойство объектов архитектурной и градостроительной деятельности, которое достигается при объединении объектов архитектурных и градостроительных в единую функционально-управленческую вертикаль.

7. Предложенная принципиальная модель системной взаимосвязи между уровнями функциональной целостности и управления в архитектурных системах, начиная от местного уровня (зданий, сооружений и других элементарных архитектурных систем) и заканчивая уровнем федерального значения (системой расселения страны), раскрывает природу отношений и суть действия в архитектурных системах принципов целостности и иерархичности структуры. Системный принцип целостности является определяющим фактором на пути оптимизации архитектурно-градостроительных объектов как систем.

*Благодарности.* Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов "Приоритет 2030" с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. РААСН «Прогноз развития фундаментальных исследований в области архитектуры, градостроительства и строительных наук до 2030 года» // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2009. № 3. С. 6–14.

2. Гутнов А.Э. Системный подход в изучении города: основания и контуры теории городского развития. В ежегоднике Системные исследования. Методологические проблемы. Москва: Наука, 1986. С 211–232.

3. Линч К. Совершенная форма в градостроительстве. Пер. с англ. В. Л. Глазычева. Под ред. А. В. Иконникова. Москва: Стройиздат, 1986. 264 с.

4. Бычкова А.В. Узлы социальной активности // Architecture and Modern Information Technologies (AMIT). 2016. № 3 (36). С. 1–18.

5. Krashennikov A.V., Anisimovets A.D. Spatial Models of Local Identity // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Civil, Architectural and Environmental Sciences and Technologies (CAEST 2019, Samara, 19 ноября 2019 г. Samara: Institute of Physics Publishing, 2020. Т. 775 №. 012022. doi: 10.1088/1757-899X/775/1/012022

6. Perkova M.V, Baklazhenko E.V, Vaytens A.G. A Method for Identifying and Resolving Conflicts in Urban Riverside Development // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International science and technology conference «EarthScience», Russky Island. 10–12 декабря 2019 г. Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2020. Т. 459. № 052024. doi: 10.1088/1755-1315/459/5/052024

7. Скирковский С.В., Капский Д.В., Лосин

Л.А. Моделирование функционально-планировочной структуры города // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2021. № 2 (43). С. 11–15.

8. Бобрышев Д.В., Вершинина С.Э. Интеграция прибрежных территорий в функционально-планировочную структуру города как необходимое условие их устойчивого развития // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 12 (95). С. 103–107.

9. Ромм А.П. Функционально-планировочная структура города и стоимость городских земель // Жилищное строительство. 2002. № 9. С. 9–10.

10. Della Spina L. A Multi-level Integrated Approach to Designing Complex Urban Scenarios in Support of Strategic Planning and Urban Regeneration. In: Calabrò F., Della Spina L., Bevilacqua C (eds) *New Metropolitan Perspectives ISHT 2018. Smart Innovation, Systems and Technologies* Springer, Cham. In book: *New Metropolitan Perspectives*. 2019. № 100. Pp. 226–237.

11. Ламехова Н.В. Функционально-планировочная структура зданий для дошкольного образования // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2011. № 3. С. 46–52.

12. Olanrewaju A.L., Abdul-Aziz A.R. Building Maintenance Processes, Principles, Procedures, Practices and Strategies. In book: *Building Maintenance Processes and Practices*. Singapore Springer. 2015. Pp.79–129.

13. Черненко Г.Н. Формирование функциональной и планировочной структуры современных университетских библиотек // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура, 2011. № 23(42) С. 180–185.

14. Колгашкина В.А. Особенности функционально-планировочной организации многофункциональных комплексов с интегрированными бизнес-функциями // *Architecture and Modern Information Technologies*. (AMIT) 2013. № 2 (23). № статьи 23/13-11.

15. Чечель И.П. Формирование и развитие функционально-планировочной структуры общеобразовательных школ Белгородской области (1904–2020 гг.) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 7. С. 49–65. doi: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-49-65

16. Бадави А.А. Особенности организации функционально-планировочной структуры зон сервисного обслуживания малых гостиниц // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 10. С. 46–57. doi: 10.34031/2071-7318-2021-6-10-46-57

17. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 01.05.2022): [принят Государственной Думой 22 дек. 2004 г.: одобрен Советом Федерации 24 дек. 2004 г.] // КонсультантПлюс: офиц. сайт. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_327616](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_327616) (дата обращения 10.06.2022).

18. Ершова С.А., Митягин С.Д., Осипова Н.В. Соотношение элементов функционально-планиров. структуры города // ПГС. 2012. № 2. С. 10–12.

19. Ершова С.А., Митягин С.Д., Осипова Н.В. Нормирование функционально-планировочной структуры населенных мест // ПГС 2012. № 4. С. 29–31.

20. Митягин С.Д. Теоретико-методологические задачи совершенствования проектно-градостроительной деятельности // *Промышленное и гражданское строительство*, 2020. № 1. С. 43–47. doi: 10.33622/0869-7019.2020.01.43-47

21. Митягин С.Д., Спиринов П.П., Гаевская З.А. Теоретические основы многоукладного градостроительства // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году: Сб. науч. трудов РААСН: в 2 т. / Российская академия архитектуры и строительных наук*. Москва: Издательство АСВ, 2021. С. 303–310.

22. Шубенков М.В., Шубенкова М.Ю. Современный город как антропогенно-природная система // *Architecture and Modern Information Technologies* (AMIT). 2020. № 4(53) С. 182–190. doi: 10.24411/1998-4839-2020-15311

23. Гашенко А.Е. Архитектурно-градостроительная морфология как предмет системных исследований: элементный аспект // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 6 (53). С. 5–13.

24. Енин А.Е., Пахомова В.С. Особенности функционально-планировочной структуры технопарков // *Архитектурные исследования*. 2021. № 2. С. 123–128

25. Тюхтин В.С., Урманцев Ю.А., Ларин Ю. С. и др. Система. Симметрия. Гармония; под ред. В.С. Тюхтина, Ю.А. Урманцева. Москва: Мысль, 1988. 318 с.

26. Капра Ф., Луизи П.Л. Системный взгляд на жизнь: Целостное представление. Пер. с англ. Москва: УРСС: ЛЕНАНД, 2020. 504 с.

27. Бергаланфи Л. фон. Общая теория систем – обзор проблем и результатов. В кн.: *Системные исследования: Ежегодник*. Москва: Наука, 1969. С. 30–52.

28. Урманцев Ю.А. Эволюционика, или Общая теория развития систем природы, общества и мышления. Изд. 3-е. Москва: ЛЕНАНД, 2020. 240 с.

29. Урманцев Ю.А. Общая теория систем в доступном изложении. Изд. 2-е, испр. Москва: ЛЕНАНД, 2021. 400 с.

30. Лаврик Г.И. Методологические основы районной планировки. Введение в демозоологию. Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2007. 117 с.

31. Лаврик Г.И. Методы оценки качества жилища. Исследование, проектирование, экспертиза. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2007. 100 с.

32. Анисимов А.И., Лаврик Г.И. Региональные градостроительные проблемы и возможное их решение // Градостроительство. 2010. № 4. С. 15–21.

33. Vasilenko N.A. Problems of energy resources allocation at decision-making stages in architecture and urban planning activities // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 4<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference on Energy System, ICES 2019.

Belgorod, 31 октября–1 ноября 2019 г. Institute of Physics Publishing, 2020. Т. 791. № 012050. doi: 10.1088/1757-899X/791/1/012050

34. Vasilenko N.A. General System Principles of Architectural Systems Formation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International science and technology conference «FarEastCon-2019». IOP Publishing. 2020. Т. 753. № 032047. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032047

35. Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. N 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (с изм. и доп. (в ред. Федерального закона от 02.07.2013 № 185-ФЗ)). URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102135277>

36. Василенко Н.А., Черныш Н.Д. Функционально-планировочная структура транспортных зданий и сооружений на примере морских пассажирских терминалов // Architecture and Modern Information Technologies (AMIT). 2020. № 3(52). С. 58–83. doi: 10.24411/1998-4839-2020-15204.

#### Информация об авторах

**Василенко Наталья Анатольевна**, кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектурных конструкций. E-mail: [nvasilenko\\_domik@mail.ru](mailto:nvasilenko_domik@mail.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Черныш Надежда Дмитриевна**, доцент кафедры архитектурных конструкций. E-mail: [chernysh-nadejda@yandex.ru](mailto:chernysh-nadejda@yandex.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 09.09.2022 г.

© Василенко Н.А., Черныш Н.Д., 2023

*\*Vasilenko N.A., Chernysh N.D.*

*Belgorod Shukhov State Technological University*

*\*E-mail: [nvasilenko\\_domik@mail.ru](mailto:nvasilenko_domik@mail.ru)*

## DEFINITION AND SUBSTANTIATION OF ARCHITECTURAL OBJECTS' FUNCTIONAL STRUCTURE ON THE BASIS OF SYSTEM APPROACH

**Abstract.** *The article deals with the systemic substantiation of architectural objects' (buildings, constructions and their complexes, including those in the sphere of urban development and regional planning) functional structure as integral systems. It is demonstrated that the solution of urgent tasks for the reconstruction of existing and the creation of new buildings and structures, the development of architectural and urban planning systems are possible through the introduction of advanced digital technologies based on mathematical models describing the structure and «behavior» of architectural objects from the point of view of a systematic approach and the principles of the general theory of systems. In the article, a significant place is given to the discussion of a methodological concept new for architecture, dealing with the research and design of architectural and urban-planning objects as integral architectural systems. On the basis of this concept, the definition and justification of the functional structure of any architectural object are given, revealing its systemic essence and structure. The similarity (isomorphism) of the whole and parts of architectural objects' elements and subsystems at all hierarchy levels allows considering the functional structure of an architectural object of*

any complexity with account of organizing the processes of four types of population's life activity. It is applicable to architectural objects from their elementary levels – room and building, and to the level of cities and populated areas.

**Keywords:** functional structure, functional planning structure, architectural object, system approach, system principle.

## REFERENCES

1. RAASN «Forecast of the development of fundamental research in the field of architecture, urban planning and construction sciences until 2030» [Prognoz razvitiya fundamentalnykh issledovaniy v oblasti arkitektury, gradostroitel'stva i stroitelnykh nauk do 2030 goda]. Academic Bulletin of UralNIIproekt RAASN. 2009. No. 3. Pp. 6–14. (rus)
2. Gutnov A.E. System approach in the study of the city: foundations and contours of the theory of urban development [Sysremny podhod v izuchenii goroda: osnovaniya i kontury teorii gorodskogo razvitiya]. In the yearbook of System Research. Methodological problems. Moscow: Nauka, 1986. Pp. 211–232. (rus)
3. Lynch K. The perfect form in urban planning [Sovershennaya forma v gradostroitel'stve]. Translated from the English by V. L. Glazychev. Edited by A.V. Ikonnikov. Moscow: Stroyizdat, 1986. 264 p. (rus)
4. Bychkova A.V. Nodes of social activity [Uzly soysialnoy aktivnosti]. Architecture and Modern Information Technologies (AMIT) 2016. No. 3 (36). Pp. 1–18. (rus)
5. Krashennnikov A.V., Anisimovets A.D. Spatial Models of Local Identity. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Civil, Architectural and Environmental Sciences and Technologies (CAEST 2019, Samara, November 19, 2019 Samara: Institute of Physics Publishing, 2020. Vol. 775 No. 012022. doi: 10.1088/1757-899X/775/1/012022
6. Perkova M.V., Baklazhenko E.V., Vaytens A.G. A Method for Identifying and Resolving Conflicts in Urban Riverside Development. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International science and technology conference «EarthScience», Russky Island. December 10–12, 2019 Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2020. Vol. 459. No. 052024. doi: 10.1088/1755-1315/459/5/052024
7. Skirkovsky S.V., Kapsky D.V., Losin L.A. Modeling of the functional planning structure of the city [Modelirovanie funktsionalno-planirovochnoy struktury goroda]. Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport. 2021. No. 2 (43) Pp. 11–15. (rus)
8. Bobryshev D.V., Vershinina S.E. Integration of coastal territories into the functional planning structure of the city as a necessary condition for their sustainable development [Integratsiya pribrezhnykh territory v funktsionalno-planirovochnuy struktury goroda kak neobkhodimoe uslovie ikh ustoychivogo razvitiya]. Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2014. No. 12 (95). Pp. 103–107. (rus)
9. Romm A.P. The functional and planning structure of the city and the cost of urban land [Funktsionalno-planirovochnay struktura goroda I stoimost' gorodskikh zemel']. Housing construction. 2002. No. 9. Pp. 9–10. (rus)
10. Della Spina L. A Multi-level Integrated Approach to Designing Complex Urban Scenarios in Support of Strategic Planning and Urban Regeneration. In: Calabrò F., Della Spina L., Bevilacqua C (eds) New Metropolitan Perspectives ISHT 2018. Smart Innovation, Systems and Technologies Springer, Cham. In book: New Metropolitan Perspectives. 2019. No. 100. Pp. 226–237.
11. Lamekhova N.V. Functional planning structure of buildings for preschool education [Funktsionalno-planirovochnay struktura zdaniy dlya doshkol'nogo obrazovaniya]. Academic Bulletin of UralNIIproekt RAASN. 2011. No. 3. Pp. 46–52. (rus)
12. Olanrewaju A.L., Abdul-Aziz A.R. Building Maintenance Processes, Principles, Procedures, Practices and Strategies. In book: Building Maintenance Processes and Practices. Singapore Springer. 2015. Pp. 79–129.
13. Chernenko G.N. Formation of the functional and planning structure of modern university libraries [Formirovanie funktsionalnoy I planirovochnoy struktury sovremennykh universitetskikh bibliotek]. Vestnik VolgGASU. Ser.: Construction and Architecture. 2011. No. 23(42) Pp. 180–185. (rus)
14. Kologashkina V.A. Features of the functional and planning organization of multifunctional complexes with integrated business functions [Osobennosti formirovaniya funktsionalno-planirovochnoy organizatsiy mnogofunktsionalnykh kompleksov s integrirovannymi biznes-funktsiyami]. Architecture and Modern Information Technologies. (AMIT) 2013. No. 2 (23) No. article 23/13-11. (rus)
15. Chechel I.P. Formation and development of the functional planning structure of secondary schools of the Belgorod region (1904-2020) [Formirovanie I razvitie funktsionalno-planirovochnoy struktury obzheobrazovatelnykh

shkol Belgorodskoy oblasti (1904–2020 years)]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 7. Pp. 49–65. doi: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-49-65. (rus)

16. Badavi A.A. Features of the organization of functional and planning structure of service areas of small hotels [Osobennosti organizatsiy funktsionalno-planirovochnoy struktury zon servisnogo obsluzhivaniya mal'nykh gostinits]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 10. Pp. 46–57. doi: 10.34031/2071-7318-2021-6-10-46-57. (rus)

17. Town-Planning Code of the Russian Federation No. 190-FZ dated 29.12.2004 (as amended on 01.05.2022): adopted by the State Duma on 22 Dec. 2004: Approved by the Federation Council on 24 Dec. 2004 [Gradostroitelny kodex Rossiyskoy Federatsiy ot 29.12.2004 No. 190-FZ (red. ot 01.05.2022): prinyat Gosudarstvennoy Dumoy 22 dek. 2004 year: odobren Sovetom Federatsiy 24 dek. 2004]. ConsultantPlus: ofic. website. URL:

[http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_327616](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_327616) (accessed 10.06.2022). (rus)

18. Ershova S.A., Mityagin S.D., Osipova N.V. The ratio of elements of functional planning structures of the city [Sootnoshenie elementov funktsional'no-planirovochnoy struktury goroda]. PGS. 2012. No. 2. Pp. 10–12. (rus)

19. Ershova S.A., Mityagin S.D., Osipova N.V. Normalization of the functional and planning structure of populated places [Normirovanie funktsionalno-planirovochnoy struktury naselennykh mest]. PGS 2012. No. 4. Pp. 29–31. (rus)

20. Mityagin S.D. Theoretical and methodological tasks of improving design and urban planning activities [Teoretiko-metodologicheskie zadachi sovershenstvovaniya proektno-gradostroitel'noy deyatel'nosti]. Industrial and civil construction, 2020. No. 1. Pp. 43–47. doi: 10.33622/0869-7019.2020.01.43-47. (rus)

21. Mityagin S.D., Spirin P.P., Gaevskaya Z.A. Theoretical foundations of multi-layered urban planning [Teoreticheskie osnovy mnogoukladnogo gradostroitel'stva]. Fundamental, exploratory and applied research of the RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2020: Collection of scientific works of the RAASN: in 2 volumes. Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. Moscow: Publishing House DIA, 2021. Pp. 303–310. (rus)

22. Shubenkov M.V., Shubenkova M.Yu. Modern city as an anthropogenic-natural system [Sovremenny gorod kak antropogennno-prirodnaya sistema]. Architecture and Modern Information

Technologies (AMIT). 2020. No. 4(53) Pp. 182–190. doi: 10.24411/1998-4839-2020-15311 (rus)

23. Gashenko A.E. Architectural and urban morphology as a subject of systemic research: an elementary aspect [Arkhitekturno-gradostroitel'naya morfologiya kak predmet sistemnykh issledovaniy: elementny aspekt]. Bulletin of Civil Engineers. 2015. № 6 (53). Pp. 5–13. (rus)

24. Enin A.E., Pakhomova V.S. Features of the functional and planning structure of technoparks [Osobennosti funktsional'no-planirovochnoy struktury tekhnoparkov]. Architectural research. 2021. No. 2. Pp. 123–128. (rus)

25. Tyukhtin V.S., Urmantsev Yu.A., Larin Yu.S. et al. System. Symmetry. Harmony [Systema. Simmetriya. Harmoniya]. Edited by V.S. Tyukhtin, Yu.A. Urmantsev. Moscow : Mysl, 1988. 318 p. (rus)

26. Kapra F., Luisi P.L. A systematic view of life: A holistic view [Systemny vzglyad na zhizn': Tzelostnoe predstavlenie]. Trans. from English. Moscow: URSS: LENAND, 2020. 504 p. (rus)

27. Bertalanfi L. background. General theory of systems – overview of problems and results [Obshaya teoriya sistem — obzor problem i rezul'tatov]. In: System Research: Yearbook. Moscow: Nauka, 1969. Pp. 30–52. (rus)

28. Urmantsev Yu.A. Evolutionics, or the General theory of the development of systems of nature, society and thinking [Evolutionika, ili Obshaya teoriya razvitiya sistem prirody, obzhestva i myshleniya]. 3rd ed. Moscow: LENAND, 2020. 240 p. (rus)

29. Urmantsev Yu.A. General theory of systems in an accessible presentation [Obshaya teoriya sistem v dostupnom izlozheniy]. 2nd edition, ispr. Moscow: LENAND, 2021. 400 p. (rus)

30. Lavrik G.I. Methodological foundations of district planning. Introduction to demoeology [Metodologicheskie osnovy rayonnoy planirovki. Vvedenie v demoekologiyu]. Belgorod: V. G. Shukhov BSTU, 2007. 117 p. (rus)

31. Lavrik G.I. Methods of assessing the quality of housing. Research, design, expertise [Metody otzhenki kachestva zhilizha. Issledovanie, proektirovanie, ekspertiza]. Belgorod: V.G. Shukhov BSTU, 2007. 100 p. (rus)

32. Anisimov A.I., Lavrik G.I. Regional town-planning problems and their possible solution [Regionalnye gradostroitel'nye problemy i vozmizhnoe ikh reshenie]. Town-planning. 2010. No. 4. Pp. 15–21. (rus)

33. Vasilenko N.A. Problems of distribution of energy resources at decision-making stages in architectural and urban planning activities. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 4th International Scientific and

Technical Conference on Energy Systems, ICES 2019. Belgorod, December 31–January 1, 2019. Publishing House of the Institute of Physics, 2020. No. 791. No. 012050. doi: 10.1088/1757-899X/791/1/012050

34. Vasilenko N.A. General system principles of the formation of architectural systems 2020. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific and Technical Conference «FarEastCon-2019». IOP Publishing. 2020. vol. 753. No. 032047. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032047

35. Federal Law No. 384-FZ of December 30, 2009 «Technical Regulations on the safety of Buildings and Structures» (with amendments and additions). Ed. Federal Law No. 185-FZ of

02.07.2013 [Federalny zakon ot 30 dekabrya 2009 year No 384-FZ «Tekhnichesky reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy» (s izmeneniyami i dopolneniyami (v red. Federal'nogo zakona ot 02.07.2013 № 185-FZ))]. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102135277>. (rus)

36. Vasilenko N.A., Chernysh N.D. Functional and planning structure of transport buildings and structures on the example of marine passenger terminals [Funktsional'no-planirovochnaya struktura transportnykh zdaniy i sooruzheniy na primere morskikh passazhirskikh terminalov]. Architecture and Modern Information Technologies (AMIT). 2020. No. 3(52). Pp. 58–83. doi: 10.24411/1998-4839-2020-15204. (rus)

#### *Information about the authors*

**Vasilenko, Natalia A.** PhD, Assistant professor. E-mail: [nvasilenko\\_domik@mail.ru](mailto:nvasilenko_domik@mail.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Chernysh, Nadezhda D.** Assistant professor. E-mail: [chernysh-nadejda@yandex.ru](mailto:chernysh-nadejda@yandex.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

*Received 09.09.2022*

#### **Для цитирования:**

Василенко Н.А., Черныш Н.Д. Определение и обоснование функциональной структуры архитектурных объектов на основе системного подхода // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 1. С. 74–88. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-74-88

#### **For citation:**

Vasilenko N.A., Chernysh N.D. Definition and substantiation of architectural objects' functional structure on the basis of system approach. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 1. Pp. 74–88. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-74-88

# ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-89-101

*\*Гребенюк А.А., Смаль Д.В., Давидюк А.С., Пономарёва П.С.**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**\*E-mail: alexander.grebeniuk@mail.ru*

## ПОЛУЧЕНИЕ СМЕШАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЦЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ФЕРРИТНОГО КЛИНКЕРА

**Аннотация.** Рассмотрена возможность применения ферритного клинкера в качестве компонента вяжущих материалов, обладающих специальными эксплуатационными свойствами. Подобные виды цементов способны решить проблемы обеспечения строительной отрасли высокопрочными, стойкими к внешнему агрессивному воздействию и относительно дешевыми вяжущими материалами. Однако механизм твердения и набора прочности цементного камня, полученного при использовании ферритных клинкеров, достаточно сложен и зависит от ряда параметров.

Посредством калориметрического анализа, проведенного при гидратации разработанных специальных вяжущих композиций, установлено, что наибольший тепловой эффект (более 70 %) при гидратации полученного ферритного клинкера с вводом различных добавок (известь и гипсовый камень) достигается до 4 часов с момента затворения вяжущих композиций, что соответствует протеканию индукционного периода гидратации используемого портландцемента, в момент возникновения первичных контактов между кристаллогидратами и достаточной подвижности цементной массы. В данный временной интервал прочность цементного камня недостаточно велика и образующиеся железосодержащие продукты гидратации способны заполнить пространство цементной матрицы, делая ее более плотной и менее дефектной.

Формирование железосодержащих кристаллогидратов из ферритного клинкера может протекать в несколько этапов: гидролиз двухкальциевого феррита в начальной стадии протекания реакции и дальнейшее взаимодействие ее продуктов с портландитом в период от 7 до 14 суток с момента затворения вяжущих составов. Основными кристаллогидратами, формируемыми из ферритного клинкера, являются железосодержащие этtringит и гидрогранат.

Исследование физико-механических характеристик цементного камня показало, что оптимальным содержанием ферритного клинкера в составе вяжущих композиций является 5 %. При данном количестве прочность цементного камня при сжатии и изгибе превышает аналогичные показатели для контрольного образца на 11,5 %. Ввод 15 и 30 % ферритного клинкера в состав специальных вяжущих композиций снижает прочностные характеристики на 15–20 %.

**Ключевые слова:** ферритный клинкер, сребродолскит, специальные вяжущие композиции, гидратация, прочностные характеристики, цементный камень.

**Введение.** Ускорение темпов роста строительства в Российской Федерации, инициированных государственной поддержкой строительной отрасли и обусловленных заменой устаревшего жилищного фонда, во многом предопределяет возросшие объемы потребления различного рода материалов и, как следствие, увеличение количества их производства [1]. На сегодняшний день одним из основных видов используемых материалов при сооружении зданий является портландцемент. Технологический процесс производства данного вяжущего материала достаточно энерго- и ресурсозатратен и предполагает большие объемы потребления полезных ископаемых.

Повышения эффективности производства и снижения удельной себестоимости цемента возможно добиться посредством применения различных природных и техногенных материалов как в качестве компонента самого цемента, так и

в качестве вторичных материалов в составе сырьевой смеси для получения клинкера надлежащего состава [2]. В роли таких материалов могут выступать металлургические шлаки, золы, белитовые шламы, глиежи, известняки и др. (согласно ГОСТ 31108-2020). Так, присутствие в составе обжигаемой сырьевой смеси шлака способно повысить ее реакционную способность, уменьшить выбросы парниковых газов в атмосферу и снизить удельный расход условного топлива [3, 4], но применение шлаков в качестве компонента цементов, вследствие непостоянства минералогического состава, может оказать неоднозначное влияние на физико-химические показатели цементного камня, как увеличивая его прочность, так и наоборот, привести к ее снижению [5–8].

Присутствие в составе цемента компонентов-заменителей клинкера, хоть и снижает общую себестоимость вяжущего материала, но спо-

собно при превышении оптимальной концентрации оказать влияние на его качество: повлиять на скорость набора прочности на ранних этапах твердения, либо привести к ее снижению в поздние сроки (28 суток и более), а также повлиять на стойкость цементного камня при воздействии на него агрессивных сред [9–11].

Применение специальных вяжущих материалов, полученных при меньших температурах обжига по сравнению с портландцементным клинкером, способно решить проблемы, связанные с энерго- и ресурсосбережением, экологическим воздействием на окружающую среду, а также обеспечить увеличение ассортимента вяжущих материалов, устойчивых к воздействию внешних агрессивных факторов и обладающих достаточно высокими физико-механическими характеристиками [12–14]. Одним из представителей данного вида материалов является ферритный клинкер. Данный вид клинкера является основным компонентом специальных вяжущих материалов, которые применяются при строительстве транспортных сооружений, автодорог и аэродромов, морских плотин и доков, гидроэлектростанций, тампонировании нефтегазовых скважин, а также во многих других областях строительства. Температура получения ферритных клинкеров находится в пределах от 1270 до 1350 °С и может изменяться в зависимости от состава обжигаемой смеси. Применение различных разновидностей железистых клинкеров как самостоятельного вяжущего материала, так и в качестве специального компонента к цементу, способно обеспечить выпуск целого ряда вяжущих материалов, обладающих специальными свойствами [15–17].

Механизм твердения ферритных фаз в составе цементов весьма неоднозначен. Во многом состав продуктов гидратации определяется водородным показателем среды протекания реакций. Гидратация высокожелезистого цемента в разные сроки сопровождается образованием таких кристаллогидратов, как  $C_2FH_5$ ,  $C_4FH_{14}$ ,  $Fe(OH)_3$ ,  $C_3FH_6$ , а также  $C_2FH_8$ , формирование которых зависит от концентрации извести в растворе [18, 19]. Присутствие в составе железистого цемента силикатных, сульфатных и других фаз определяет образование таких кристаллогидратов, как  $C_3FSH_4$ ,  $C_3F \cdot (CS)_3 \cdot H_{32}$  и  $C_3F \cdot CS \cdot H_{12}$  в зависимости от условий протекания реакции, сроков твердения и набора прочности цементного камня [20–24]. Применение ферритных клинкеров в качестве специальной добавки к портландцементу может изменить ход протекания гидратации вяжущего материала. Так, первоначальным кристаллогидратом при гидратации обогащенного

железосодержащими фазами цемента является железистый эттрингит, который в дальнейшем переходит в гидрогранаты [25–27].

Цель исследовательской работы заключалась в установлении возможности применения ферритных клинкеров в качестве компонента специальных вяжущих материалов, а также определении особенностей гидратации и твердения цементного камня на их основе.

**Методы и материалы.** При проведении исследовательской работы использовался ряд физико-химических и физико-механических методов анализа, среди которых рентгенофлуоресцентная спектроскопия, рентгенофазовый и калориметрический методы анализа, определение прочности образцов композиционных вяжущих материалов при сжатии и изгибе, а также установление модуля упругости цементного камня в разные сроки твердения и набора прочности посредством измерения скорости прохождения через него ультразвука.

Определение химического состава используемых материалов осуществлялось посредством пересчета их элементарного состава, полученного на рентгенофлуоресцентном спектрометре серии ARL 9900 WorkStation. Фазовый состав продуктов гидратации специальных вяжущих композиций в разные сроки твердения, а также компонентов, входящих в состав этих композиций, устанавливали на дифрактометре ARL X'TRA Thermo Fisher Scientific при помощи порошковой рентгеновской дифракции в диапазоне двойных углов 4°–64°. Расшифровка спектров рентгенограмм производилась при использовании международной базы данных International Centre for Diffraction Data.

Оценка гидратационной активности портландцемента и ключевого компонента полученных специальных вяжущих композиций – ферритного клинкера, давалась на основе результатов калориметрического анализа. Измерение величины тепловыделения после затворения различных составов ферритного клинкера производили на приборе ToniCAL Trio на протяжении 72 часов с последующим построением зависимости скорости тепловыделения гидратируемых образцов от времени.

Прочность цементного камня, полученного после затворения вяжущих композиций водой, определяли в 2-х, 7-ми и 28-суточном возрасте на гидравлическом прессе ПМ-30МГ4 «СКБ Стройприбор» при испытании на сжатие и изгиб. Размер образцов-кубиков и балочек составлял 1,41×1,41×1,41 см и 1,0×1,0×6,0 см при определении прочности при сжатии и изгибе соответственно.

Косвенную оценку плотности твердеющих образцов цементного камня из составленных специальных вяжущих композиций давали при помощи пропускания ультразвука через образце-балочку с замером скорости его прохождения. После измерения скорости распространения ультразвука в образце производили расчет модуля упругости цементного камня.

В рамках проведения исследовательской работы составлялись специальные вяжущие композиции, в состав которых входили: ферритный клинкер, портландцемент, зола-уноса и известь. Были сформированы составы с разным соотношением этих компонентов. При необходимости используемые материалы перед проведением соответствующих испытаний истирались до прохождения через сито № 008. Удельная поверхность портландцемента составляла 370 м<sup>2</sup>/кг, а ферритного клинкера, золы-уноса и извести – 420 м<sup>2</sup>/кг.

Основной компонент, придающий особые свойства составляемым вяжущим, ферритный клинкер, получали путем обжига сырьевой смеси, ориентированной на его получение, в высокотемпературной лабораторной силитовой печи с карбид-кремневыми нагревателями при 1350 °С и изотермической выдержке в течение 25 минут. Сырьевыми материалами для получения ферритного клинкера выступали: известняк Михайловского карьера (Свердловская обл.), железорудные окатыши Качканарского горно-обогатительного комбината (Свердловская обл.), зола-уноса ТЭЦ (Смоленская обл.), которые смешивались в соотношении 62,74 %, 32,15 % и 1,11 %, соответственно для каждого из компонентов. Данные пропорции материалов соответствуют получению сребродолскита и алита в ферритном

клинкере. Полученная сырьевая смесь формовалась на гидравлическом прессе под давлением 2,0 МПа.

Применяемый при оценке гидратационной активности ферритного клинкера, гипсовый камень Новомосковского месторождения был преимущественно представлен оксидами кальция и серы с незначительным количеством примесных оксидов, суммарное содержание которых не превышало 2,5 %. Основными идентифицированными минералами гипсового камня были двуводный гипс и незначительное количество кальцита.

Портландцемент, входящий в состав специальных вяжущих материалов, был произведен на АО «Пикалевский цемент» и соответствовал ЦЕМ 0 42,5 Н. Известь, присутствующая в составе, была получена из известняка Михайловского карьера посредством обжига в лабораторной силитовой печи при 1000 °С в течение одного часа. Активность извести составила 89,6 %, время гашения 3,5 минуты при максимальной температуре равной 76,6 °С. Зола-уноса представляет собой тонкодисперсный материал с размером частиц от 3 до 66 мкм с преобладающим размером 15–25 мкм. Химический состав компонентов, входящих в вяжущие композиции, представлен в таблице 1. Наличие в химическом составе портландцемента щелочей может оказать влияние на сроки твердения портландцементного теста и способствовать быстрому набору прочности в ранние сроки гидратации, но несколько уменьшить прочностные характеристики в поздние сроки (28 суток и более). Присутствующие в составе золы-уноса потери при прокаливании равные 1,82 %, связаны с наличием органической составляющей несгоревшей на ТЭЦ.

Таблица 1

## Химический состав компонентов вяжущих композиций

Компонент вяжущих композиций	Содержание оксидов, %								
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	R <sub>2</sub> O	Прочие	ППП
Ферритный клинкер	48,53	6,13	2,76	40,38	0,09	1,33	0,63	0,15	0,00
Портландцемент (ПЦ)	63,06	20,23	4,69	2,94	2,96	1,80	1,54	1,55	1,22
Зола-уноса	7,48	59,04	19,81	9,30	0,61	1,11	0,71	0,12	1,82
Известь	98,85	0,73	0,37	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Установление фактического минералогического состава используемых компонентов вяжущих произвели методом порошковой дифрактометрии (рис. 1). Синтезированный ферритный клинкер включал в себя фазы сребродолскита, белита, майенита и некоторое количество извести, содержание которой уточнилось посредством этил-глицератного анализа и составило 5,8 %. Наличие фазы алита на рентгенограмме зафиксировано не было (рис. 1, а). Фазовый состав портландцемента был представлен основными

клинкерными минералами (алитом, белитом, трехкальциевым алюминатом и браунмиллеритом), а также некоторым количеством периклаза, извести и регулятора сроков схватывания – гипсовым камнем (рис. 1, б). В состав золы-уноса входили такие фазы, как β-кварц, силиманит, магнетит, трехкальциевый алюминат, шпинель и графит (рис. 1, в). Обожженный известняк (рис. 1, г) преимущественно состоял из извести, портландита и кальцита, а также включал примеси бе-

лита и трехкальциевого алюмината, которые, вероятно, сформировались после диссоциации глинистых соединений. Количественный расчет фа-

зового состава используемых компонентов методом Ритвельда показал превалирование целевых фаз, необходимых для получения специальных вяжущих композиций.

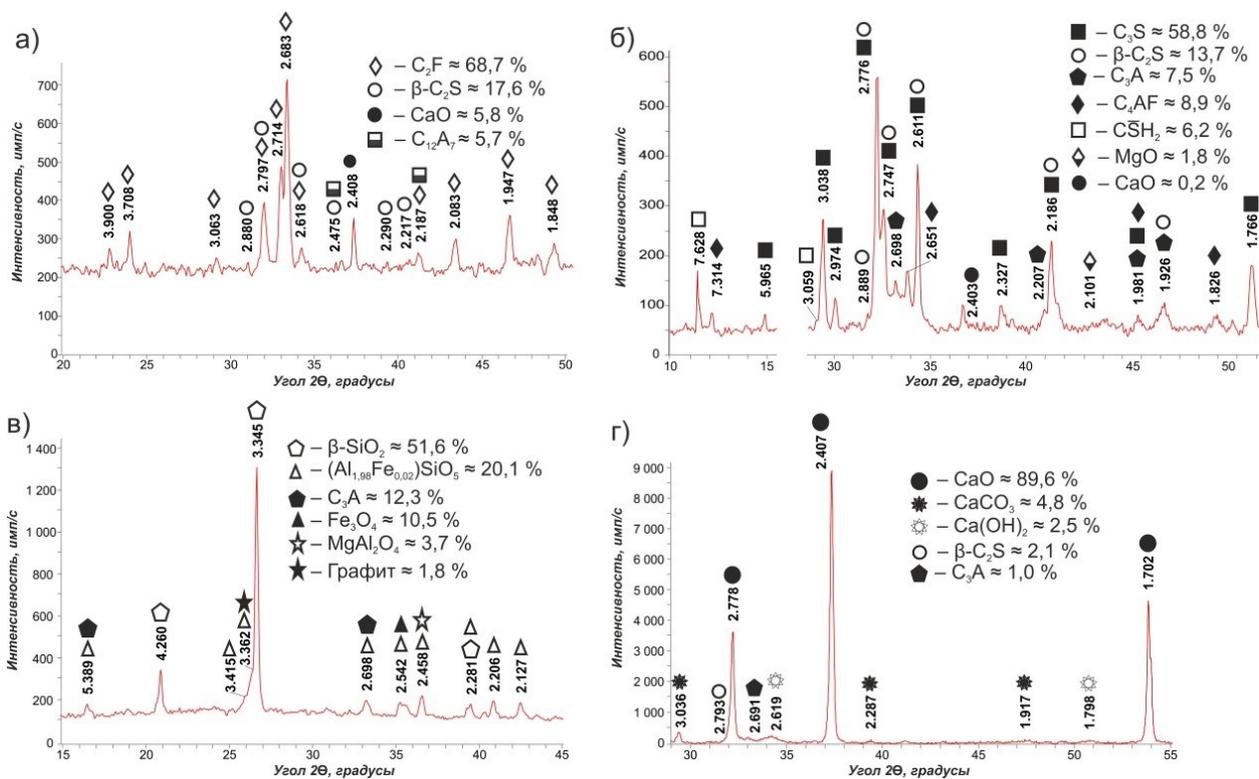


Рис. 1. Рентгенограммы компонентов вяжущих композиций:  
а) ферритный клинкер; б) портландцемент; в) зола-уноса; г) известь

**Основная часть.** В процессе формирования железосодержащих кристаллогидратов при гидратации ферритного клинкера возможно изменение его гидратационной активности за счет присутствия в составе гидратируемого материала извести, что в начальные сроки обеспечит перенасыщение раствора оксидом кальция (концентрация извести в растворе более 1,06 г/л) и позволит на данном этапе формироваться гексагональному гидроферриту кальция ( $C_4FH_{14}$ ), а также железистому гелю ( $Fe(OH)_3$ ). В последующие периоды гидратации железистый гель взаимодействует с  $Ca(OH)_2$ , приводя к снижению концентрации извести в растворе ниже 1,06 г/л, вследствие чего произойдет перестройка гексагональной формы гидроферрита кальция в кубическую ( $C_3FH_6$ ) [18]. Гипсовый камень в составе специальных железистых вяжущих материалов способствует замедлению гидратации ферритного клинкера и обеспечивает в первые сроки гидратации формирование железозамещенного этtringита. В качестве исследуемых смесей были рассмотрены следующие варианты: портландцемент, ферритный клинкер, ферритный клинкер с добавлением 10 % негашеной извести, ферритный клинкер с добавлением

25 % гипсового камня. Дифференциальная и интегральная кривые тепловыделения рассматриваемых составов представлены на рисунке 2.

Изменение интенсивности тепловыделения гидратируемых составов с течением времени обусловлено протеканием взаимосвязанных процессов, в результате которых происходит образование кристаллогидратов из клинкерных минералов и формирование структуры цементного камня. Движущей силой гидратации цемента можно считать протекание процессов диспергирования твердой фазы, гидратации клинкерных минералов, сопровождающейся первоначальным формированием коагуляционной структуры с дальнейшим ее переходом в кристаллизационную структуру цементного камня [28]. В первоначальный период гидратации образуются нанодисперстные частицы высокой удельной поверхности, при этом свободная поверхностная энергия твердой фазы уменьшается и выделяется теплота смачивания. Максимальный тепловой эффект адсорбционной стадии гидратации наблюдается у состава ферритного клинкера с 10 % ввода извести. Первоначальная гидратация извести, присутствующей в данном исследуемом об-

разце, является энергетическим толчком к дальнейшему взаимодействию фазы двухкальцевого феррита с водой: количество выделившейся тепловой энергии в первые сроки протекания реакции составляет порядка 100 Дж/г, что эквивалентно 70 % от общего количества выделившегося тепла у этого состава. В последующие сроки изменение скорости тепловыделения носит линейный характер и достигает 140 Дж/г. Аналогичная зависимость характера тепловыделения наблюдается и у состава, представленного ферритным клинкером, однако, максимальный тепловой эффект адсорбционной стадии протекания гидратации у него сравнительно ниже, что связано с меньшим содержанием свободной извести

в исследуемом образце (5,8 %). Большая часть тепловой энергии у ферритного клинкера выделяется на первом этапе взаимодействия (более 87 %). Ввод гипсового камня в состав с ферритным клинкером замедляет протекание реакции гидратации, снижает скорость тепловыделения при первичном взаимодействии твердой фазы с водой (~50 Дж/г·ч), а также обеспечивает появление индукционного периода протекания реакции (около 30 минут). Однако, несмотря на снижение процентного содержания ферритного клинкера в этом составе, общее количество выделившегося тепла сопоставимо с составом, представленным только ферритным клинкером.

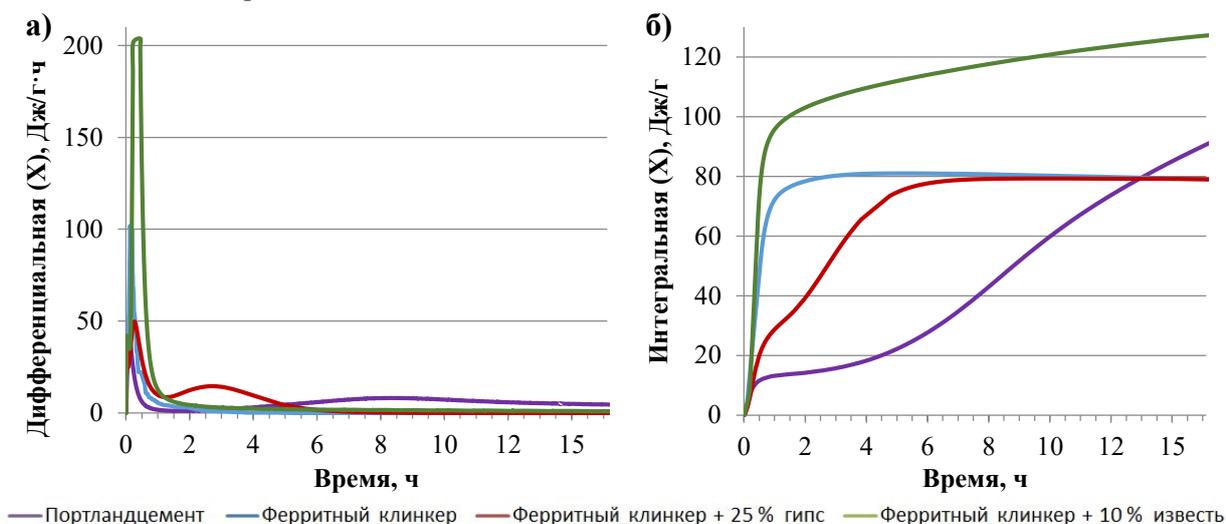


Рис. 2. Изменение количества выделившегося тепла вяжущих составов в начальные сроки: а) дифференциальное изменение тепловыделения; б) интегральное изменение тепловыделения

Получение цементного камня с высокими эксплуатационными характеристиками возможно добиться посредством увеличения его плотности на этапе формирования структуры в период схватывания цементного теста. Согласно дифференциальной кривой тепловыделения используемого портландцемента (рис. 2, а) окончание схватывания происходит около 8,5 часов от момента его затворения. Моделируемые условия гидратации ферритного клинкера в составе специальных вяжущих материалов обеспечивают основной объем протекания реакции в период схватывания портландцемента. Продукты гидратации железистых клинкерных минералов, заполняя поровое пространство формирующегося каркаса цементного камня, будут способствовать росту прочности и увеличению водонепроницаемости цементного камня в отдаленные сроки.

Установление влияния количества ввода синтезированного ферритного клинкера в специальные вяжущие композиции на их характеристики производили посредством испытания 5 со-

ставов вяжущих композиций. В качестве контрольного состава был принят цемент АО «Пикалевский цемент». Составы ВК I, ВК II, ВК III и ВК IV включали в себя 7 % золы-уноса, 1,5 % извести и разное количество ферритного клинкера: в состав ВК I ферритный клинкер не добавлялся, а в вяжущих композициях ВК II, ВК III и ВК IV его количество составляло 5, 15 и 30 % соответственно. Компонентный состав специальных вяжущих композиций приведен в таблице 2.

Процесс твердения и набора прочности цементного камня сопровождается формированием разного рода кристаллогидратов. Согласно проведенным исследованиям фазового состава цементного камня методом порошковой дифрактометрии, первичными продуктами гидратации в возрасте 2 суток для всех исследуемых образцов являются портландит ( $d = 4,92; 3,12; 2,63 \text{ \AA}$ ), этрингит ( $d = 9,82; 5,64 \text{ \AA}$ ), а также низкоосновные гидросиликаты кальция тоберморитового ряда со скрытокристаллической структурой, о чем свиде-

тельствует аморфная область дифракционных отражений в диапазоне двойных углов от  $2\theta$  до  $35^\circ$ . Присутствие в специальных вяжущих композициях ферритного клинкера обеспечивает формирование в начальные сроки железозамещенного этtringита

( $d = 9,77; 5,62 \text{ \AA}$ ). Помимо продуктов гидратации на рентгенограммах идентифицированы не вступившие в реакцию фазы алита ( $d = 3,03; 2,78; 2,61$

$\text{\AA}$ ), белита ( $d = 2,88; 2,78; 2,75 \text{ \AA}$ ), браунмиллерита ( $d = 7,40; 2,64; 1,92 \text{ \AA}$ ), сребродолскита ( $d = 7,43; 3,90; 2,68; 1,94 \text{ \AA}$ ) и  $\beta$ -кварца ( $d = 3,36 \text{ \AA}$ ), количество которых с течением времени сокращается и увеличивается содержание продуктов гидратации на их основе, что подтверждается изменением интенсивности дифракционных отражений данных фаз: снижением интенсивности исходных компонентов и ее увеличением у продуктов реакции.

Таблица 2

### Состав ферритных вяжущих композиций

Вяжущая композиция	Содержание компонентов, %			
	ПЦ	Ферритный клинкер	Зола-уноса	Известь
ПЦ	100,00	–	–	–
ВК I	91,50	–	7,00	1,5
ВК II	86,50	5,00		
ВК III	76,50	15,00		
ВК IV	61,50	30,00		

Непрерывное увеличение количества портландита в составе гидратируемых образцов происходит до 7 суток. В интервале времени от 7 до 14 суток зафиксировано снижение интенсивности дифракционных отражений  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в составах, содержащих ферритный клинкер: в составе ВК II интенсивность рефлекса  $d = 4,93 \text{ \AA}$  уменьшается на 15 %; в составе ВК III – на 20,6 %, а в ВК IV – на 21,2 %. Уменьшение количества портландита, сопровождающееся увеличением интенсивностей аморфной области на дифрактограммах в диапазоне двойных углов от  $27^\circ$  до  $32^\circ$ , что может быть связано с взаимодействием  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с железосодержащими фазами в гидратируемых образцах ВК II, ВК III и ВК IV.

Фазовый состав цементного камня в 28-ми суточном возрасте (рис. 3) представлен портландитом ( $d = 4,92; 3,12; 2,63 \text{ \AA}$ ), низкоосновными гидросиликатами кальция тоберморитового ряда ( $d = 3,04; 2,78; 1,82 \text{ \AA}$ ), этtringитом и его железозамещенным аналогом  $(\text{C}_3\text{A} \cdot (\text{C}\bar{\text{S}})_3 \cdot \text{H}_{32})$  ( $d = 9,82; 5,65 \text{ \AA}$ ) и  $\text{C}_3\text{F} \cdot (\text{C}\bar{\text{S}})_3 \cdot \text{H}_{32}$  ( $d = 9,77; 5,62 \text{ \AA}$ ) и гидрогранатами сложного состава  $\text{C}_x\text{F}_d\text{A}_{(1-d)}\text{S}_y\text{H}_z$  ( $d = 2,97; 2,71 \text{ \AA}$ ). В этом возрасте также имеется значительное количество непрореагировавших минералов: сребродолскита, браунмиллерита, белита и  $\beta$ -кварца. Присутствие ферритной фазы в составе специальных вяжущих композиций оказывает влияние на их гидратацию. Так, увеличение количества сребродолскита в образцах способствует интенсификации гидратации силикатных фаз ( $\beta\text{-C}_2\text{S}$  и  $\beta\text{-SiO}_2$ ), а

также сказывается на количестве и разновидности формируемого этtringита, что связано с ограниченным количеством сульфатной фазы в составе. Дифракционные отражения характерные для этtringита в составах ВК II, ВК III и ВК IV снижают свою интенсивность и увеличивают полуширину своих рефлексов: для основного дифракционного отражения данной фазы ( $d = 9,82 \text{ \AA}$ ) полуширина меняется от  $0,2513^\circ$  до  $0,5500^\circ$ .

Исследование прочностных характеристик, разработанных специальных вяжущих материалов (рис. 4) установило эффективность их применения в ограниченном количестве. Так, определение прочности при сжатии (рис. 4, а) в возрасте 2 суток показало существенное снижение данной характеристики для составов ВК III и ВК IV (~34 %). Образец с добавлением 5 % ферритного клинкера в данном возрасте показал сопоставимые результаты с контрольным составом (разница не превышала 2,5 %). Составы вяжущих материалов ВК III и ВК IV в последующие сроки проведения испытаний определения прочности при сжатии уступали контрольному составу, однако, это отставание с увеличением времени твердения снижалось: для состава ВК III прочность при сжатии в 7-ми суточном возрасте была ниже на 25 %, а в 28-ми суточном – на 14,8 %; для состава ВК IV отставание в прочности при сжатии составляло 10,5 и 6,5 %, соответственно, для 7-ми и 28-ми суточного возраста. Прочность экспериментальных образцов цементного камня ВК I и ВК II в 7-ми и 28-ми суточном возрасте была выше, чем у контрольного состава на 5–7 МПа (~ 8,2 -11,5 %).

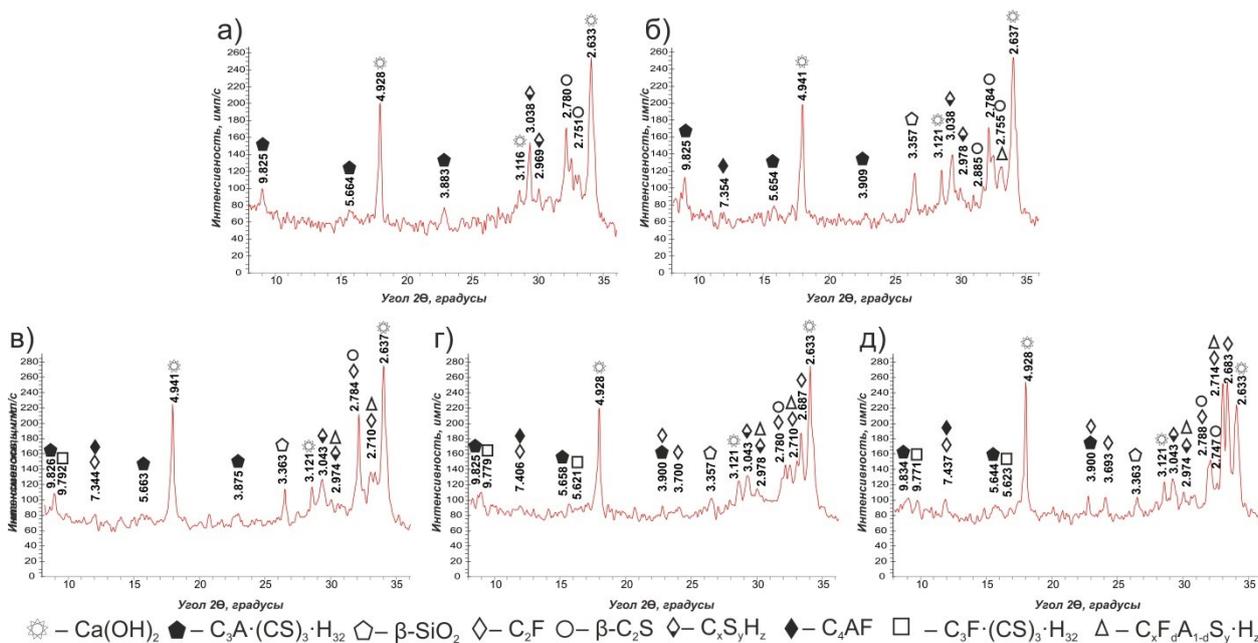


Рис. 3. Рентгенограммы продуктов гидратации вязущих композиционных материалов в 28 суточном возрасте: а) ПЦ; б) ВК I; в) ВК II; г) ВК III; д) ВК IV

Определение прочности при изгибе показало эффективность ввода ферритного клинкера в специальную вязущую композицию в количестве 5 %, что подтверждается увеличением данной характеристики от 4,7 до 9,1 % для 2-х и 28-ми суточного возраста, соответственно, по сравнению с образцом из портландцемента (рис. 4, б). Повышение количества железистого

клинкера в составе до 15 % обеспечивает незначительный прирост прочности относительно контрольного образца в 2-х и 7-ми суточном возрасте (4,7 и 8,3 %) и сопоставимую с ним прочность в марочном возрасте. Образец с 30 % ферритного клинкера в начальные и в конечные сроки твердения имел существенно меньшую прочность при изгибе (9,5 и 12,1 %).

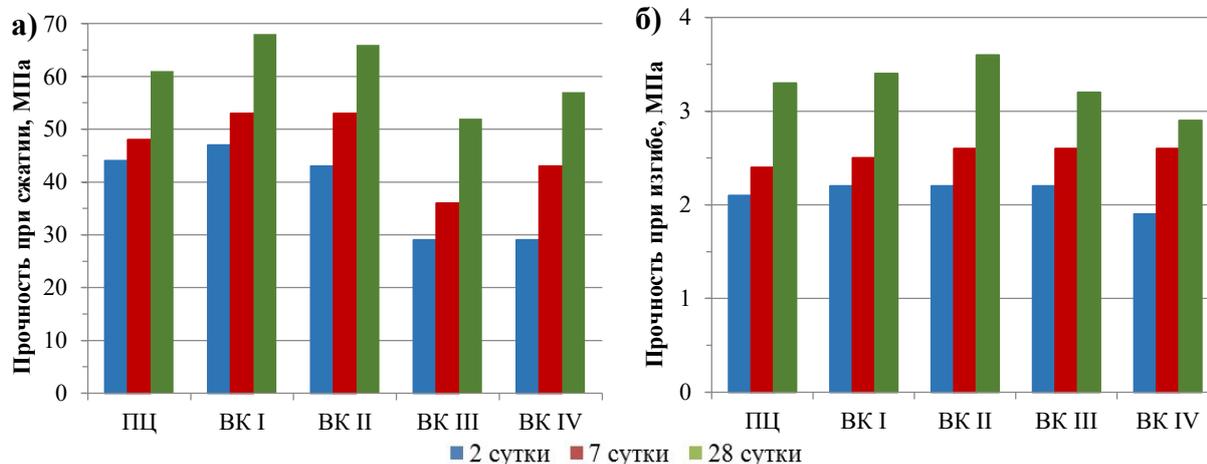


Рис. 4. Прочностные характеристики вязущих композиционных материалов: а) прочность при сжатии; б) прочность при изгибе

Полученные результаты физико-механических характеристик специальных вязущих композиций связаны с процессами структурообразования цементного камня в присутствии повышенного содержания железистой фазы. Формирование железосодержащих кристаллогидратов, в отличие от остальных гидратных фаз, происходит в поровом пространстве цементного камня,

увеличивая, тем самым, его плотность и количество «контактов» между кристаллогидратами [29]. Об этом обстоятельстве косвенно свидетельствует некоторое увеличение прочности при изгибе, которая непосредственно связана с межмолекулярным взаимодействием между кристаллогидратами. Повышенное содержание ферритного клинкера в твердеющем цементном камне приводит к снижению его прочности вследствие

замедления протекания гидратации железосодержащей фазы после образования на ее поверхности плотного железистого геля, препятствующего диффузии во внутренние слои частицы.

Установление влияния присутствия ферритного клинкера в составе специальных вяжущих композиций на плотность структуры цементного

камня и общее количество контактов между кристаллогидратами в нем, производили посредством пропускания ультразвука через гидратированные образцы исследуемых цементов в разные сроки твердения и набора прочности. По результатам замеров скорости распространения ультразвука производили вычисление модуля упругости цементного камня (рис. 5).

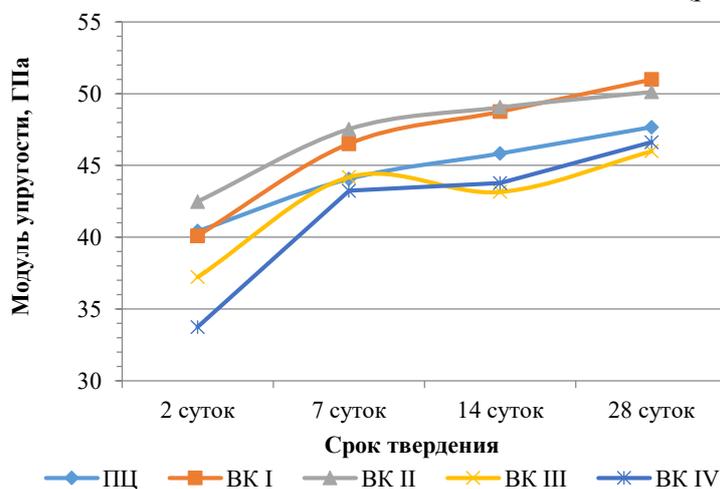


Рис. 5. Изменение модуля упругости цементного камня из вяжущих композиций с течением времени

Изменение величины модуля упругости цементного камня в процессе его твердения и набора прочности во многом зависит от компонентного состава специальных цементов. Так, составы ВК I и ВК II на протяжении всех сроков измерений показали результаты, превышающие значения модуля Юнга для контрольного образца на 5,1–7,9 % (на 2–3,5 ГПа). Исключением стал замер, произведенный в 2-х суточном возрасте состава ВК I (значение модуля Юнга на 0,8 % ниже, чем у контрольного), что может быть связано со скоростью пуццолановой реакции в этом составе. Добавление 15 и 30 % ферритного клинкера в состав специальных вяжущих композиций приводит к снижению модуля упругости цементного камня во все сроки твердения относительно контрольного образца. Однако, наблюдается уменьшение величины отклонения данной характеристики с течением времени, которое может быть связано с кристаллизацией железистого геля, заполняющего свободное пространство цементной матрицы, после его взаимодействия с портландитом и формированием гидроферритов кальция различной основности.

#### Выводы.

1. Наибольший тепловой эффект (более 70 %) при гидратации полученного ферритного клинкера с вводом различных добавок (известь и гипсовый камень) достигается до 4 часов с момента затворения вяжущих композиций, что соответствует протеканию индукционного периода гидратации используемого портландцемента, в момент возникновения первичных контактов

между кристаллогидратами и достаточной подвижности цементной массы (окончание схватывания происходит около 8,5 часов с момента затворения). В данный временной интервал прочность цементного камня незначительна и образующиеся железосодержащие продукты гидратации способны заполнить пространство цементной матрицы, делая ее более плотной и менее дефектной.

2. Формирование железосодержащих кристаллогидратов из ферритного клинкера может протекать в несколько этапов: гидролиз двухкальциевого феррита в начальной стадии протекания реакции и дальнейшее взаимодействие ее продуктов с портландитом. Вторая стадия протекания реакций формирования железосодержащих кристаллогидратов приходится на временной интервал от 7 до 14 суток, о чем свидетельствует уменьшение интенсивности дифракционных отражений  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в составах, содержащих ферритный клинкер (до 21 %) и возрастание рефлексов аморфной области на дифрактограммах в диапазоне двойных углов от  $27^\circ$  до  $32^\circ$ .

3. Добавление ферритного клинкера в состав специальных вяжущих композиций изменяет как качественный, так и количественный состав цементного камня. При добавлении ферритного клинкера ввиду нехватки сульфата кальция для образования двух эттрингитоподобных фаз,  $\text{C}_3\text{A} \cdot (\text{C}\bar{\text{S}})_3 \cdot \text{H}_{32}$  и  $\text{C}_3\text{F} \cdot (\text{C}\bar{\text{S}})_3 \cdot \text{H}_{32}$ , количество первой снижается и образуется ее железозамещенный аналог –  $\text{C}_3\text{F} \cdot (\text{C}\bar{\text{S}})_3 \cdot \text{H}_{32}$ , при этом снижается ин-

тенсивность дифракционных отражений эттрингита и увеличивается их полуширина приблизительно в 2,18 раза (с  $0,2513^\circ$  до  $0,5500^\circ$ ). Помимо эттрингитоподобной фазы, основной компонент ферритного клинкера – сребродолскит, в составе специальных вяжущих композиций формирует железистый гидрогранат состава  $C_xF_dA_{(1-d)}S_yH_z$ .

4. Влияние ферритного клинкера на прочностные характеристики цементного камня оказывает положительный эффект при его содержании порядка 5 %. При данном количестве ферритного клинкера цементный камень обладает сопоставимой с контрольным образцом прочностью в начальные сроки твердения и превышает ее в дальнейшем на 11,5 %. Содержание 15 и 30 % ферритного клинкера не обеспечивают сопоставимые с контрольным составом результаты физико-механических испытаний: в возрасте 28-ми суток прочность цементного камня ниже контрольного состава на 14,8 и 6,5 % соответственно для содержания 15 и 30 % ферритного клинкера в составе вяжущих композиций.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постановление Правительства РФ от 23.04.2020 г. № 566 «Об утверждении Правил возмещения кредитным и иным организациям недополученных доходов по жилищным (ипотечным) кредитам (займам), выданным гражданам Российской Федерации в 2020 году» // Собрание законодательства РФ. 27.04.2020. №17. С. 2805.
2. Борисов И.Н., Мануйлов В.Е. Энерго- и ресурсосбережение в производстве цемента при комплексном использовании техногенных материалов // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2009. № 6 (12). С. 50–58.
3. Текучева Е.В., Кудрявцев В.П., Классен В.К. Эффективность замены железосодержащего компонента цементной сырьевой смеси отвальным шлаком оскольского электрометаллургического комбината // Техника и технология силикатов. 2010. Т. 17. № 2. С. 22–26.
4. Козубская Т.Г. Использование техногенных отходов в производстве строительных материалов // Строительные материалы. 2002. №2. С. 10.
5. Сивков С.П., Турушева Е.В., Мошковская С.В., Крылов А.П. Использование металлургических шлаков в качестве минеральной добавки при производстве цемента // Цемент и его применение. 2022. № 2. С. 64–66.
6. Капустин Ф.Л., Афанасьева М.А. Использование медеплавильного шлака в производстве цемента общестроительного назначения // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2013. № 3 (30). С. 52–58.
7. Эренберг А. Свойства цемента, содержащих хранившийся гранулированный доменный шлак // Цемент и его применение. 2013. № 6. С. 34–38.
8. Шилова И.А. Энергосбережение и повышение качества цементного клинкера с использованием шлако-мело-известковой смеси // Успехи в химии и химической технологии. 2008. Т. 22. № 7 (87). С. 63–68.
9. Краснобаева С.А., Медведева И.Н., Брыков А.С., Стафеева З.В. Свойства материалов на основе портландцемента с добавкой метакрилатов МКЖЛ // Цемент и его применение. 2015. № 1. С. 50–55.
10. Айменов Ж.Т., Айменов А.Ж., Сарсенбаев Н.Б., Сарсенбаев Б.К. Получение композиционных цемента на основе техногенных отходов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2021. Т. 17. № 1 (23). С. 38–45.
11. Ковалёва И.Е., Панина Н.С., Гольшева М.Н., Шутова А.В., Незнамова С.Г. Цементы повышенной стойкости к карбонатной агрессии // Технологии бетонов. 2011. № 9–10 (62–63). С. 27–29.
12. Krivoborodov Y., Samchenko S. Composite binders for fastening high temperature wells // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". 2020. 042011.
13. Krivoborodov Y.R., Kuznetsova T.V., Samchenko S.V. Refractory concrete based on high-alumina cement and clinker filler // Refractories and Industrial Ceramics. 2021. Vol. 62. № 2. Pp. 153–156.
14. Yastrebinskii R.N. Attenuation of neutron and gamma radiation by a composite material based on modified titanium hydride with a varied boron content // Russian Physics Journal. 2018. Vol. 60. № 12. Pp. 2164–2168.
15. Зорин Д.А., Хомуцаев А.В. Эффективность применения сульфферритных цемента в строительстве // Техника и технология силикатов. 2018. Т. 25. № 2. С. 39–43.
16. Borisov I.N., Grebeniuk A.A., Dyukareva V.I. Combined cements with non-shrinking properties using sulfoferrite clinker // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018012011.
17. Осокин А.П., Энтин З.Б., Пушкарев И.С. Технология получения и свойства особокоррозионностойкого цемента // Цемент и его применение. 2001. № 6. С. 17–19.
18. Тихонов В.А., Клименко З.Г., Береженко Е.Т., Жаворонкова Е.В. Специальные высокожелезистые цементы // Труды VI Международного конгресса по химии цемента. М., 1976. Т. III. С. 154–156.

19. Рахимбаев Ш.М., Оноприенко Н.Н., Рахимбаев И.Ш. Термодинамический анализ процессов гидратации алюмоферрита кальция // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 3. С. 82–88. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-82-88.
20. Кузнецова Т.В., Бурьгин И.В. Гидратация утяжеленного тампонажного цемента // Техника и технология силикатов. 2010. Т. 17. № 3. С. 29–32.
21. Борисов И.Н., Гребенюк А.А. Особенности гидратации и набора прочности сульфатно-ферритных клинкеров и специальных цементов на их основе // Цемент и его применение. 2019. № 3. С. 88–91.
22. Лотенбах Б., Дильнеза Б.Ц., Виланд Е. Пути превращения железа при гидратации цементов // Цемент и его применение. 2013. №1. С. 42–49.
23. Dilnesa B. Z., Lothenbach B., Renaudin G., Wichser A., Wieland E. Stability of Monosulfate in the presence of iron // Journal of the American Ceramic Society. 2012. Vol. 95. № 10. Pp. 3305–3316.
24. Renaudin G., Mesbah A., Zeleke Dilnesa B., Francois M., Lothenbach B. Crystal chemistry of iron containing cementitious AFm layered hydrates // Current Inorganic Chemistry. 2015. № 5. Pp. 184–193.
25. Elakneswaran Y., Noguchi N., Matumoto K., Morinaga Y., Chabayashi T., Kato H., Nawa T. Characteristics of Ferrite-Rich Portland Cement: Comparison With Ordinary Portland Cement // Frontiers in Materials. 2019. doi:10.3389/fmats.2019.00097.
26. Dilnesa B. Z., Wieland E., Lothenbach B., Dahn R., Scrivener K. L. Fe-containing phases in hydrated cements // Cement and Concrete Research. 2014. Vol. 58. Pp. 45–55.
27. Vespa M., Wieland E., Dähn R., Lothenbach B. Identification of the thermodynamically stable Fe-containing phase in aged cement pastes // Journal of the American Ceramic Society. 2015. Vol. 98. №7. Pp. 2286–2294.
28. Лотов В.А. Движущая сила процессов гидратации и твердения цемента // Техника и технология силикатов. 2011. Т.18. №4. С. 23–27.
29. Брыков А.С., Анисимова А.В., Розенкова Н.С., Мокеев М.В. Сравнительное исследование сульфатов железа (III) и алюминия в качестве ингибиторов щелоче-кремнеземных реакций // Цемент и его применение. 2015. №5. С. 50–55.

#### Информация об авторах

**Гребенюк Александр Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: alexander.grebeniuk@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Смаль Дмитрий Викторович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: doc\_cdv@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Давидюк Алина Сергеевна**, магистрант кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: davidyuk-alina@outlook.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Пономарёва Полина Сергеевна**, студент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: polina.ponomarva.04@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 07.11.2022 г.

© Гребенюк А.А., Смаль Д.В., Давидюк А.С., Пономарёва П.С., 2023

**\*Grebeniuk A.A., Smal D.V., Davidyuk A.S., Ponomareva P.S.**

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

*\*E-mail: alexander.grebeniuk@mail.ru*

## OBTAINING MIXED COMPOSITE CEMENTS BASED ON FERRITE CLINKER

**Abstract.** *The possibility of using ferritic clinker as a component of binders with special performance properties is considered. Such types of cements can solve the problems of providing the construction industry with high-strength, resistant to external aggressive effects and relatively cheap binders. However, the mechanism of hardening and curing of cement stone obtained by using ferritic clinkers is complicated and depends on a number of parameters.*

*It was found that the greatest thermal effect (more than 70 %) during the hydration of the resulting ferritic clinker with the introduction of various additives (lime and gypsum stone) is achieved up to 4 hours from the moment the binder compositions are mixed by means of a calorimetric analysis carried out during the hydration of the developed special binder compositions. That corresponds to the course of the induction period of hydration of the used Portland cement, at the time of the occurrence of primary contacts between crystalline hydrates and sufficient mobility of the cement mass. In this time interval, the strength of the cement stone is not high enough and the produced iron-containing hydration products are able to fill the space of the cement matrix, making it more dense and less defective.*

*The formation of iron-containing crystalline hydrates from ferritic clinker can proceed in several stages: hydrolysis of dicalcium ferrite at the initial stage of the reaction and further interaction of its products with portlandite in the period from 7 to 14 days from the moment of mixing the binder compositions. The main crystalline hydrates formed from ferritic clinker are iron-bearing ettringite and hydrogarnet.*

*The study of the physical and mechanical characteristics of cement stone showed that the optimal content of ferritic clinker in the composition of the binder compositions is 5%. With a given quantity, the strength of the cement stone in compression and bending exceeds that of the control sample by 11.5 %. The input of 15 and 30 % ferritic clinkers into the composition of special binders reduces the strength characteristics by 15–20 %.*

**Keywords:** *ferritic clinker, srebrodolskite, special binder compositions, hydration, strength characteristics, cement stone.*

## REFERENCES

1. Decree of the Government of the Russian Federation of April 23, 2020 No. 566 "On Approval of the Rules for Reimbursing Credit and Other Organizations for Lost Income on Housing (Mortgage) Loans (Loans) Issued to Citizens of the Russian Federation in 2020" [Postanovleniye Pravitel'stva RF ot 23.04.2020 g. No 566 «Ob utverzhdenii Pravil vozmeshcheniya kreditnym i inym organizatsiyam nedopoluchennykh dokhodov po zhilishchnym (ipotekhnym) kreditam (zaymam), vydannym grazhdanam Rossiyskoy Federatsii v 2020 godu»]. Collection of legislation of the Russian Federation. 27.04.2020. No. 17. 2805. (rus)
2. Borisov I.N., Manuilov V.E. Energy and resource saving in the production of cement with the integrated use of man-made materials [Energo- i resursosberezheniye v proizvodstve tsementa pri kompleksnom ispol'zovanii tekhnogennykh materialov]. ALITinform: Cement. Concrete. Dry Mixtures. 2009. No. 6 (12). Pp. 50–58. (rus)
3. Tekucheva E.V., Kudryavtsev V.P., Klassen V.K. Efficiency of replacing the iron-containing component of the cement raw mix with waste slag from the Oskol Electrometallurgical Plant [Effektivnost' zameny zhelezosoderzhashchego komponenta tsementnoy syr'yevoy smesi otval'nym shlakom Oskol'skogo elektrometallurgicheskogo kombinata]. Technique and technology of silicates. 2010. Vol. 17. No. 2. Pp. 22–26. (rus)
4. Kozubskaya T.G. The use of man-made waste in the production of building materials [Ispol'zovaniye tekhnogennykh otkhodov v proizvodstve stroitel'nykh materialov]. Stroitel'nye Materialy. 2002. No. 2. 10. (rus)
5. Sivkov S.P., Turusheva E.V., Moshkovskaya S.V., Krylov A.P. The use of metallurgical slags as a mineral additive in the production of cements [Ispol'zovaniye metallurgicheskikh shlakov v kachestve mineral'noy dobavki pri proizvodstve tsementov]. Cement and its Applications. 2022. No. 2. Pp. 64–66. (rus)
6. Kapustin F.L., Afanaseva M.A. The use of copper-smelting slag in the production of cements for general construction purposes [Ispol'zovaniye medeplavil'nogo shlaka v proizvodstve tsementov obshchestvoitelnogo naznacheniya]. ALITinform: Cement. Concrete. Dry Mixtures. 2013. No. 3 (30). Pp. 52–58. (rus)
7. Erenberg A. Properties of cements containing stored granulated blast-furnace slag [Svoystva tsementov, sodержashchikh khranivshiyasya granulirovanny domenny shlak]. Cement and its Applications. 2013. No. 6. Pp. 34–38. (rus)
8. Shilova I.A. Energy saving and improving the quality of cement clinker using slag-chalk-lime mixture [Energoberezheniye i povysheniye kachestva tsementnogo klinkera s ispol'zovaniyem shlako-melo-izvestkovoy smesi]. Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. 2008. Vol. 22. No. 7 (87). Pp. 63–68. (rus)
9. Krasnobaeva S.A., Medvedeva I.N., Brykov A.S., Stafeeva Z.V. Properties of materials based on Portland cement with the addition of metakaolin MKZHL [Svoystva materialov na osnove portlandtsementa s dobavkoy metakaolina MKZHL]. Cement and its Applications. 2015. No. 1. Pp. 50–55. (rus)
10. Aimenov Zh.T., Aimenov A.Zh., Sarsenbaev N.B., Sarsenbaev B.K. Obtaining composite cements based on man-made waste [Polucheniye kompozitsionnykh tsementov na osnove tekhnogennykh otkhodov]. Herald of GSTOU. Technical Sciences. 2021. Vol. 17. No. 1 (23). Pp. 38–45. (rus)

11. Kovaleva I.E., Panina N.S., Golysheva M.N., Shutova A.V., Neznamova S.G. Cements with increased resistance to carbonate aggression [Tsementy povyshennoy stoykosti k karbonatnoy agressii]. *Concrete Technologies*. 2011. No. 9–10 (62–63). Pp. 27–29. (rus)
12. Krivoborodov Y., Samchenko S. Composite binders for fastening high temperature wells. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". 2020. 042011.
13. Krivoborodov Y.R., Kuznetsova T.V., Samchenko S.V. Refractory concrete based on high-alumina cement and clinker filler. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2021. Vol. 62. No. 2. Pp. 153–156.
14. Yastrebinskii R.N. Attenuation of neutron and gamma radiation by a composite material based on modified titanium hydride with a varied boron content. *Russian Physics Journal*. 2018. Vol. 60. No. 12. Pp. 2164–2168.
15. Zorin D.A., Khomutaev A.V. The effectiveness of the use of sulfoferritic cements in construction [Effektivnost' primeneniya sul'foferritnykh tsementov v stroitel'stve]. *Technique and technology of silicates*. 2018. Vol. 25. No. 2. Pp. 39–43. (rus)
16. Borisov I.N., Grebeniuk A.A., Dyukareva V.I. Combined cements with non-shrinking properties using sulfoferrite clinker. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 012011.
17. Osokin A.P., Entin Z.B., Pushkarev I.S. Production technology and properties of especially corrosion-resistant cement [Tekhnologiya polucheniya i svoystva osobokorroziionnostoykogo tsementa]. *Cement and its Applications*. 2001. No. 6. Pp. 17–19. (rus)
18. Tikhonov V.A., Klimenko Z.G., Berezhnenko E.T., Zhavoronkova E.V. Special high iron cements [Spetsial'nyye vysokozhelezistyye tsementy]. *Trudy VI Mezhdunarodnogo kongressa po khimii tsementa*. M.: 1976. Vol. III. Pp. 154–156. (rus)
19. Rakhimbaev Sh.M., Onoprienko N.N., Rakhimbaev I.Sh. Thermodynamic analysis of hydration processes of calcium aluminoferrite [Termodinamicheskiy analiz protsessov gidratatsii alyumoferrita kal'tsiya]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 3. Pp. 82–88. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-82-88.
20. Kuznetsova T.V., Burygin I.V. Hydration of Weighted Well Cement [Gidratatsiya utyazhennogo tamponazhnogo tsementa]. *Technique and technology of silicates*. 2010. Vol. 17. No. 3. Pp. 29–32. (rus)
21. Borisov I.N., Grebeniuk A.A. Features of hydration and curing of sulfoferritic clinkers and special cements based on them [Osobennosti gidratatsii i nabora prochnosti sul'foferritnykh klinkerov i spetsial'nykh tsementov na ikh osnove]. *Cement and its Applications*. 2019. No. 3. Pp. 88–91. (rus)
22. Lotenbach B., Dilniza B.Ts., Wieland E. Ways of iron transformation during hydration of cements [Puti prevrashcheniya zheleza pri gidratatsii tsementov]. *Cement and its Applications*. 2013. No. 1. Pp. 42–49. (rus)
23. Dilnesa B. Z., Lothenbach B., Renaudin G., Wichser A., Wieland E. Stability of Monosulfate in the presence of iron. *Journal of the American Ceramic Society*. 2012. Vol. 95. No. 10. Pp. 3305–3316.
24. Renaudin G., Mesbah A., Zeleke Dilnesa B., Francois M., Lothenbach B. Crystal chemistry of iron containing cementitious AFm layered hydrates. *Current Inorganic Chemistry*. 2015. No. 5. Pp. 184–193.
25. Elakneswaran Y., Noguchi N., Matumoto K., Morinaga Y., Chabayashi T., Kato H., Nawa T. Characteristics of Ferrite-Rich Portland Cement: Comparison With Ordinary Portland Cement. *Frontiers in Materials*. 2019. doi: 10.3389/fmats.2019.00097.
26. Dilnesa B. Z., Wieland E., Lothenbach B., Dahn R., Scrivener K. L. Fe-containing phases in hydrated cements. *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 58. Pp. 45–55.
27. Vespa M., Wieland E., Dahn R., Lothenbach B. Identification of the thermodynamically stable Fe-containing phase in aged cement pastes. *Journal of the American Ceramic Society*. 2015. Vol. 98. No. 7. Pp. 2286–2294.
28. Lotov V.A. The driving force behind the processes of hydration and hardening of cement [Dvizhushchaya sila protsessov gidratatsii i tverdeniya tsementa]. *Technique and technology of silicates*. 2011. Vol. 18. No. 4. Pp. 23–27. (rus)
29. Brykov A.S., Anisimova A.V., Rozenkova N.S., Mokeev M.V. Comparative study of iron (III) and aluminum sulfates as inhibitors of alkali-silica reactions [Sravnitel'noye issledovaniye sul'fatov zheleza (III) i alyuminiya v kachestve ingibitorov shchelochekremnezemnykh reaktsiy]. *Cement and its Applications*. 2015. No. 5. Pp. 50–55. (rus)

#### Information about the authors

**Grebeniuk, Alexander A.** PhD, Assistant professor. E-mail: alexander.grebeniuk@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Smal, Dmitry V.** PhD, Assistant professor. E-mail: doc\_cdv@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Davidyuk, Alina S.** Master student. E-mail: davidyuk-alina@outlook.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Ponomareva, Polina S.** Bachelor student. E-mail: polina.ponomarva.04@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 07.11.2022*

**Для цитирования:**

Гребенюк А.А., Смаль Д.В., Давидюк А.С., Пономарёва П.С. Получение смешанных композиционных цементов на основе ферритного клинкера // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 1. С. 89–101. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-89-101

**For citation:**

Grebeniuk A.A., Smal D.V., Davidyuk A.S., Ponomareva P.S. Obtaining mixed composite cements based on ferrite clinker. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 1. Pp. 89–101. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-89-101

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-102-120

**Безмен П.А.**

Юго-Западный государственный университет

E-mail: pbezmen@yahoo.com

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПО СОСТОЯНИЮ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ С НАБЛЮДАТЕЛЕМ И РЕГУЛЯТОРОМ СОСТОЯНИЯ

**Аннотация.** В работе предложена модель системы управления по состоянию объекта управления, включающую в себя наблюдатель и регулятор состояния. Задающим воздействием для данной системы управления являются требуемые значения переменных состояния управляемого объекта. В качестве наблюдателя состояния объекта управления в модели системы управления используется система «расширенный фильтр Калмана – адаптивный цифровой фильтр» (система РФК–АЦФ). Описаны структура и принцип работы регулятора состояния системы управления. Изложен адаптивный алгоритм регулятора состояния.

Регулятор состояния с алгоритмом адаптации для формирования вектора выхода (ошибки) регулятора использует выходные данные системы РФК–АЦФ: вектор оценки состояния, выполненной РФК системы РФК–АЦФ, и вектор скорректированной оценки состояния, выполненной АЦФ системы РФК–АЦФ. Алгоритм адаптации регулятора учитывает выходные данные системы РФК–АЦФ таким образом, чтобы сформировать наиболее достоверный вектор выхода регулятора.

Для подтверждения эффективности рассматриваемой системы управления приведены результаты численного моделирования процесса управления мобильным роботом с гусеничным движителем: сравниваются результаты моделирования работы предлагаемой системы управления с результатами моделирования работы системы управления, использующей РФК в качестве наблюдателя состояния.

Сочетание наблюдателя состояния и регулятора состояния в составе предлагаемой системы управления делает возможным управление динамическими объектами с недоступными непосредственному измерению переменными состояния и обладающими неперiodическими внешними возмущениями.

**Ключевые слова:** система управления, робототехника, расширенный фильтр Калмана, адаптивный цифровой фильтр, наблюдатель состояния, регулятор состояния.

**Введение.** В системах управления, в частности, системах управления мобильной робототехникой, целью процесса управления является формирование входного воздействия  $\mathbf{u}$ , при котором управляемая система из текущего состояния  $\mathbf{x}(0)$  переходит в желаемое состояние  $\mathbf{x}(T)$  за конечное время  $T$ . Управляемость системы зависит от её структуры, состава управляющих параметров и их значений, её энергетических ресурсов и вычислительных ресурсов системы управления. Управляемость характеризуется наличием необходимых для выполнения управления воздействий, составляющих вектор  $\mathbf{u}$ .

Многим алгоритмам управления роботами требуется возможность получения значений элементов вектора  $\mathbf{x}$  текущего состояния управляемой системы путем непосредственного измерения значений элементов данного вектора при помощи датчиков физических величин, что редко бывает осуществимо. В случае невозможности получения данных текущего состояния системы с использованием датчиков физических величин важным является косвенное определение текущего состояния. Фильтры Калмана [1–3], как

средство оценивания состояния управляемой системы, позволяют выполнить преобразование (например, комплексирование) данных (таких, как информация датчиков) с целью косвенного определения состояния управляемой системы.

Опишем модель некоторой управляемой системы выражениями:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), k) + \mathbf{w}, \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), k) + \mathbf{v}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{x}(k)$  – вектор состояния, размерность вектора  $n$ ;

$\mathbf{u}(k)$  – вектор управляющих воздействий, размерность вектора  $e$ ;

$\mathbf{y}(k)$  – вектор выхода системы, размерность вектора  $m$ ;

$\mathbf{F}(\bullet)$  – некоторая нелинейная (гладкая) вектор-функция процесса изменения состояния размерностью  $n$ , имеющая частные производные первого порядка по всем своим переменным;

$\mathbf{H}(\bullet)$  – некоторая нелинейная (гладкая) вектор-функция процесса наблюдений размерностью  $m$ , имеющая частные производные первого порядка по всем своим переменным;

$w(k)$  – вектор шума процесса, размерность вектора  $n$  – характеризуется ковариационной матрицей  $Q(k)$  – матрицей ковариаций шума процесса размерностью  $n \times n$ .

$v(k)$  – вектор шума измерения, размерность вектора  $m$  – характеризуется ковариационной

матрицей  $R(k)$  – матрицей ковариаций ошибок измерения размерностью  $m \times m$ ;

$k$  – некоторый текущий момент времени;

$(k + 1)$  – следующий момент времени.

Предположим, что данная нелинейная модель управляемой системы известна и может быть линеаризована посредством матриц Якоби:

$$J_{F_x}(k) = \frac{\partial F(\bullet)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(\bullet)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_1(\bullet)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n(\bullet)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_n(\bullet)}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{x(k), u(k)}, \quad (3)$$

$$J_{F_u}(k) = \frac{\partial F(\bullet)}{\partial u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(\bullet)}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial F_1(\bullet)}{\partial u_e} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n(\bullet)}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial F_n(\bullet)}{\partial u_e} \end{bmatrix}_{x(k), u(k)}, \quad (4)$$

$$J_{H_x}(k) = \frac{\partial H(\bullet)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_1(\bullet)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial H_1(\bullet)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial H_m(\bullet)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial H_m(\bullet)}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{x(k), u(k)}, \quad (5)$$

$$J_{H_u}(k) = \frac{\partial H(\bullet)}{\partial u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_1(\bullet)}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial H_1(\bullet)}{\partial u_e} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial H_m(\bullet)}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial H_m(\bullet)}{\partial u_e} \end{bmatrix}_{x(k), u(k)}, \quad (6)$$

где  $J_{F_x}(k)$  –  $n \times n$ -матрица Якоби частных производных функции  $F(x(k), u(k), k)$  по  $x$  (матрица коэффициентов (динамики) системы);

$J_{F_u}(k)$  –  $n \times e$ -матрица Якоби частных производных функции  $F(x(k), u(k), k)$  по  $u$  (матрица коэффициентов входа (управления));

$J_{H_x}(k)$  –  $m \times n$ -матрица Якоби частных производных функции  $H(x(k), u(k), k)$  по  $x$  (матрица коэффициентов выхода системы);

$J_{H_u}(k)$  –  $m \times e$ -матрица Якоби частных производных функции  $H(x(k), u(k), k)$  по  $u$  (матрица коэффициентов преобразования вход-выход);

$x_1, \dots, x_n$  – элементы вектора  $x$ ;

$u_1, \dots, u_e$  – элементы вектора  $u$ ;

$F_1(\bullet), \dots, F_n(\bullet)$  – элементы вектор-функции  $F(\bullet)$ ;

$H_1(\bullet), \dots, H_m(\bullet)$  – элементы вектор-функции  $H(\bullet)$ .

Используя матрицы (3) – (6), перепишем выражения (1) и (2) [4, 5] (рис. 1):

$$x(k+1) = J_{F_x}(k) \cdot x(k) + J_{F_u}(k) \cdot u(k) + w, \quad (7)$$

$$y(k) = J_{H_x}(k) \cdot x(k) + J_{H_u}(k) \cdot u(k) + v. \quad (8)$$

Для наблюдателя состояния объекта управления имеем выражения:

$$\hat{x}(k+1) = J_{F_x}(k) \cdot \hat{x}(k) + J_{F_u}(k) \cdot u(k) + w, \quad (9)$$

$$\hat{y}(k) = J_{H_x}(k) \cdot \hat{x}(k) + J_{H_u}(k) \cdot u(k) + v. \quad (10)$$

На рисунках 1 – 3 символами  $1z^{-1}$  для систем с дискретным временем  $k$  обозначено звено задержки во времени на один интервал времени, где  $\mathbf{1}$  – единичная матрица  $n \times n$ .

Существуют задачи робототехники, для решения которых требуется использование управления по состоянию управляемого объекта (системы). Задающими воздействиями в этом случае являются требуемые значения переменных со-

стояния объекта, выраженные в виде вектора требуемых состояний  $x_T(k)$ . Вектор  $y(k)$  выхода системы и вектор  $u(k)$  управляющих воздействий являются входными данными для наблюдателя,

выполняющего оценку  $\hat{x}(k)$  состояния управляемого объекта (рис. 2 – 3). Вектор  $u(k)$  формируется регулятором, исходя из значений элементов векторов  $\hat{x}(k)$  и  $x_T(k)$ , поступающих на вход регулятора.

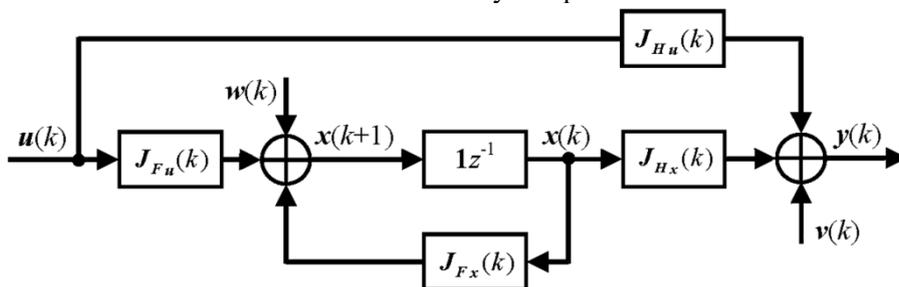


Рис. 1. Схема модели линейной управляемой системы

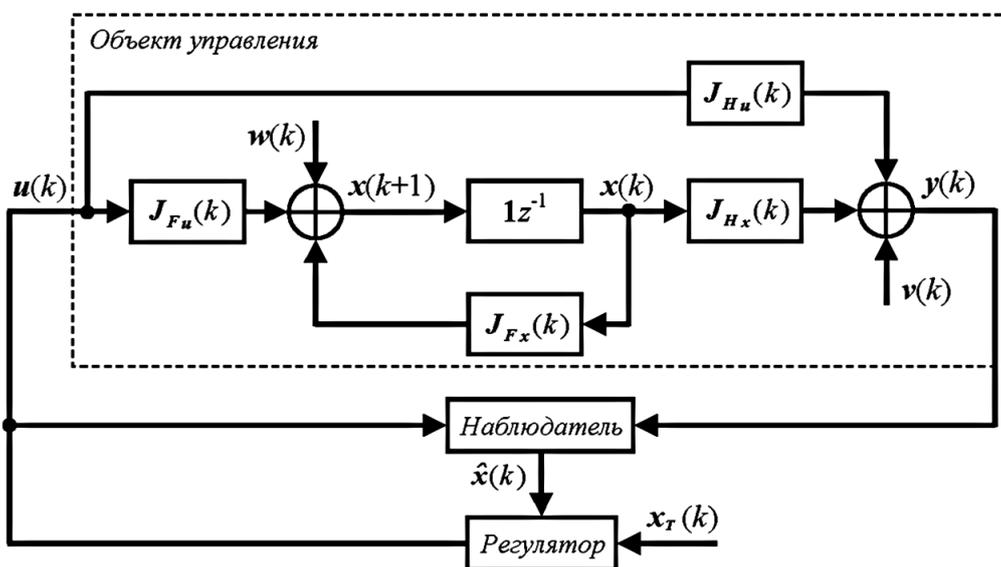


Рис. 2. Обобщенная схема модели линейной управляемой системы с наблюдателем и регулятором состояния

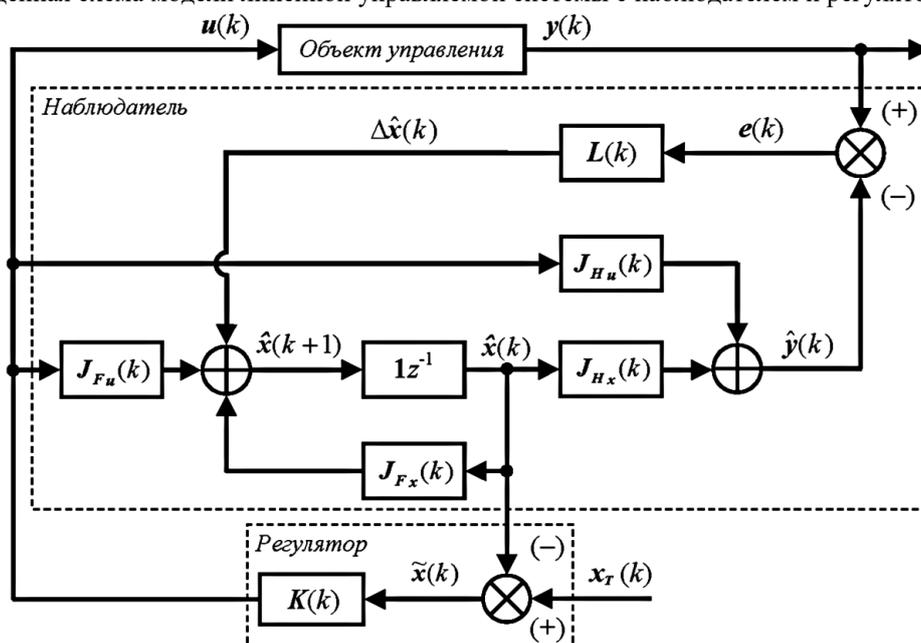


Рис. 3. Обобщенная схема моделей наблюдателя и регулятора состояния

В моделях наблюдателя и регулятора состояния (рис. 3) используются матрицы  $L(k)$  и  $K(k)$  соответственно. Матрица  $L(k)$  наблюдателя состояния может быть найдена как матрица коэффициентов усиления, оптимальных по Калману [6, 7], размерность матрицы  $n \times m$ .

Для нахождения элементов матрицы  $K(k)$  регулятора состояния могут использоваться: решение матричного уравнения Риккати [8, 9], метод линейных матричных неравенств (ЛМН) [10 – 12], метод нахождения псевдообратной матрицы – обобщенной обратной матрицы Э.Г. Мура – Р. Пенроуза (англ. *E.H. Moore – R. Penrose generalized inverse for matrices*) [13, 14], применяемые для нахождения решений систем линейных уравнений, когда в матричной форме записи данных уравнений матрицы системы являются прямоугольными.

Одними из первых работ, в которых описывается применение псевдообратных матриц в синтезе систем управления, являются [15, 16].

Учитывая выражение (7), матрица  $K(k)$  регулятора состояния в общем случае может быть найдена как псевдообратная матрица матрице  $J_{Fu}(k)$ :

$$K(k) = J_{Fu}^+(k), \quad (11)$$

где  $J_{Fu}^+(k)$  – обобщенная обратная матрица Мура – Пенроуза, имеющая размерность  $e \times n$ .

Таким образом, принимая во внимание, что:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k) &= J_{Fu}(k) \cdot u(k), \\ u(k) &\cong J_{Fu}^+(k) \cdot \hat{x}(k), \\ \hat{y}(k) &= J_{Hx}(k) \cdot \hat{x}(k), \quad \hat{x}(k) \cong J_{Hx}^+(k) \cdot \hat{y}(k), \\ \hat{y}(k) &= J_{Hu}(k) \cdot u(k), \\ u(k) &\cong J_{Hu}^+(k) \cdot \hat{y}(k), \end{aligned}$$

можно записать:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k) &\cong J_{Hx}^+(k) \cdot J_{Hu}(k) \cdot J_{Fu}^+(k) \cdot \hat{x}(k), \\ J_{Hx}^+(k) \cdot J_{Hu}(k) \cdot J_{Fu}^+(k) &\cong \mathbf{1}_n, \\ u(k) &\cong J_{Hu}^+(k) \cdot J_{Hx}(k) \cdot J_{Fu}(k) \cdot u(k), \\ J_{Hu}^+(k) \cdot J_{Hx}(k) \cdot J_{Fu}(k) &\cong \mathbf{1}_e, \end{aligned}$$

где  $\mathbf{1}$  – единичная матрица,

$n$  – размерность вектора  $\hat{x}(k)$  состояния;

$e$  – размерность вектора  $u(k)$  управляющих воздействий.

Если матрица  $J_{Fu}(k)$  является квадратной и невырожденной (определитель которой отличен от нуля), то матрица  $K(k)$  регулятора состояния находится, как обратная матрице  $J_{Fu}(k)$ :

$$K(k) = J_{Fu}^{-1}(k). \quad (12)$$

Матрица  $K(k)$  регулятора состояния, найденная как матрица  $J_{Fu}^+(k)$  (11), является субоптимальной, тогда как решение матричного уравнения Риккати в большинстве случаев позволяет получить оптимальную матрицу  $K(k)$  регулятора. Однако, нахождение матрицы  $K(k)$  как псевдообратной матрице матрице  $J_{Fu}(k)$  может быть выполнено с меньшими вычислительными затратами, чем решение матричного уравнения Риккати.

В работе [17] рассмотрен метод сингулярного разложения (англ. *Singular Value Decomposition, SVD*) прямоугольной матрицы для нахождения псевдообратной матрицы, представлена реализация данного метода в виде процедур (подпрограмм), написанных на языке программирования Алгол.

**Описание модели системы управления.** В работе [18] описывается система управления состоянием объекта, которая может быть использована в системах управления мобильными роботами. В данной системе управления используется система «расширенный фильтр Калмана – адаптивный цифровой фильтр» (система РФК–АЦФ) [19, 20], выполняющая оценку состояния объекта управления. Регулятор состояния рассматриваемой системы обладает алгоритмом адаптации, использующим результаты работы системы РФК–АЦФ: вектор  $\hat{x}(k|k)$  значений апостериорной (нескорректированной) оценки состояния системы, вектор  $X_{out}(k)$  скорректированных значений оценки состояния системы в некоторый текущий момент времени, вектор  $X_{out}(k-1)$  скорректированных значений оценки состояния системы в предыдущий момент времени. В данной системе управления по состоянию объекта управления вместо полноценного наблюдателя состояния используется фильтр – система РФК–АЦФ, выполняющий оценку состояния объекта управления без учета информации о векторе входа (векторе управляющих воздействий)  $u$ , что ограничивает возможности использования данной системы управления, делая процесс управления неоптимальным.

Предлагается обобщенная модель системы управления по состоянию объекта управления (рис. 4). Данная модель системы управления включает в себя систему РФК–АЦФ в качестве наблюдателя состояния. РФК рассматриваемой системы использует информацию об управляющих воздействиях при оценке состояния – в алгоритме РФК реализовываются вычисления согласно выражениям (9) – (10).

Принципы работы регулятора состояния (рис. 4) рассматриваемой системы управления



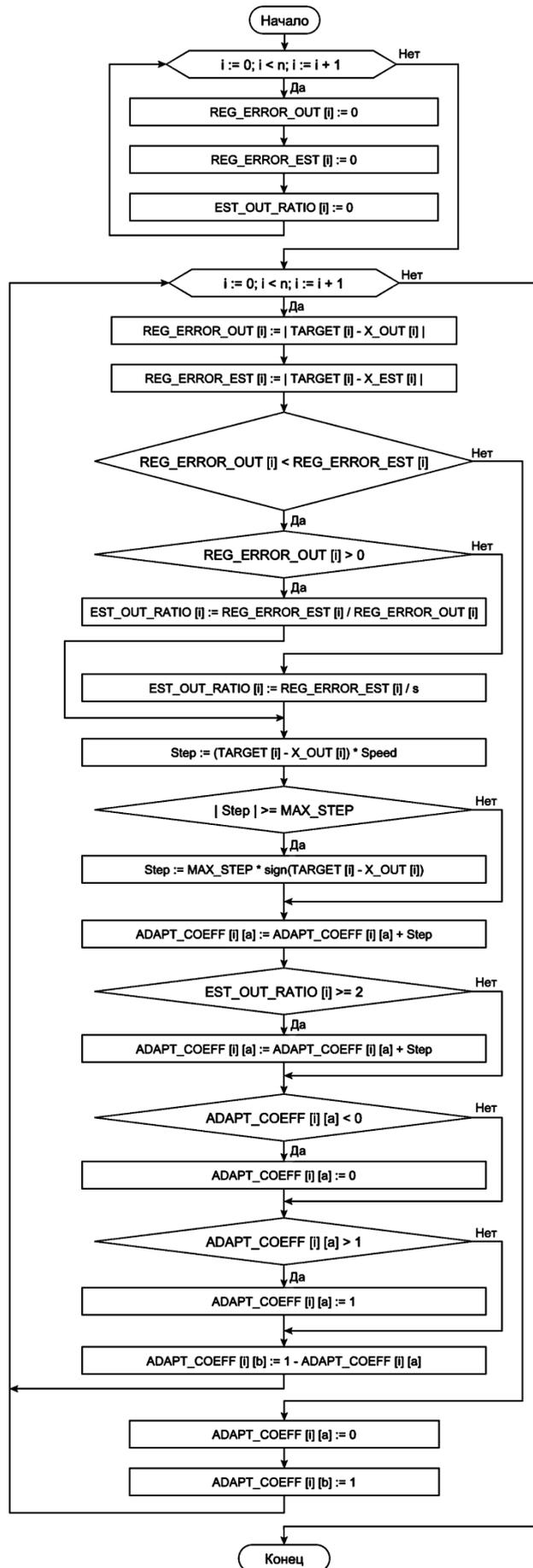


Рис. 5. Блок-схема алгоритма адаптации регулятора состояния

На блок-схеме алгоритма адаптации регулятора обозначены (рис. 5):

$n$  – значение размерности  $n$  векторов  $X_T(k)$ ,  $X_{out}(k)$  и  $\hat{x}(k|k)$ ;

$i$  – переменная, хранящая текущий номер (индекс)  $i$  элементов массивов,  $0 \leq i < n$ ;

REG\_ERROR\_OUT – одномерный массив (вектор), каждый элемент которого хранит абсолютную величину ошибки (разности) между значениями элементов векторов  $X_T(k)$  и  $X_{out}(k)$ , соответствующих этому элементу, размерность массива –  $n$ ;

REG\_ERROR\_EST – одномерный массив (вектор), каждый элемент которого хранит абсолютную величину ошибки (разности) между значениями элементов векторов  $X_T(k)$  и  $\hat{x}(k|k)$ , соответствующих этому элементу, размерность массива –  $n$ ;

EST\_OUT\_RATIO – одномерный массив (вектор), каждый элемент которого хранит частное значений элементов массивов REG\_ERROR\_EST и REG\_ERROR\_OUT, соответствующих этому элементу, размерность массива –  $n$ ;

TARGET – одномерный массив (вектор)  $X_T(k)$ ;

X\_OUT – одномерный массив (вектор)  $X_{out}(k)$ ;

X\_EST – одномерный массив (вектор)  $\hat{x}(k|k)$ ;

$s$  – крайне малая положительная величина,  $s > 0$ ;

Step – переменная, хранящая значение некоторого шага алгоритма адаптации;

Speed – скорость сходимости алгоритма адаптации, Speed  $> 0$ ;

MAX\_STEP – максимальное значение шага алгоритма адаптации, MAX\_STEP  $> 0$ ;

ADAPT\_COEFF – двумерный массив (матрица), который содержит значения элементов главных диагоналей матриц  $W_a$  и  $W_b$ , размерность массива –  $n \times 2$ :

$$\mu_i = \begin{cases} \mu_{\max} \cdot \text{sign}(X_{Ti}(k) - X_{outi}(k)), & \text{если } |(X_{Ti}(k) - X_{outi}(k)) \cdot \eta| \geq \mu_{\max}, \\ \text{иначе } (X_{Ti}(k) - X_{outi}(k)) \cdot \eta \end{cases}, \quad (17)$$

где  $0 \leq i < n$ ,

sign( $x$ ) – функция определения знака аргумента  $x$ .

Некоторый  $i$ -ый элемент главной диагонали  $W_a$  вычисляется, следуя выражению:

$$W_{ai} = W_{ai} + \mu_i, \quad (18)$$

где  $0 \leq i < n$ .

При значении отношения

ADAPT\_COEFF [ $i$ ][ $a$ ] – двумерный массив, в  $i$ -ых строках  $a$ -го столбца которого содержатся значения элементов главной диагонали матрицы  $W_a$ ,

ADAPT\_COEFF [ $i$ ][ $b$ ] – двумерный массив, в  $i$ -ых строках  $b$ -го столбца которого содержатся значения элементов главной диагонали матрицы  $W_b$ ;

операция  $|\cdot|$  возвращает абсолютную величину некоторого числа;

sign( $x$ ) – функция определения знака аргумента  $x$ :

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}.$$

Алгоритм адаптации при формировании элементов матриц  $W_a$  и  $W_b$  учитывает абсолютную величину ошибки (разности) между значениями элементов векторов  $X_T(k)$  и  $X_{out}(k)$ , и абсолютную величину ошибки (разности) между значениями элементов векторов  $X_T(k)$  и  $\hat{x}(k|k)$ , а также отношение данных абсолютных величин (рис. 5).

Если выполняется условие

$$|X_{Ti}(k) - X_{outi}(k)| < |X_{Ti}(k) - \hat{x}_i(k|k)|, \quad (16)$$

где  $i$  – индекс элементов векторов  $X_{Ti}(k)$ ,  $X_{outi}(k)$  и  $\hat{x}_i(k|k)$ ,  $0 \leq i < n$ , то осуществляется вычисление шага алгоритма адаптации с

последующим вычислением элементов весовых диагональных матриц  $W_a$  и  $W_b$ , иначе данные матрицы принимают значения:  $W_a = \mathbf{0}$ ,  $W_b = \mathbf{1}$ ,

где  $\mathbf{0}$  – нулевая матрица размерностью  $n \times n$ ,  $\mathbf{1}$  – единичная матрица размерностью  $n \times n$ .

При вычислении шага  $\mu_i$  алгоритма адаптации используются постоянные величины – скорость  $\eta$  сходимости алгоритма адаптации и максимальное значение шага  $\mu_{\max}$  алгоритма адаптации:

$$\frac{|X_{Ti}(k) - \hat{x}_i(k|k)|}{|X_{Ti}(k) - X_{outi}(k)|} \geq 2, \quad (19)$$

где операция  $|\cdot|$  возвращает абсолютную величину некоторого числа, в рассматриваемом алгоритме адаптации (рис. 5) выполняется дополнительное изменение  $i$ -ого элемента главной диагонали диагональной матрицы  $W_a$  согласно (18).

Во время своей работы рассматриваемый алгоритм адаптации выполняет постепенное увеличение значений элементов главной диагонали весовой матрицы  $W_a$ , и, соответственно, постепенное уменьшение значений элементов главной диагонали весовой матрицы  $W_b$ , следуя выражению:

$$W_b = 1 - W_a, \quad (20)$$

где  $1$  – единичная матрица размерностью  $n \times n$ .

Постепенное изменение весовых матриц  $W_a$  и  $W_b$  (20) вызвано наличием некоторого периода времени, необходимого для достижения сходимости алгоритма АЦФ – в начале работы алгоритма АЦФ требуется, чтобы вектор  $\hat{x}(k|k)$

оказывал большее влияние на формирование вектора  $\bar{X}(k)$ , чем вектор  $X_{out}(k)$  (13), учитывая, что начальные значения всех элементов матриц  $W_a$  и  $W_b$  равны нулю. Выполнение данного требования минимизирует ошибку работы системы управления в начальный период времени её функционирования.

**Экспериментальные исследования.** В работе [21] приведена задача комплексирования бортовых данных мобильного робота с гусеничным движителем. Рассмотрим данную задачу с точки зрения управления в пространстве состояний, где объектом управления является мобильный гусеничный робот.

Определим векторную функцию процесса  $F(x(k), u(k))$  и векторную функцию наблюдений  $H(x(k), u(k))$  для моделей системы управления, представленных на рисунках 3 – 4:

$$F(x(k), u(k)) = \begin{bmatrix} F_0(x(k), u(k)) \\ F_1(x(k), u(k)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0(k) + \left( \frac{u_0(k) \cdot C_0 + u_1(k) \cdot C_1}{2} \right) \\ x_1(k) + (-u_0(k) \cdot C_0 + u_1(k) \cdot C_1) \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$H(x(k), u(k)) = \begin{bmatrix} H_0(x(k), u(k)) \\ H_1(x(k), u(k)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left( \frac{2 \cdot x_0(k) - x_1(k)}{2} \right) + u_0(k) \cdot C_0 \\ \left( \frac{2 \cdot x_0(k) + x_1(k)}{2} \right) + u_1(k) \cdot C_1 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

учитывая, что

$$x(k) = \begin{bmatrix} x_0(k) \\ x_1(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{cp}(k) \\ \omega_{\Sigma}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\omega_L(k) + \omega_R(k)}{2} \\ -\omega_L(k) + \omega_R(k) \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$\hat{x}(k) = \begin{bmatrix} \hat{x}_0(k) \\ \hat{x}_1(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_{cp}(k) \\ \hat{\omega}_{\Sigma}(k) \end{bmatrix}, \quad (24)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} y_0(k) \\ y_1(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_L(k) \\ \omega_R(k) \end{bmatrix}, \quad (25)$$

где  $\omega_L(k)$  и  $\omega_R(k)$  – значения угловых скоростей вращения ведущих колес левой и правой гусениц робота соответственно,

$\omega_{cp}(k)$  – среднее арифметическое значений  $\omega_L(k)$  и  $\omega_R(k)$ ,

$\omega_{\Sigma}(k)$  – сумма  $\omega_L(k)$  и  $\omega_R(k)$ , причем в данной сумме значение  $\omega_L(k)$  участвует с противоположным знаком,

$C_0$  и  $C_1$  – некоторые положительные ненулевые ( $C_0 > 0, C_1 > 0$ ) коэффициенты для значений элементов  $u_0$  и  $u_1$  вектора  $u$  управляющих воздействий соответственно:

$$u(k) = \begin{bmatrix} u_0(k) \\ u_1(k) \end{bmatrix}.$$

Получим матрицы Якоби (3 – 6) –  $J_{Fx}(k)$ ,  $J_{Fu}(k)$ ,  $J_{Hx}(k)$ ,  $J_{Hu}(k)$ :

$$J_{Fx} = \frac{\partial F(\bullet)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(\bullet)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_1(\bullet)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n(\bullet)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_n(\bullet)}{\partial x_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (26)$$

$$J_{Fu} = \frac{\partial F(\bullet)}{\partial u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(\bullet)}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial F_1(\bullet)}{\partial u_e} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n(\bullet)}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial F_n(\bullet)}{\partial u_e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cdot C_0 & \frac{1}{2} \cdot C_1 \\ -C_0 & C_1 \end{bmatrix}, \quad (27)$$

$$J_{Hx} = \frac{\partial H(\bullet)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_1(\bullet)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial H_1(\bullet)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial H_m(\bullet)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial H_m(\bullet)}{\partial x_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} \\ 1 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}, \quad (28)$$

$$J_{Hu} = \frac{\partial H(\bullet)}{\partial u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_1(\bullet)}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial H_1(\bullet)}{\partial u_e} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial H_m(\bullet)}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial H_m(\bullet)}{\partial u_e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_0 & 0 \\ 0 & C_1 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Найдем матрицу  $K$  регулятора состояния как обратную матрицу матрице  $J_{Fu}$ :

$$K = J_{Fu}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_0} & -\frac{1}{2 \cdot C_0} \\ \frac{1}{C_1} & \frac{1}{2 \cdot C_1} \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Для подтверждения эффективности работы системы управления по состоянию (рис. 4), содержащей систему РФК–АЦФ в качестве наблюдателя состояния и регулятор состояния с алгоритмом адаптации (рис. 5), в ходе численного моделирования проводилось сравнение результатов работы данной системы управления для управления мобильным роботом с гусеничным движителем и результатов работы системы управления (рис. 3), использующей РФК в качестве наблюдателя состояния, для управления мобильным гусеничным роботом.

Для проведения численного моделирования работы системы управления мобильным роботом с гусеничным движителем принимались параметры:

- радиус ведущих колес левой и правой гусениц робота  $R = 0,12$  м;
- расстояние между продольными осями левой и правой гусениц мобильного робота  $B = 0,5$  м;
- длина обеих гусениц робота  $L = 1$  м;
- требуемая траектория движения робота (рис. 6), насчитывающая 1000 точек (движение корпуса робота вдоль требуемой траектории начинается в начале системы координат  $XOY$ );
- шаг времени моделирования  $\Delta T = 0,1$  с;
- коэффициенты  $C_0 = C_1 = 1$ .

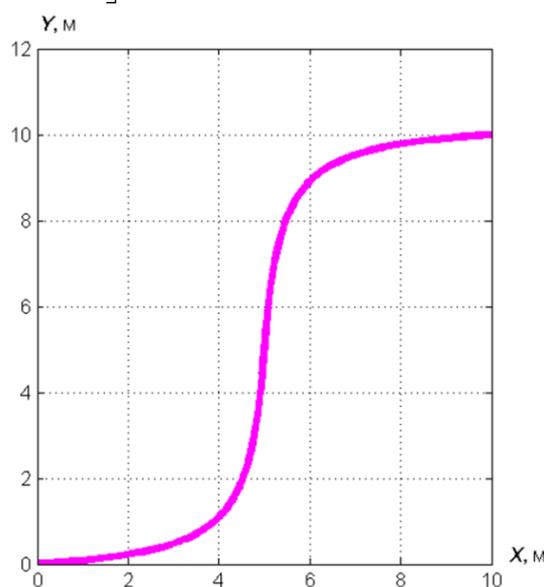


Рис. 6. Требуемая траектория движения робота

В ходе вычислительных экспериментов на выход  $y(k)$  системы ( $\omega_L(k)$  и  $\omega_R(k)$ ) либо не действует шум, либо накладывается шум максимальной амплитудой 0,001, 0,01, 0,1. На состояние  $x(k)$  системы шум не действует.

Результаты численного моделирования представлены абсолютными значениями ошибок  $E_{x_c}$  и  $E_{y_c}$ , определяемых как

$$E_{x_c}(p) = |X_c(p) - X_{c_d}(p)|, \quad (31)$$

$$E_{y_c}(p) = |Y_c(p) - Y_{c_d}(p)|, \quad (32)$$

где  $X_c(p)$  и  $Y_c(p)$  – требуемые координаты  $X$  и  $Y$  центра корпуса робота соответственно;

$X_{c_d}(p)$  и  $Y_{c_d}(p)$  – действительные значения координат  $X$  и  $Y$  центра корпуса робота соответственно;

$p$  – некоторая точка требуемой/действительной траектории;

$|\cdot|$  – операция определения абсолютной величины (модуля) некоторого числа.

Для реализации РФК, системы РФК–АЦФ и регулятора состояния использовался набор библиотек «РФК-АЦФ-АРС» реализации системы управления состоянием объекта [22]. В библиотеки входят: библиотека класса расширенного фильтра Калмана (РФК), библиотека класса адаптивного цифрового фильтра (АЦФ) с алгоритмами адаптации LMS/NLMS, библиотека класса адаптивного регулятора состояния (АРС). РФК является наблюдателем состояния объекта управления. АЦФ осуществляет коррекцию оценки состояния объекта управления, выполненной РФК. АРС вычисляет ошибку состояния управляемого объекта на основе: требуемых значений переменных состояния, оценки состояния,

выполненной РФК, скорректированной оценки состояния, выполненной АЦФ.

Все вычисления в ходе проведения моделирования выполнялись в среде программирования Embarcadero CodeGear C++ Builder, используя 64-битные переменные (float64) для хранения чисел с плавающей запятой.

С целью определения величин ошибок  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  работы системы управления (рис. 3) мобильным роботом, использующей РФК в качестве наблюдателя состояния, были заданы ковариационные матрицы  $Q(k)$  и  $R(k)$  РФК, являющиеся диагональными и скалярными со значениями своих ненулевых элементов, равными  $10^{-4}$  и  $1,0$  соответственно.

На рисунках 7–10 приведены результаты численного моделирования работы системы управления с РФК в качестве наблюдателя состояния.

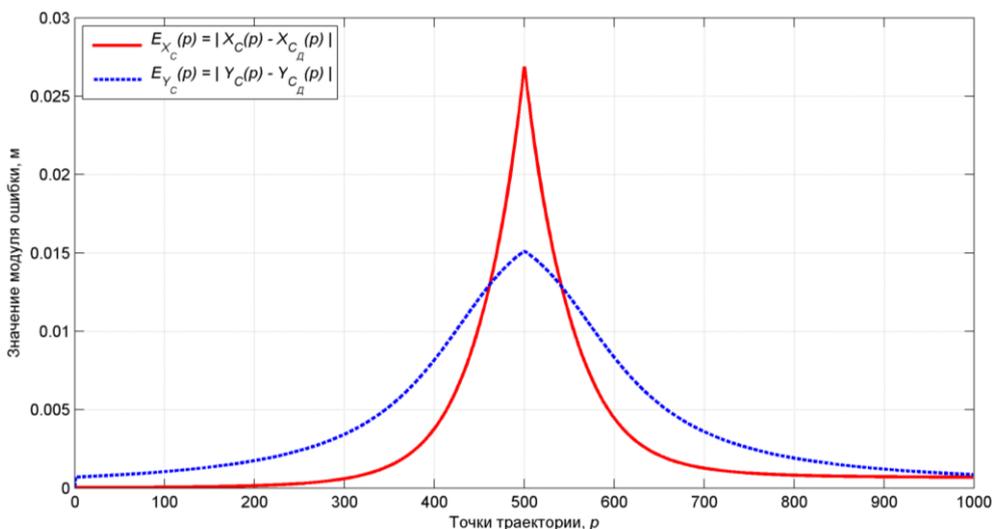


Рис. 7. Значения  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  при отсутствии действия шума на выход  $y(k)$  системы

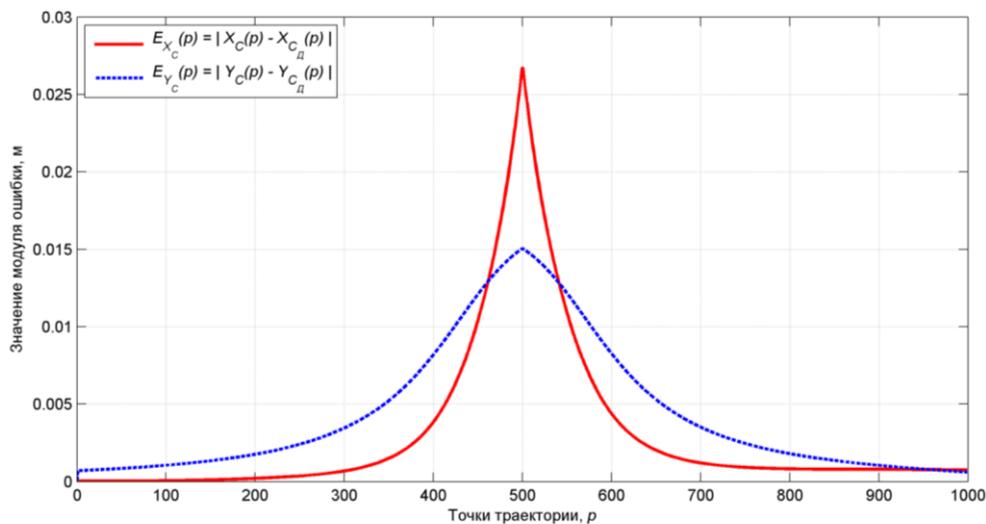


Рис. 8. Значения  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  при действии шума максимальной амплитудой 0,001 на выход  $y(k)$  системы

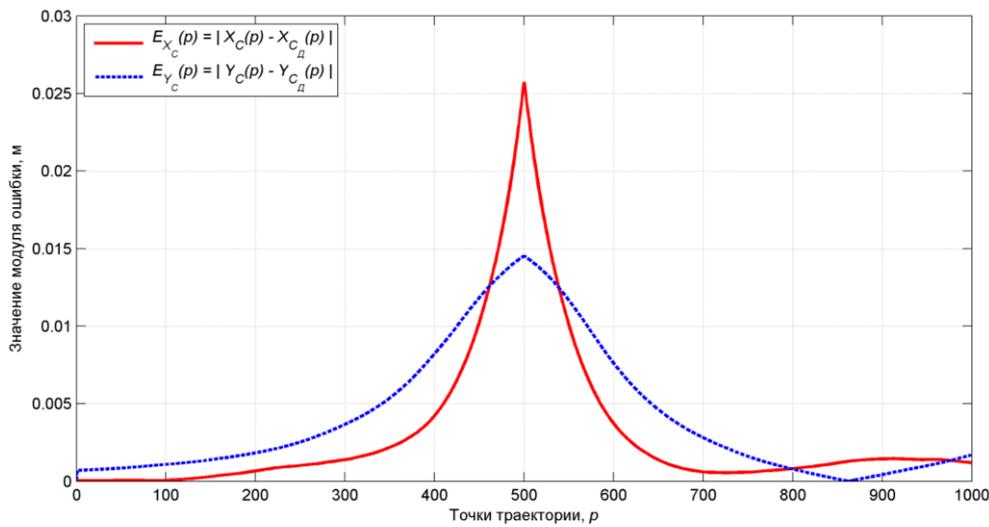


Рис. 9. Значения  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  при действии шума максимальной амплитудой 0,01 на выход  $y(k)$  системы

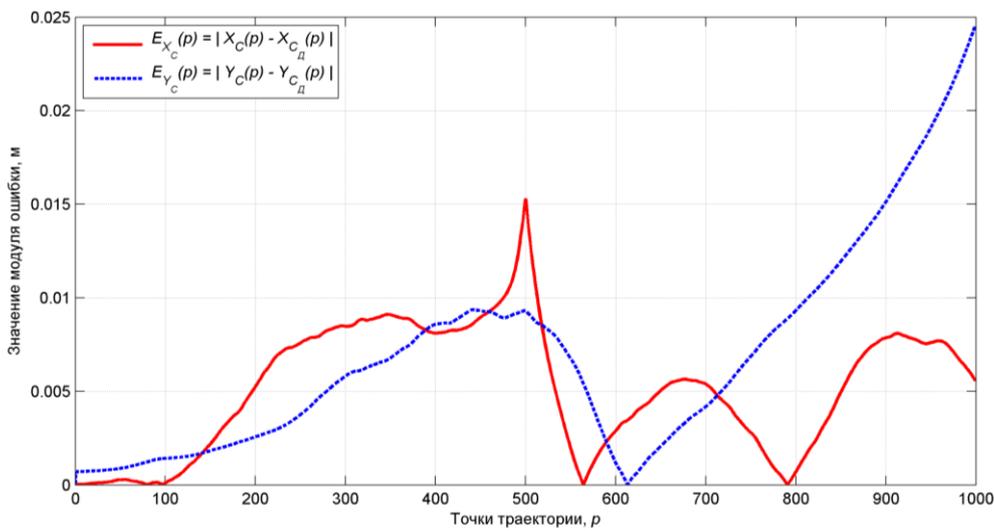


Рис. 10. Значения  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  при действии шума максимальной амплитудой 0,1 на выход  $y(k)$  системы

Для определения величин ошибок  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  работы системы управления (рис. 4) мобильным роботом с системой РФК–АЦФ в качестве наблюдателя состояния и регулятором состояния, проводилось численное моделирование со следующими параметрами:

- для наблюдателя состояния – системы РФК–АЦФ были заданы ковариационные матрицы  $Q(k)$  и  $R(k)$  РФК, являющиеся диагональными и скалярными со значениями своих ненулевых элементов, равными  $10^{-4}$  и 1,0 соответственно;

- АЦФ [20], входящий в состав системы РФК–АЦФ, обладает буферной памятью, состоящей из основного раздела (дополнительный раздел буферной памяти не используется) размером (объемом)  $N$  ячеек;

- величина шага сходимости  $\mu$  для АЦФ с алгоритмом NLMS определялась, как

$$\mu = \frac{1}{(N \cdot 1000)}$$

где  $N$  обозначает количество ячеек

- основного раздела буферной памяти АЦФ;
- для АЦФ с алгоритмом NLMS было принято значение  $\epsilon = 10^{-13}$  [20];

- максимальное значение шага алгоритма адаптации регулятора состояния  $\mu_{max} = 0,1$ ;

- постоянная скорость сходимости алгоритма адаптации регулятора состояния  $\eta = 10^{-5}$ .

В ходе вычислительных экспериментов размер основного раздела буферной памяти системы РФК–АЦФ принимался равным:  $N = 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 100$  ячеек. На рисунках 11–14 приведены некоторые результаты моделирования работы системы управления мобильным роботом с системой РФК–АЦФ в качестве наблюдателя состояния и регулятором состояния.

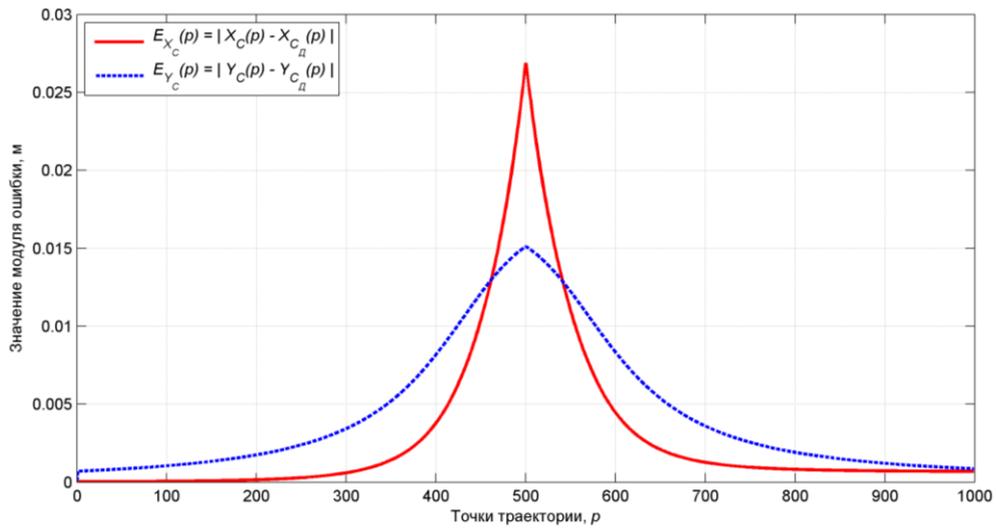


Рис. 11. Значения  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  при отсутствии действия шума на выход  $y(k)$  системы и размере буферной

памяти  $N = 100$  ячеек

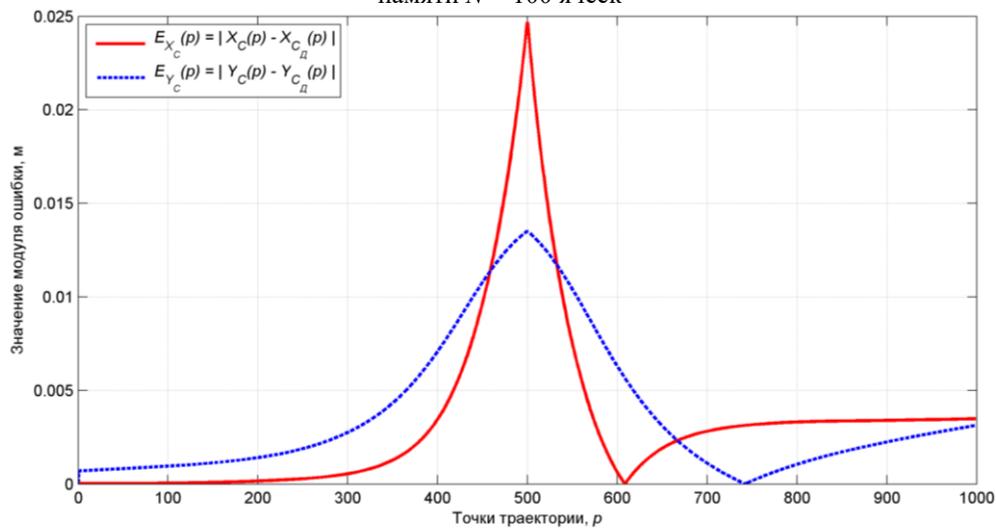


Рис. 12. Значения  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  при действии шума максимальной амплитудой 0,001 на выход  $y(k)$  системы и размере буферной памяти  $N = 100$  ячеек

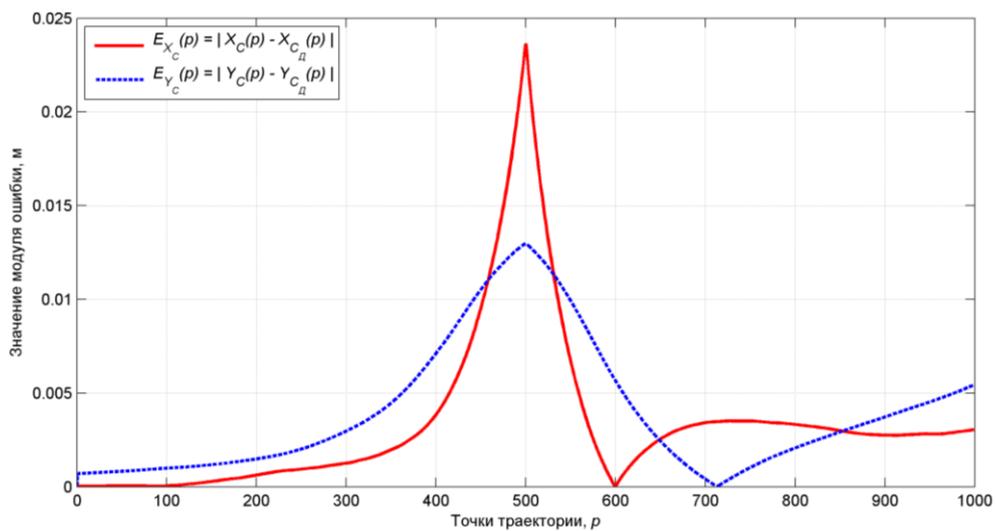


Рис. 13. Значения  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  при действии шума максимальной амплитудой 0,01 на выход  $y(k)$  системы и размере буферной памяти  $N = 100$  ячеек

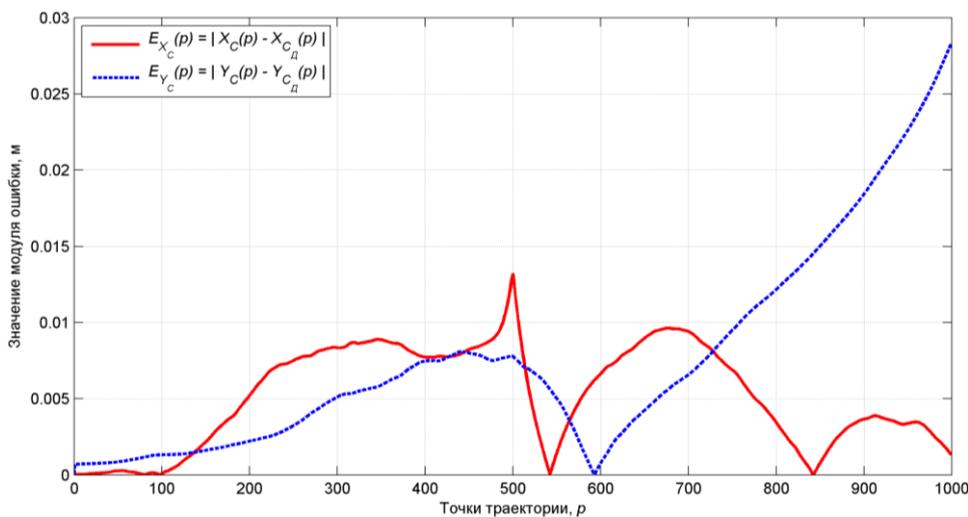


Рис. 14. Значения  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  при действии шума максимальной амплитудой 0,1 на выход  $y(k)$  системы и размере буферной памяти  $N = 100$  ячеек

Рисунки 15–18 демонстрируют зависимости максимальных значений ошибок  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  от размера буферной памяти системы управления при отсутствии шума, а также при наложении шума максимальной амплитудой 0,001, 0,01, 0,1 на выход  $y(k)$  системы:

– результаты работы системы управления (рис. 3), использующей РФК в качестве наблюдателя состояния, соответствуют максимальным

значениям ошибок  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  при размере буферной памяти  $N = 0$  ячеек;

– результаты работы системы управления (рис. 4), использующей систему РФК–АЦФ в качестве наблюдателя состояния и регулятор состояния с алгоритмом адаптации (рис. 5), соответствуют максимальным значениям ошибок  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  при размере буферной памяти  $N = 2 \dots 100$  ячеек АЦФ.

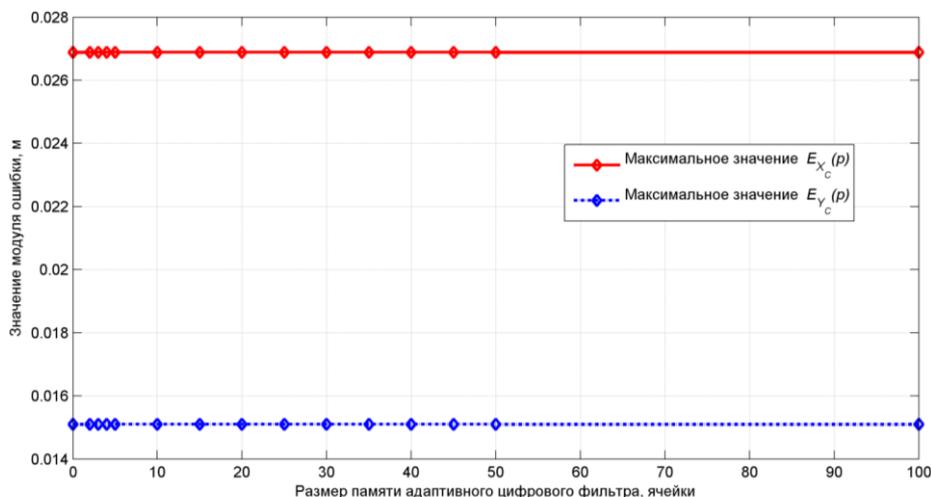


Рис. 15. Максимальные значения  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  при отсутствии действия шума на выход  $y(k)$  системы и размере буферной памяти  $N = 0 \dots 100$  ячеек

С целью изучения влияния регулятора состояния с алгоритмом адаптации (рис. 5) на работу системы управления (рис. 4) при неоптимальных ковариационных матрицах  $Q(k)$  и/или  $R(k)$  (с точки зрения конкретных условий работы системы управления) проводились, аналогичные предыдущим опытам, вычислительные эксперименты для систем управления, представленных на рисунке 3 и 4, где для наблюдателей состояния

$\hat{x}(k)$  – РФК и системы РФК–АЦФ были заданы ковариационные матрицы  $Q(k)$  и  $R(k)$ , являющиеся диагональными и скалярными со значениями своих ненулевых элементов, равными 0,1 и 0,1 соответственно. Для данных экспериментов также принимались:

– максимальное значение шага алгоритма адаптации регулятора состояния  $\mu_{max} = 0,01$ ;

– постоянная скорость сходимости алгоритма адаптации регулятора состояния  $\eta = 0,01$ .

Для данных вычислительных экспериментов ковариационная матрица  $Q(k)$  не является оптимальной, так как на состояние  $x(k)$  системы в рассматриваемой задаче не действует шум.

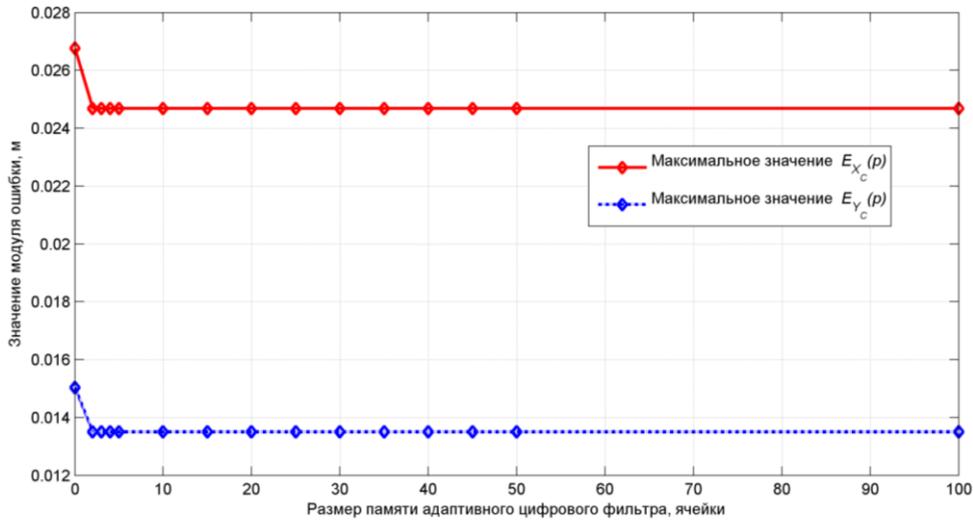


Рис. 16. Максимальные значения  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  при действии шума максимальной амплитудой 0,001 на выход  $y(k)$  системы и размере буферной памяти  $N = 0 \dots 100$  ячеек

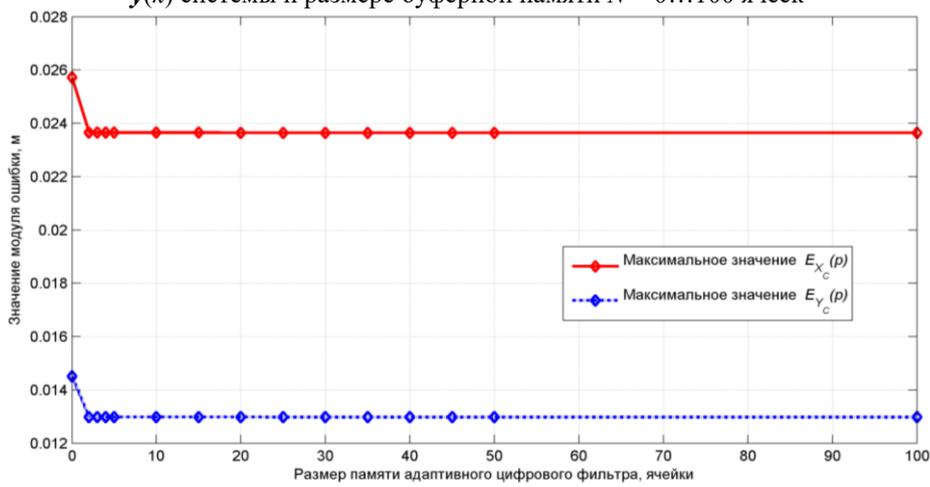


Рис. 17. Максимальные значения  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  при действии шума максимальной амплитудой 0,01 на выход  $y(k)$  системы и размере буферной памяти  $N = 0 \dots 100$  ячеек

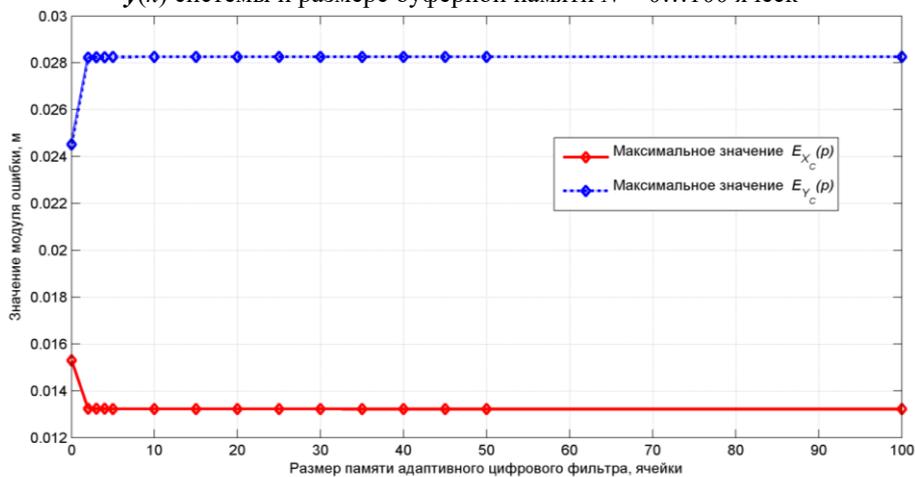


Рис. 18. Максимальные значения  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  при действии шума максимальной амплитудой 0,1 на выход  $y(k)$  системы и размере буферной памяти  $N = 0 \dots 100$  ячеек

Остальные параметры моделирования имели те же значения, что и для предыдущих вычислительных экспериментов над системами управле-

ния (рис. 3 и 4). Результаты данного моделирования приведены на рисунках 19–22 и имеют такое же представление, как результаты, показанные на рисунках 15–18.

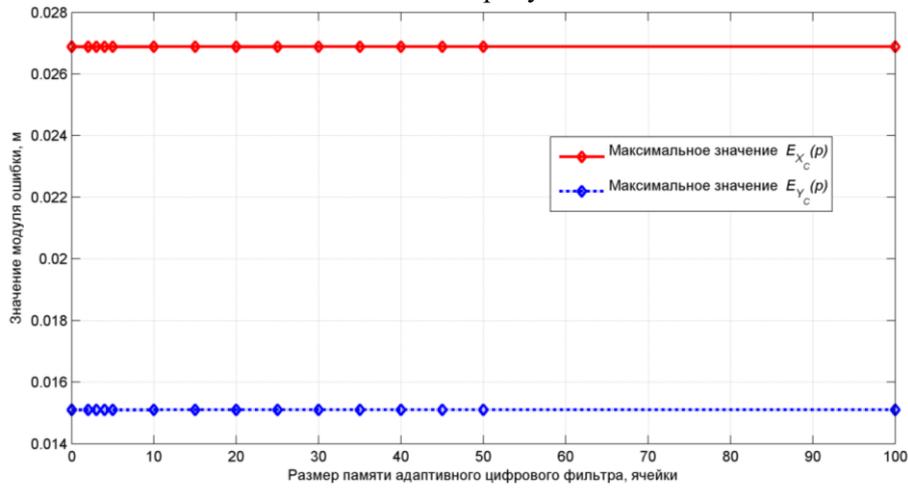


Рис. 19. Максимальные значения  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  при отсутствии действия шума на выход  $y(k)$  системы и размере буферной памяти  $N = 0 \dots 100$  ячеек

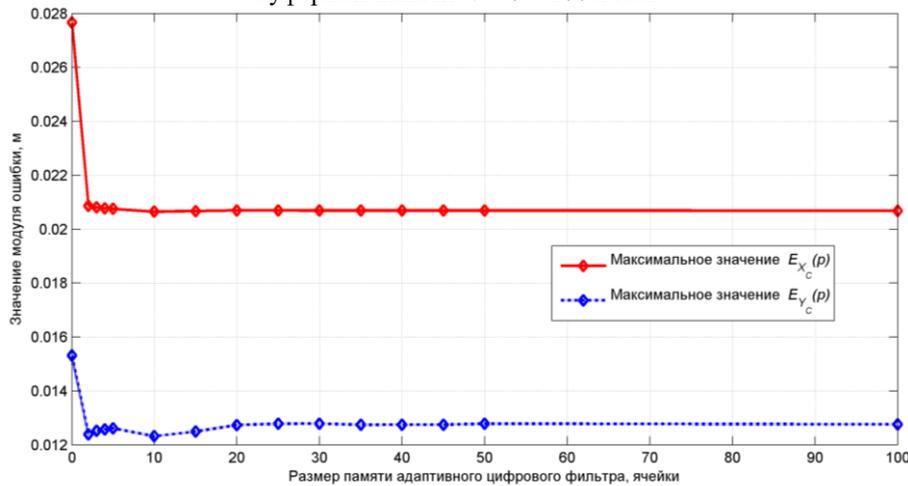


Рис. 20. Максимальные значения  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  при действии шума максимальной амплитудой 0,001 на выход  $y(k)$  системы и размере буферной памяти  $N = 0 \dots 100$  ячеек

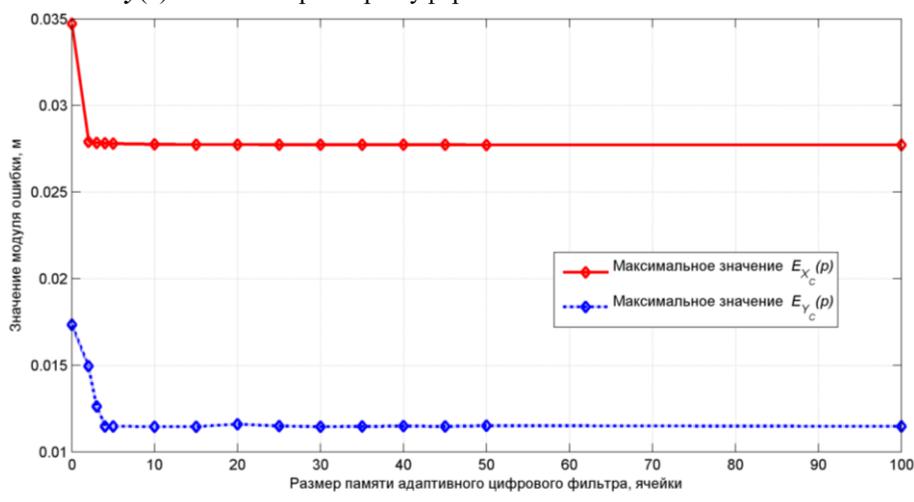


Рис. 21. Максимальные значения  $E_{X_c}$  и  $E_{Y_c}$  при действии шума максимальной амплитудой 0,01 на выход  $y(k)$  системы и размере буферной памяти  $N = 0 \dots 100$  ячеек

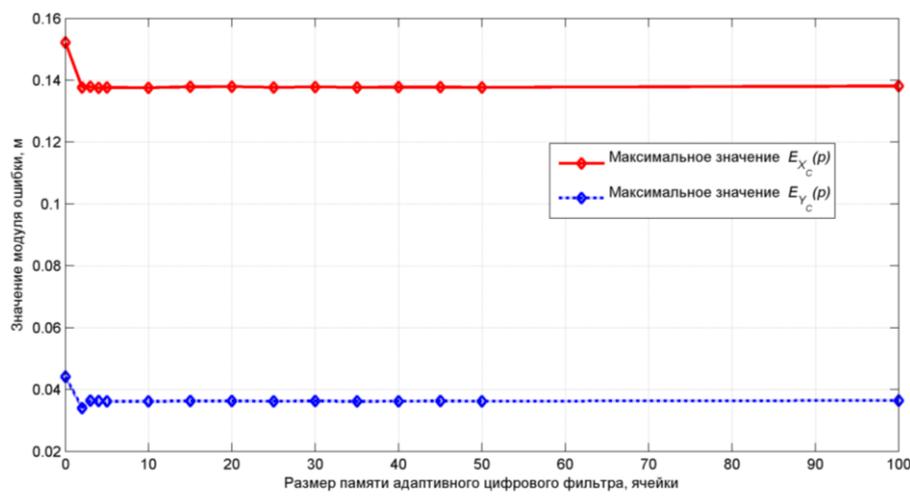


Рис. 22. Максимальные значения  $E_{x_c}$  и  $E_{y_c}$  при действии шума максимальной амплитудой 0,1 на выход  $y(k)$  системы и размере буферной памяти  $N = 0 \dots 100$  ячеек

**Выводы.** Результаты вычислительных экспериментов, представленные на рисунках 15 – 18 и рисунках 19 – 22, позволяют сделать вывод, что регулятор состояния с предложенным алгоритмом адаптации в системе управления по состоянию, содержащей систему РФК–АЦФ в качестве наблюдателя состояния объекта управления, делает возможным компенсацию ошибок работы системы управления, вызванную заданием неоптимальных ковариационных матриц  $Q(k)$  и  $R(k)$  РФК с точки зрения конкретных условий работы системы управления. При задании ковариационных матриц  $Q(k)$  и  $R(k)$ , соответствующих условиям работы системы управления, в большинстве случаев регулятор состояния с алгоритмом адаптации позволяет снизить величину ошибок работы системы управления в условиях действия шумов малой амплитуды относительно значений элементов векторов  $x(k)$  и  $y(k)$  системы. На результат управления оказывает действие алгоритм адаптации регулятора состояния, тем не менее, размер (объем) буферной памяти АЦФ системы РФК–АЦФ влияет на величину ошибок работы системы управления.

Регулятор состояния с алгоритмом адаптации для формирования вектора  $\tilde{x}(k)$  выхода (ошибки) регулятора использует выходные данные системы РФК–АЦФ: вектор  $\hat{x}(k|k)$  оценки состояния, выполненной РФК системы РФК–АЦФ, и вектор  $X_{out}(k)$  скорректированной оценки состояния, выполненной АЦФ системы РФК–АЦФ. Данный алгоритм адаптации учитывает выходные данные системы РФК–АЦФ таким образом, чтобы сформировать наиболее достоверный вектор  $\tilde{x}(k)$ .

Сочетание наблюдателя состояния и регулятора состояния в составе предлагаемой системы

управления делает возможным управление динамическими объектами с недоступными непосредственному измерению переменными состояниями и обладающими неперiodическими внешними возмущениями.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers) // Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82 (1). Pp. 35–45. DOI: 10.1115/1.3662552.
2. Kalman R.E., Busy R.S. New Results in Linear Filtering and Prediction Theory. Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers) // Journal of Basic Engineering. 1961. Vol. 83 (1). Pp. 95–108. DOI: 10.1115/1.3658902.
3. Bar-Shalom Y., Li X.R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software. John Wiley & Sons, 2001. 584 p.
4. Певзнер Л.Д. Теория систем управления. Москва: Издательство Московского государственного горного университета, 2002. 472 с.
5. Gyorgy K. The LQG Control Algorithms for Nonlinear Dynamic Systems. Procedia Manufacturing. 2019. Vol. 32. Pp. 553–563. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.252.
6. Безмен П.А. Алгоритм фильтра Калмана для комплексирования данных в системе управления мобильным роботом // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2019. №3. С. 82–87.
7. Безмен П.А. Комплексирование данных системы управления мобильным роботом с использованием расширенного фильтра Калмана //

Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. №2. С. 53–64. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-53-64.

8. Брайсон А., Хо Ю-Ши. Прикладная теория оптимального управления. Москва: Мир, 1972. 544 с.

9. Simaan M. A note on the stabilizing solution of the algebraic Riccati equation // International Journal of Control. 1974. Vol. 20. No. 2. Pp. 239–241.

10. Willems J.S. Least Squares Stationary Optimal Control and the Algebraic Riccati Equation // IEEE Transactions on Automatic Control. 1971. Vol. 16. Issue 6. Pp. 621–634.

11. Хлебников М.В., Щербаков П.С., Честнов В.Н. Задача линейно-квадратичного управления: I. Новое решение // Автоматика и телемеханика. 2015. № 12. С. 65–79. DOI: 10.1134/S0005117915120048.

12. Баландин Д.В., Коган, М.М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. Москва: Физматлит, 2007. 280 с.

13. Penrose R. A generalized inverse for matrices // Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1955. Vol. 51. issue 3. Pp. 406–413.

14. Penrose R. On best approximate solutions of linear matrix equations. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1956. Vol. 52. Issue 1. Pp. 17–19.

15. Kalman R., Ho Y., Narendra K. Controllability of linear dynamical systems. Contribution to Differential Equations. Vol. 1, Wiley, New York, 1962. Pp. 189–213.

16. Beutler F.J., Root W.L. The operator pseudoinverse in control and systems identification. Computer, Information & Control Engineering Program. The University of Michigan, 1973. 111 p.

17. Golub G.H., Reinsch C. Singular Value Decomposition and Least Squares Solutions. In: Handbook for Automatic Computation. Vol. II – Linear Algebra. Springer-Verlag, 1971. Pp. 134–151.

18. Пат. 2775514, Российская Федерация, МПК G05B 13/02. Система управления по состоянию объекта управления с наблюдателем и регулятором состояния / П.А. Безмен; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ). № 2021127025; заявл. 14.09.2021; опубл. 04.07.2022, Бюл. № 19. 26 с.

19. Пат. 2747199, Российская Федерация, МПК H03H 17/04, H03H 21/00. Цифровой фильтр для нестационарных сигналов / П.А. Безмен; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ). № 2020122203; заявл. 05.07.2020; опубл. 29.04.2021, Бюл. №13. 20 с.

20. Безмен П.А. Исследование работы расширенного фильтра Калмана, дополненного адаптивным цифровым фильтром, для комплексирования данных системы управления мобильным роботом // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. № 24(1). С. 68–89. DOI: 10.21869/2223-1560-2020-24-1-68-89.

21. Безмен П.А. Комплексирование данных системы управления мобильным гусеничным роботом // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 3. С. 89–102. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-89-102.

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022663792 Российская Федерация. Набор библиотек «РФК-АЦФ-АРС» реализации системы управления состоянием объекта / П.А. Безмен; заявитель и правообладатель П.А. Безмен. № 2022662272; заявл. 01.07.2022; опубл. 20.07.2022, Бюл. 7. Реестр программ для ЭВМ. 1 с.

#### *Информация об авторах*

**Безмен Петр Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники. E-mail: pbezmen@yahoo.com. Юго-Западный государственный университет. Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

*Поступила 05.09.2022 г.*

© Безмен П.А., 2023

**Bezmen P.A.**

Southwest State University  
E-mail: pbezmen@yahoo.com

## A CONTROL SYSTEM ON A CONTROLLED OBJECT STATE WITH AN OBSERVER AND A STATE REGULATOR

**Abstract.** *The paper proposes the model of a control system based on the controlled object state. The model includes a state observer and a state controller. The reference signal for this control system is the required values of the controlled object state variables. As a state observer of a controlled object in the control system model, the system "extended Kalman filter - adaptive digital filter" (the EKF-ADF system) is used. The structure and operation principle of the control system state controller are described. The adaptive algorithm of the control system state controller is presented.*

*The control system state controller with the adaptive algorithm uses the output data of the EKF-ADF system to form the controller output (error) vector. The output data consist of the state estimation vector performed by the EKF of the EKF-ADF system and the vector of the corrected state estimation performed by the ADF of the EKF-ADF system. The adaptive algorithm of the control system state controller takes into account the output data of the EKF-ADF system in such a way as to form the most reliable state controller output vector.*

*To confirm the effectiveness of the considered control system, the control process numerical simulation results of a mobile robot with a caterpillar mover are presented: the proposed control system simulation results are compared with the simulation results of the control system that uses the EKF as a state observer.*

*The combination of the state observer and the state regulator as part of the proposed control system makes it possible to control dynamic objects with state variables which are inaccessible to direct measurement and have non-periodic external disturbances.*

**Keywords:** *control system, robotics, extended Kalman filter, adaptive digital filter, state observer, state controller.*

### REFERENCES

1. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers), Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82 (1). Pp. 35–45. DOI: 10.1115/1.3662552
2. Kalman R.E., Busy R.S. New Results in Linear Filtering and Prediction Theory. Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers), Journal of Basic Engineering. 1961. Vol. 83 (1). Pp. 95–108. DOI: 10.1115/1.3658902
3. Bar-Shalom Y., Li X.R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software. John Wiley & Sons, 2001. 584 p.
4. Pevzner L.D. Theory of control systems [Teoriya sistem upravleniya]. Moscow: Publishing house of the Moscow State Mining University, 2002. 472 p. (rus.).
5. Gyorgy K. The LQG Control Algorithms for Nonlinear Dynamic Systems. Procedia Manufacturing. Vol. 32. 2019. Pp. 553–563. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.252
6. Bezmen P.A. The Kalman filter algorithm for data fusion of a mobile robot control system [Algoritm fil'tra Kalmana dlya kompleksirovaniya dannykh v sisteme upravleniya mobil'nym robotom]. Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2019. No. 3. Pp. 82–87. (rus.)
7. Bezmen P.A. Integration of Mobile Robot Control System Data Using the Extended Kalman Filter [Kompleksirovaniye dannykh sistemy upravleniya mobil'nym robotom s ispol'zovaniyem ras-shirennogo fil'tra Kalmana]. Proceedings of the Southwest State University. 2019. No. 2. Pp. 53–64. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-53-64 (rus.)
8. Bryson A.E., Ho Yu-Chi. Applied optimal control theory [Prikladnaya teoriya optimal'nogo upravleniya]: Translation from English. Moscow: Mir, 1972. 544 p.
9. Simaan M. A note on the stabilizing solution of the algebraic Riccati equation. International Journal of Control. 1974. Vol. 20. No. 2. Pp. 239–241.
10. Willems J.S. Least Squares Stationary Optimal Control and the Algebraic Riccati Equation. IEEE Transactions on Automatic Control. 1971. Vol. 16. issue 6. Pp. 621–634.
11. Khlebnikov M.V., Shcherbakov P.S., Chestnov V.N. Linear-quadratic regulator: I. A new solution [Zadacha lineynno-kvadraticnogo upravleniya: I. Novoye resheniye]. Automation and Remote Control. 2015. No 12. Pp. 65–79. DOI: 10.1134/S0005117915120048. (rus.)
12. Balandin D.V., Kogan, M.M. Synthesis of control laws based on linear matrix inequalities [Sintez zakonov upravleniya na osnove lineynykh matrichnykh neravenstv]. Moscow: Fizmatlit, 2007. 280 p. (rus.)

13. Penrose R. A generalized inverse for matrices. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 1955. Vol. 51. Issue 3. Pp. 406–413.

14. Penrose R. On best approximate solutions of linear matrix equations. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 1956. Vol. 52. issue 1. Pp. 17–19.

15. Kalman R., Ho Y., Narendra K. Controllability of linear dynamical systems. *Contribution to Differential Equations*. Vol. 1, Wiley, New York, 1962. Pp. 189–213.

16. Beutler F.J., Root W.L. The operator pseudoinverse in control and systems identification. *Computer, Information & Control Engineering Program*. The University of Michigan, 1973. 111 p.

17. Golub G.H., Reinsch C. Singular Value Decomposition and Least Squares Solutions. In: *Handbook for Automatic Computation*. Vol. II – Linear Algebra. Springer-Verlag, 1971. Pp. 134–151.

18. Bezmen P.A. Control system based on the state of the control object with an observer and a state controller. Patent RF, no. 2775514, 2022.

19. Bezmen P.A. Digital filter for non-stationary signals. Patent RF, no. 2747199, 2021.

20. Bezmen P.A. Investigation of the Operation of the Extended Kalman Filter Supplemented by an Adaptive Digital Filter for Integrating Data from a Mobile Robot Control System [Issledovaniye raboty rasshirennogo fil'tra Kalmana, dopolnennogo adaptivnym tsifrovym fil'trom, dlya kompleksirovaniya dannykh sistemy upravleniya mobil'nym robotom]. *Proceedings of the Southwest State University*. 2020. No. 24(1). Pp. 68–89. DOI: 10.21869/2223-1560-2020-24-1-68-89. (rus.)

21. Bezmen P.A. An integration of a mobile tracked robot control system data [Kompleksirovaniye dannykh sistemi upravleniya mobil'nym gusenichnym robotom]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 3. Pp. 89–102. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-89-102. (rus.).

22. Bezmen P.A. A set of libraries "EKF-ADF-ASR" for the implementation of the object state control system. Certificate RF of state registration of the computer program, no. 2022663792, 2022.

#### *Information about the authors*

**Bezmen, Petr A.** PhD, Assistant professor. E-mail: pbezmen@yahoo.com. Southwest State University. Russia, 305040, Kursk, st. 50 let Oktyabrya, 94.

---

*Received 05.09.2022*

#### **Для цитирования:**

Безмен П.А. Система управления по состоянию объекта управления с наблюдателем и регулятором состояния // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 1. С. 102–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-102-120

#### **For citation:**

Bezmen P.A. A control system on a controlled object state with an observer and a state regulator. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023. No. 1. Pp. 102–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-102-120

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-121-131

**\*Харламов Ю.А., Вишневский Д.А., Петров П.А., Орлов А.А.**

Донбасский государственный технический институт

\*E-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com

## РАЗВИТИЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**Аннотация.** Статья посвящена вопросу совершенствования классификации и кодирования деталей машин при автоматизированном проектировании технологических процессов их изготовления. Проанализированы подходы технологии машиностроения к классификации поверхностей деталей машин. Показана необходимость учета параметров качества поверхностных слоев при разработке технологии производства ответственных деталей. Описаны теоретические основы конструкторско-технологической классификации деталей. Рассмотрены известные подходы к оценке роли поверхностей при классификации деталей машин. Предложена система кодирования основных показателей качества поверхностных слоев. Систематизированы показатели свойств поверхностных слоев, играющие определяющее влияние на работоспособность деталей и их сопряжений. Предложена система классификации и кодирования этих показателей. Предложено включить в системы классификации деталей машин и их поверхностей коды их функционального назначения или требуемых эксплуатационных свойств. Предложены системы кодирования строения поверхностных слоев и их химического состава, показателей микрорельефа поверхности и пр. Показана необходимость учета при проектировании требований к неоднородности свойств поверхностных слоев и допустимых дефектов ответственных деталей. Предложена система кодирования основных параметров допустимых дефектов.

**Ключевые слова:** классификация; кодирование; параметры качества поверхностного слоя; поверхность; типизация; унификация; эксплуатационные свойства.

**Введение.** Развитие машиностроения и ремонтного производства во многом зависит от сокращения длительности и трудоемкости технической подготовки производства, что обуславливает необходимость дальнейшего развития и совершенствования систем автоматизированного проектирования. Ее решение обеспечивается путем комплексной автоматизации процессов проектирования (САПР) и принципов унификации и типизации [1, 2]. В известных системах САПР недостаточно эффективно применяются типовые проектные решения, обеспечивающие преемственность накопленного опыта и эффективное использование знаний [3]. Это относится к разработке и использованию унифицированных технологических процессов (ТП) изготовления деталей.

Для предприятий машиностроения и ремонтного производства характерна большая номенклатура деталей машин как объектов производства, отличающихся разнообразием конструктивно-технологических признаков и параметров. Производство деталей с требуемыми параметрами и показателями качества обеспечивается использованием различных вариантов технологий и видов оборудования. Это существенно затрудняет выбор имеющихся и разработку новых типовых и унифицированных ТП прежде всего для ответственных деталей. Используемые в настоящее время в автоматизированных системах САПР конструктивно-технологические клас-

сификаторы деталей не учитывают многие показатели их качества и, прежде всего, параметры качества поверхностных слоев (ПС).

Обоснованному оперативному заимствованию проектных решений способствует использование систем классификации и кодирования объектов производства обезличенным кодом (вне зависимости от их функционального назначения). Известный классификатор ЕСКД охватывает широкую номенклатуру деталей машин и приборов, которая по основным конструкторским принципам подразделена на шесть частей [4, 5]. Попытки внедрения ЕСКД в производство привели к разработке автоматизированных экспертных систем кодирования и классификации деталей [2, 3].

Классический подход, используемый в технологии машиностроения для выделения четырех основных видов поверхностей (исполнительные (рабочие), основные базирующие, вспомогательные базы и свободные), не обеспечивает информационные возможности разработки технологических процессов обработки отдельных поверхностей с выбором технологических упрочняющих операций. В модульной технологии [6] модули поверхностей подразделяются на три класса: базирующие (МПБ), рабочие (МНР), связующие (МПС) и деталь представляется собой совокупностью базирующих, рабочих и связующих модулей поверхностей. Однако и здесь не учитывается необходимый полноценный комплекс параметров качества ПС.



Деталь  $D$  в базе данных может быть охарактеризована и соответственно описана некоторой совокупностью (множеством) модулей поверхностей:

$$\left\{ \begin{array}{l} МПБ_1, \dots, МПБ_e, \dots, МПБ_t; МПР_1, \dots, МПР_y, \dots, МПР_u; \\ МПС_1, \dots, МПС_p, \dots, МПС_s \end{array} \right\}.$$

Здесь  $МПБ_e$ ,  $МПР_y$ ,  $МПС_p$  – модули поверхностей детали соответственно базирующие рабочие и связующие;  $t$ ,  $u$ ,  $s$  – количество модулей поверхностей детали соответственно базирующих, рабочих и связующих.

Для высоконагруженных ответственных поверхностей деталей целесообразно использовать информационные модели поверхностей, которые могут быть охарактеризованы и соответственно описаны некоторой совокупностью (множеством) признаков:

$$П = \{P_{п1}, \dots, P_{пj}, \dots, P_{пl}\}, \quad (4)$$

где  $P_{пj}$  –  $j$ -й признак поверхности;  $l$  – общее количество признаков поверхности.

**2. Целесообразность классификации конструктивно-технологических особенностей и параметров качества поверхностного слоя деталей машин.** Интенсивность отказов деталей машин связана с одним или несколькими эксплуатационными показателями (износо- и коррозионной стойкостью, прочностью и др.). В свою очередь большая часть эксплуатационных свойств деталей зависит от качества поверхностных слоев [6].

По многочисленным литературным данным [8, 9] эксплуатационные свойства деталей машин, определяющие их надежность, зависят от системы параметров качества их рабочих поверхностей: макроотклонения; волнистости; шероховатости; субшероховатости; физико-химических свойств (табл. 1). Изучением поверхностей твердого тела, в том числе деталей и рабочих органов машин, занимается ряд научных дисциплин – физика и химия поверхности твердого тела, трибология, материаловедение, теория надежности машин и др. Исследования и разработки по конструированию и технологическому обеспечению параметров поверхностных слоев сформировали обширное научно-техническое направление – инженерии поверхности [8, 9, 12, 13]. Современные методы инженерии поверхности активно внедряются в промышленности.

Развитие инженерии поверхности и ужесточение требований к обеспечению качества поверхностного слоя (ПС) обуславливает необходимость введения в маршрутные технологические процессы изготовления дополнительных технологических операций обработки и контроля поверхностей и соответствующих ПС. Это прежде всего относится к поверхностям деталей

с высокой вероятностью изнашивания и возникновения повреждений, ведущих к возникновению отказов деталей. Решение этой проблемы требует расширения номенклатуры показателей качества ПС. Информация о показателях качества поверхностей, оказывающих существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин и их соединений весьма противоречива. Коды наиболее распространенных показателей качества поверхностных слоев (ПС) [8, 9, 12, 13] приведены в таблице 1.

Полная оценка значимости и назначение параметров качества ПС деталей машин представляет весьма сложную проблему при конструкторско-технологической подготовке их производства. Существующие аналитические подходы приемлемы для ограниченного круга реальных задач. Они часто не учитывают всего комплекса технологических и эксплуатационных факторов, влияющих на надежность деталей. Поэтому для подтверждения расчетных значений параметров качества ПС наиболее ответственных деталей широко используются экспериментальные методы исследований на моделях и натуральных образцах. Наиболее распространенными являются опытно-статистические методы, основанные на обобщении опыта изготовления и эксплуатации деталей и их сопряжений с подобными и близкими значениями влияющих факторов. Особый интерес представляет статистика по надежности, полученная при эксплуатации подобных деталей, их сопряжений и условий эксплуатации.

На стадиях конструирования и анализа конструкций деталей на технологичность выявляют и уточняют реальные условия их функционирования (нагрузка, скорость, температура, окружающая среда и пр.) и требуемые показатели надежности. При этом учитывают наиболее нагруженные и подверженные интенсивному воздействию рабочей среды детали изделия. Особое внимание уделяется определению эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений, лимитирующих надежность и точность узлов и машины в целом, например, допустимый износ сопрягаемых деталей. На этой основе ведется поиск и изучение соответствующей научно-технической информации, подбор теоретических и эмпирических зависимостей и табличных данных, характеризующих качественную и количественную взаимосвязь между данными эксплуатационными свойствами и параметрами качества рабочих поверхностей. В ряде случаев выбор параметров качества рабочих поверхностей ответственных дорогостоящих деталей, обеспечивающих требуемые значения эксплуатационных свойств изделия в допустимых преде-

лах их изменения, требует проведения специальных исследований. Параметры качества поверхностного слоя, определяющие основное влияние

на эксплуатационные свойства деталей машин и их соединений, приведены в таблице 2

Таблица 1

### Кодирование основных показателей качества поверхностных слоев

Код	Обозначение	Параметр состояния поверхностного слоя
01	$H_{max}$	максимальное макроотклонение, мкм
02	$H_p$	высота сглаживания макроотклонения
03	$W_z$	средняя высота волн, мкм
04	$W_p$	высота сглаживания волнистости
05	$Sm_w$	средний шаг волн, мм
06	$Ra$	среднее арифметическое отклонение профиля, мкм
07	$Rz$	высота неровностей профиля по десяти точкам
08	$R_{max}$	наибольшая высота профиля
09	$R_p$	высота сглаживания профиля шероховатости, мкм
10	$tp$	относительная опорная длина профиля, %
11	$Sm$	средний шаг неровностей профиля, мм
12	$S$	средний шаг местных выступов профиля, мм
13	$R_{max}'$	наибольшая высота профиля субшероховатости
14	$Sm'$	средний шаг неровностей профиля субшероховатости
15	$\sigma_{ост}$	остаточные напряжения, МПа
16	$h_\sigma$	глубина залегания остаточных напряжений, мм
17	$H_{\mu 0}$	поверхностная микротвердость
18	$h_\mu$	толщина поверхностного слоя
19	$\varepsilon$	упругая деформация кристаллической решетки
20	$l_3$	размер, форма и распределение зерен по слою и их кристаллографическая ориентация
21	$\rho_D$	плотность дислокаций

Таблица 2

### Коды параметров качества поверхностного слоя, определяющие основное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин и их соединений

Эксплуатационные свойства	Коды параметров поверхностного слоя
Контактная жесткость при нагружении: первом повторном	<b>02; 04; 09; 10; 15; 17; 19; 20; 21</b> <b>03; 09; 10; 11; 19; 20; 21</b>
Коэффициент трения	<b>04; 09; 10; 17</b>
Износостойкость	<b>02; 04; 09; 10; 11; 15; 19; 20; 21</b>
Герметичность соединений	<b>02; 04; 09; 10; 11</b>
Прочность посадок	<b>02; 04; 09; 10</b>
Прочность деталей	<b>09; 11; 16; 18; 20; 21</b>
Усталостная прочность	<b>08; 11; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21</b>
Коррозионная стойкость	<b>06/07; 10; 11; 13; 14; 15; 19; 20; 21</b>
Поверхностная теплопроводность	<b>01; 02; 03; 04; 06/07; 09; 10; 13</b>
Термостойкость	<b>20; 21</b>

Выбор параметров качества ПС желательно выполнять с использованием параллельного проектирования, совмещающего: конструирование и выбор основного материала детали, определение размеров и их точности, параметров состояния поверхностного слоя и пр. Распространена практика, когда при конструировании деталей машин

обычно учитывается влияние состояния поверхности на циклическую прочность и коррозионную стойкость [14]. Причем под качеством ПС часто понимают параметры макро- и микрогеометрии, точность размеров поверхности и твердость. Однако для нагруженных поверхностей

ответственных деталей важную роль играют физико-механические характеристики ПС: степень и глубина наклепа, остаточные напряжения, искажения кристаллической решетки, плотность дислокаций, структурно-фазовые превращения, накопление пластической деформации, изменение химического состава и др. [8–10, 15]. Это обуславливает целесообразность разработки теоретических и поиск эмпирических зависимостей между параметрами качества ПС и точности обработки и эксплуатационными свойствами деталей машин. В настоящее время подобные зависимости существуют для весьма ограниченных условий и параметров эксплуатации деталей машин.

Решение этих задач часто связано преодолением ряда противоречий и ограничений. Так, например, требуемые физико-механические свойства поверхностного слоя детали не могут быть достигнуты при заданном ее основном материале, отсутствии соответствующих марок сталей, отсутствии технологических возможностей достижения выбранных точности размеров и параметров качества поверхностного слоя и пр. Для высоконагруженных ответственных деталей и сопряжений часто необходимо проведение оригинальных теоретических и экспериментальных исследований для определения влияния различных параметров качества поверхностного слоя на те или иные эксплуатационные свойства.

Преобладающими в производстве точных ответственных деталей являются операции механической обработки лезвийным и абразивным инструментом. Однако во многих случаях совершенствование этих операций не приводит к достижению требуемых параметров ПС. Этим объясняется более широкое применение известных и разработка новых методов инженерии поверхности – нанесения защитных и функциональных покрытий, модифицирования ПС, обработки высококонцентрированными источниками энергии и пр. Тем не менее, не исключается и даже затрудняется предварительная и последующая после выполнения операций поверхностного упрочнения размерная обработка поверхностей механическими и другими методами. Таким образом, достижение высокого качества машин, и прежде всего их надежности, требует решения сложных задач обеспечения соответствующих параметров качества поверхностных слоев.

Разработка технологических процессов (ТП) изготовления деталей с поверхностным упрочнением затруднена ограниченностью сведений об особенностях их обработки. Это требует корректировки существующих САПР ТП ответственных деталей для более плотного учета конструктивно-технологических особенностей строения

поверхностных слоев и параметров их качества и прежде всего классификации и кодирования поверхностей и деталей.

**3. Классификация и кодирование деталей машин по типам и параметрам качества поверхностных слоев.** ИМД должны обеспечивать достаточную информативность о наличии поверхностей с высокими требованиями к качеству поверхностных слоев. Принятая система классификации и кодирования деталей должна иметь коды, характеризующие строение и требуемые параметры ПС. Причем система кодирования должна обеспечивать возможность расширения множества кодируемых деталей, имеющих поверхности, подвергаемые при эксплуатации интенсивным нагружению и воздействию окружающей среды.

В классификаторе ЕСКД [4] детали подразделяются на пять классов, главным образом по геометрическим признакам, а также их служебному назначению и наличию определенных конструктивных элементов (зубчатое зацепление). При этом не учитываются требования к точности формы и размеров деталей, строению и параметрам поверхностных слоев. Это касается, прежде всего, деталей машин с большими размерами и массой, со сложной геометрией, при наличии поверхностей с повышенными требованиями к качеству ПС, при использовании в качестве основного материала труднообрабатываемых сплавов, при наличии защитных и функциональных покрытий и модифицированных поверхностных слоев, обработка которых имеет специфические особенности [16–18].

Анализ конструкций деталей на технологичность должен включать проверку соответствия строения и параметров качества поверхностных слоев их функциональному назначению. Условия работы технических поверхностей весьма разнообразны и развитие фундаментальных наук о поверхности твердого тела стимулировало разработку поверхностных слоев с разнообразными эксплуатационными свойствами. Кодирование поверхности по ее функциональному назначению или эксплуатационным свойствам выполняется двумя разрядами (табл. 3), а в случае многофункционального назначения комплексом таких разрядов. По функциональному назначению и требуемым эксплуатационным свойствам осуществляют выбор и проверку назначения конструктивно-технологических особенностей и параметров состояния поверхностного слоя. Для этого необходимо использование и создание соответствующих баз данных.

Методы инженерии поверхности позволяют создавать различные конструкции поверхност-

ных слоев из различных материалов. Их кодирование выполняется одной цифрой по данным таблиц 4 и 5.

Каждый из параметров геометрии поверхности и физико-химического состояния поверхностного слоя кодируется одной цифрой по данным таблиц 6 и 7.

Таблица 3

### Кодирование поверхностей по их требуемым эксплуатационным свойствам

Код	Требуемое эксплуатационное свойство поверхности
00	Контактная жесткость
01	Износостойкость
02	Антифрикционность
03	Фрикционность
04	Герметичность соединений
05	Прочность посадок
06	Прочность деталей
07	Усталостная прочность
08	Коррозионная стойкость
09	Поверхностная теплопроводность (термическое сопротивление)
10	Термостойкость (жаростойкость)
11	Антиадгезионность
12	Термобарьерные свойства
13	Диэлектрические свойства
14	Электропроводность
15	Интенсификация теплообмена
16	Уплотняемость соединений
17	Восстановление размеров и свойств поверхности
18	Радиационная стойкость
19	Повышение адгезионных свойств сухих поверхностей
20	Антипригарные свойства
21	Самовосстанавливаемость
22	Супергидрофобность
23	Контролируемая смачиваемость
24	Снижение гидросопротивления
25	Противообрастающие свойства
26	Работоспособность в условиях вакуума
27	Сенсорные свойства
28	Оптические свойства
29	Многофункциональные свойства
30	Прочие свойства и функции

Таблица 4

### Кодирование типа поверхностного слоя (ПС)

Код	Тип поверхностного слоя
0	ПС основного материала в состоянии предшествующей обработки
1	Модифицированный ПС основного материала (ОМ)
2	Дискретно модифицированный ПС ОМ
3	Сплошное однослойное покрытие
4	Сплошное покрытие с подслоем
5	Сплошное композиционное покрытие
6	Сплошное градиентное покрытие
7	Сплошное многослойное покрытие
8	Дискретное покрытие
9	Комбинированный ПС (сочетание покрытий с модифицированием ПС)

Поверхности, полученные большинством методов размерной и упрочняющей обработки, характеризуются образованием существенной неоднородности параметров качества ПС (химического, структурного и фазового состава, остаточных напряжений, микротвердости, параметров микро- и субшероховатости и др.). Например, при шлифовании поверхностей качения колец и роликов подшипников качения распространенными дефектами являются: трооститное пятно,

забоина, металлическая, закалочная или шлифовальная трещины, штриховой или пятнистый прижоги [19, 20]. В процессе профильной механической обработки поверхностей сложного профиля деталей образуются локальные технологические концентраторы напряжений, способствующие зарождению, росту усталостных трещин и последующему разрушению деталей в эксплуатации [21].

Таблица 5

#### Кодирование материала поверхностного слоя (ПС) по химическому составу

Код	Материал поверхностного слоя (ПС)
0	Основной материал (в соответствии с соответствующими таблицами кодирования)
1	Покрытие из Fe, Ni, Cr, Al, Ti и сплавов на их основе
2	Покрытие из самофлюсующихся сплавов систем Ni-Cr-B-Si-C и Fe-Cr-B-Si-C
3	Покрытие из Cu, Pb, Cd, Sn, бронзы, баббитов
4	Покрытие из Al, Zn
5	Покрытие из оксидов Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , CaO, Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
6	Покрытие из карбидов вольфрама в смеси с Co, самофлюсующимися сплавами, интерметаллидами Al, Ti, Ni
7	Покрытие из карбидов хрома и титана в смеси с самофлюсующимися сплавами, интерметаллидами Al, Ni, Ti и никельхромистыми сплавами
8	Покрытие из тугоплавких металлов W, Mo, Nb, Ta в чистом виде и в смеси с самофлюсующимися сплавами
9	Покрытие из керметов на основе смесей BN-Al-NiCr, Mg-ZrO <sub>2</sub> -NiCr, MgO-ZrO <sub>2</sub> с Al и Ni, графита с Al, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ni, алюминидом никеля, ZrO <sub>2</sub> с алюминидом никеля

Таблица 6

#### Кодирование параметров геометрии поверхности

Код параметра	Hmax, мкм	Wz, мкм	Sm <sub>w</sub> , мм	Ra, мкм	Rp, мкм	Sm, мм	S, мм
0	400...500	50...60	12...15	25...40	100...125	10...12,5	3,5...5
1	300...400	40...50	9...12	16...25	85...100	8...10	2,75...3,5
2	250...300	30...40	6,5...9	12...16	60...80	6...8	2...2,75
3	200...250	20...30	4,5...6,5	8...12	50...60	4...6	1,25...2
4	150...200	15...20	3...4,5	5...8	40...50	2,5...4	0,75...1,25
5	100...150	10...15	2...3	2,5...5	30...40	1,25...2,5	0,5...0,75
6	50...100	5...10	1,2...2	1,6...2,5	20...30	0,5...1,25	0,25...0,5
7	20...50	3...5	0,4...1,2	0,8...1,6	10...20	0,2...0,5	0,032...0,25
8	10...20	1,5...3	0,2...0,4	0,1...0,8	5...10	0,032...0,2	0,016...0,032
9	3...10	0,08...1,5	0,08...0,2	0,01...0,1	0,032...5	0,0006...0,032	0,002...0,016

Таблица 7

#### Кодирование параметров физико-химического состояния поверхностного слоя

Код параметра	$\pm\sigma_{ост}$ , МПа	h <sub>б</sub> , мм	u <sub>н</sub> , %	h <sub>н</sub> , мм
0	500...600	1,5...2,0	65...80	2,5...4
1	450...500	1...1,5	55...65	1,5...2,5
2	400...450	0,75...1,0	45...55	1...1,5
3	350...400	0,5...0,75	35...45	0,5...1
4	300...350	0,4...0,5	25...35	0,25...0,5
5	250...300	0,3...0,4	20...25	0,15...0,25
6	200...250	0,2...0,3	15...20	0,05...0,15
7	150...200	0,1...0,2	10...15	0,02...0,05
8	100...150	0,01...0,1	5...10	0,01...0,02
9	60...100	0,005...0,01	0...5	0,005...0,01

Локальные дефекты и неоднородность физико-химического состояния ПС также влияют на работоспособность поверхностей деталей, работающих в сложных условиях эксплуатации. Основными видами дефектов поверхности являются [22]: *углубления* (риски, царапины, трещины, поры, раковины, разрывы, расщелины, щели (трещины), закругления, выбоины); *выпуклости* (наросты, вздутия, чешуйки, включения, заусенцы, налеты), *комбинированные* (кратеры,

нахлестки, задиры, остатки стружки), поверхностные и внешнего вида (отпечатки, разрушения и разъедания, корродирование, точечная коррозия, волосные трещины, пятна, обесцвечивание, полосы, слоистость, шелушение). Для наиболее нагруженных поверхностей ответственных деталей машин возможно также нормирование параметров допустимых дефектов поверхности. Один из возможных вариантов перечня параметров допустимых дефектов поверхности приведен в таблице 8.

Таблица 8

### Перечень параметров допустимых дефектов поверхности

№ п/п	Параметры допустимых дефектов поверхности
1	Вид допустимого дефекта
2	Относительный размер дефектов
3	Общее число допустимых дефектов на данной поверхности детали с учетом установленных ограничений
4	Число допустимых дефектов на единицу площади поверхности
5	Общая площадь допустимых дефектов поверхности с учетом установленных ограничений
6	Площадь единичного дефекта поверхности, спроектированная на поверхность
7	Длина дефекта
8	Ширина дефекта
9	Форма и четкость границы пятна дефекта
10	Ориентация дефекта на поверхности
11	Высота (глубина) дефекта
12	Группирование и периодичность дефектов

**Заключение.** Разработаны принципы и методика классификации и кодирования поверхностей деталей машин на основе их конструктивно-технологических особенностей и качества поверхностных слоев. Применение предложенных принципов дополнительной конструкторско-технологической классификации деталей машин позволяет: 1) присваивать кодовые обозначения типовым обрабатываемым поверхностям с учетом их функционального назначения по условиям работы в процессе эксплуатации машины и выбора оптимальных конструктивно-технологических решений; 2) выполнять анализ конструкций деталей на технологичность по обеспечению их надежности и предупреждения их физических отказов, развивающихся в поверхностных слоях; 3) систематизировать опыт создания и применения поверхностно упрочненных деталей машин; 4) для типизации технологических процессов распределять детали по типам, видам, функциональному назначению и требуемым строению и показателям качества поверхностных слоев; 5) стимулировать разработку и применение технологий поверхностного упрочнения деталей; 6) совершенствовать методологию автоматизированного проектирования технологических процессов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 434 с.
- Акулович Л.М., Шелег В.К. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении. М.: Новое знание, 2012. 488 с.
- Епифанов В.В., Афанасьев А.Н. Автоматизированная система кодирования и классификации объектов производства // Автоматизация процессов управления. 2017. № 3 (49). С.49–55.
- Классификатор ЕСКД. Классы 71, 72, 73, 74, 75. Иллюстрированный определитель деталей. М.: Изд-во стандартов, 1988. 401 с.
- Технологический классификатор деталей машиностроения и приборостроения. М.: Изд-во стандартов, 1988. 256 с.
- Суслов А.Г. Наукоемкие технологии в машиностроении. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.
- Кудряшов Е.А., Алтухов А.Ю., Лунин Д.Ю. Технологический классификатор деталей и поверхностей, подлежащих обработке резанием // Обработка металлов. 2009. №. (45). С. 3–8.
- Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.

9. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.

10. Вивденко Ю.Н., Ляшков А.А., Резин С.А., Кусик Б.В. Конструкторско-технологическая классификация деталей как исходная база технологии их изготовления // Омский научный вестник. 2007. № 2. С.106–108.

11. Ширялкин А. Ф., Угасин А. Н. Разработка методики классификации и кодирования информации о детали для технической подготовки и управления производством в авиастроении // Вестник УлГТУ. 2012. №2. С.24–31.

12. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.

13. Харламов Ю.А. Основы инженерии поверхностей трения. Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 288 с.

14. Орлов П.И. Основы конструирования: справочно-методическое пособие. Книга 1. М.: Машиностроение, 1988. 560 с.

15. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения: монография. 2-е изд. М.; Вологда: Инфа-Инженерия, 2021. 356 с.

16. Харламов Ю.А., Хейфец М.Л. Формирование газотермических покрытий при производстве деталей; Нац. Акад. наук Беларуси, Отд. Физ.-техн. Наук, Нац. акад. наук Украины, Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля. Минск: Белорусская наука, 2020. 416 с.

17. Харламов Ю.О. Обробка деталей при відновленні і зміцненні : Навчальний посібник. Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2007. 500 с.

18. Кожуро Л.М. Обработка износостойких покрытий. Мн.: Дизайн ПРО, 1997. 208 с.

19. Шумарова О.С., Игнатъев С.А., Самойлова Е.М. Автоматизация распознавания дефектов шлифовальных поверхностей деталей подшипников при вихретоковом контроле с обоснованием выбора вида вейвлета // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2015. № 1 (33). С. 121–132.

20. Горбунов В.В., Самойлова Е.М., Игнатъев А.А. Автоматизация вихретокового контроля поверхностного слоя деталей подшипников с применением технологии нейронных сетей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2016. №4 (40). С. 114–122. DOI 10.21685/2072-3059–2016-4-11

21. Макаров В.Ф., Никитин С.П., Песин М.В., Горбунов А.С. Влияние локальных технологических концентраторов напряжений на эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей // Научно-технические технологии в машиностроении. 2017. № 5. С. 31–37. DOI: 10.12737/article\_591947e238a398.97451989

22. Табенкин А.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт. Санкт-Петербург: изд-во политехн. ун-та, 2007. 136 с.

#### *Информация об авторах*

**Харламов Юрий Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры машин металлургического комплекса. E-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com. Донбасский государственный технический институт. Луганская Народная Республика, 94204, Алчевск, пр. Ленина, 16.

**Вишневский Дмитрий Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры машин металлургического комплекса. E-mail: dimavish.79@mail.ru. Донбасский государственный технический институт. Луганская Народная Республика, 94204, Алчевск, пр. Ленина, 16.

**Петров Павел Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры машин металлургического комплекса. E-mail: pavelpetrov@list.ru. Донбасский государственный технический институт. Луганская Народная Республика, 94204, Алчевск, пр. Ленина, 16.

**Орлов Андрей Андреевич**, аспирант кафедры машин металлургического комплекса. E-mail: orlov.orlov-andrey193@yandex.ru. Донбасский государственный технический институт. Луганская Народная Республика, 94204, Алчевск, пр. Ленина, 16.

---

*Поступила 17.06.2022 г.*

© Харламов Ю.А., Вишневский Д.А., Петров П.А., Орлов А.А., 2023

\*Kharlamov Yu.A., Vishnevskiy D.A., Petrov P.A., Orlov A.A.

Donbass State Technical University

\*E-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com

## DEVELOPMENT OF DESIGN-ENGINEERING CLASSIFICATION OF MACHINE PARTS

**Abstract.** The problems of classification and coding of machine parts in computer-aided design systems of technological processes are described. The approaches of mechanical engineering technology to the classification of surfaces of machine parts are analyzed. It is shown that it is necessary to take into account the quality parameters of the surface layers when developing the technology for the production of critical parts. The theoretical foundations of the design and technological classification of parts are described. The existing approaches to the assessment of the role of surfaces in the classification of machine parts in existing automation systems for the design of technological processes are considered. A system of coding the main indicators of the quality of surface layers is proposed. The quality parameters of the surface layer are considered, which have a major impact on the operability and various operational properties of parts, including contact stiffness, wear resistance, static and fatigue strength, tightness of interfaces, etc. A system of classification and coding of types and quality parameters of surface layers of machine parts is proposed. It is proposed to apply coding of surfaces of machine parts according to their functional purpose or operational properties. The necessity of taking into account the requirements for the heterogeneity of the properties of surface layers and permissible defects of critical parts in the design is shown.

**Keywords:** classification, coding, quality parameters of surface layer, surface, typing, unification, operational properties.

### REFERENCES

1. Norenkov I.P. Basis of computer-aided design [Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya]. M.: MSTU named after N.E.Bauman, 2009. 434 p. (rus)
2. Akulovich L.M. Basis of computer-aided design of technological processes in mechanical engineering [Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii]. M.: Novoe znanie, 2012. 488 p. (rus)
3. Epifanov V.V. Automated system of coding and classification of production objects [Avtomatizirovannaiya sistema kodirovaniya i klassifikacii ob'ektov proizvodstva]. Automated Management Processes. 2017. No. 3(49). Pp. 49–55. (rus)
4. Classifier of ESKD. Classes 71, 72, 73, 74, 75. Illustrated parts identifier [Klassifikator ESKD. Klassy 71, 72, 73, 74, 75. Illustrirovannyj opredelitel' detalej]. M.: Publishing House of Standards, 1988. 401 p. (rus)
5. Technological classifier of mechanical engineering and instrument parts [Tekhnologicheskij klassifikator detalej mashinostroeniya i priborostroeniya]. M.: Publishing House of Standards, 1988. 256 p. (rus)
6. Suslov A.G. High-tech technologies in mechanical engineering [Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii]. M.: Mashinostroenie, 2012. 528 p. (rus)
7. Kudryashov E.A., Altukhov A.Yu., Lunin D.Yu. Technological classifier of parts and surfaces to be processed by cutting [Tekhnologicheskij klassifikator detalej i poverhnostej, podlezhashchih obrabotke rezaniem]. Metal processing. 2009. No. (45). Pp. 3–8. (rus)
8. Engineering of the surface of parts [Inzheneriya poverhnosti detalej]. Collective auth.; edited by A.G. Suslov. M.: Mechanical Engineering, 2008. 320 p. (rus)
9. Suslov A.G. The quality of the surface layer of machine parts [Kachestvo poverhnostnogo sloya detalej mashin]. M.: Mechanical Engineering, 2000. 320 p. (rus)
10. Vivdenko Yu.N., Lyashkov A.A., Rezin S.A., Kusik B.V. Design and technological classification of parts as the initial basis of their manufacturing technology [Konstruktorsko-tekhnologicheskaya klassifikaciya detalej kak iskhodnaya baza tekhnologii ih izgotovleniya]. Omsk Scientific Bulletin. 2007. No. 2. Pp.106–108. (rus)
11. Shiryalkin A.F., Ugasin A.N. Development of methods of classification and coding of information about parts for technical training and production management in aircraft engineering [Razrabotka metodiki klassifikacii i kodirovaniya informacii o detali dlya tekhnicheskoy podgotovki i upravleniya proizvodstvom v aviastroenii]. Bulletin of UISTU. 2012. No. 2. Pp. 24–31. (rus)
12. Sulima A.M. Surface layer and operational properties of machine parts [Poverhnostnyj sloj i ekspluatacionnye svoystva detalej mashin]. M.: Mechanical Engineering, 1988. 240 p. (rus)
13. Kharlamov Yu.A. Fundamentals of engineering of friction surfaces [Osnovy inzhenerii

poverhnostej treniya]. Vologda: Infra-Engineering, 2022. 288 p. (rus)

14. Orlov P.I. Fundamentals of design: a reference manual. Book 1 [Osnovy konstruirovaniya: spravochno-metodicheskoe posobie. Kniga 1]. Moscow: Mechanical Engineering, 1988. 560 p. (rus)

15. Bezyagny V.F. Similarity method in mechanical engineering technology: monograph. 2nd ed [Metod podobiya v tekhnologii mashinostroeniya: monografiya. 2-e izdanie]. M.; Vologda: Infa-Engineering, 2021. 356 p. (rus)

16. Kharlamov Yu.A., Heifetz M.L. Formation of gas-thermal coatings in the production of parts [Formirovanie gazotermicheskikh pokrytij pri proizvodstve detalej]. Nats. Academy of Sciences of Belarus, Department of Physics and Technology. Sciences, Nats. Academy of Sciences of Ukraine, V. N. Bakul Institute of Superhard Materials. Minsk: Belorusskaya navuka, 2020. 416 p. (rus)

17. Kharlamov Yu.A. Processing of parts at the recovery and hardening : Study guide. Luhansk: Publishing house of the East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl, 2007. 500 p. (ukr)

18. Kozhuro L.M. Processing of wear-resistant coatings [Obrabotka iznosostojkikh pokrytij]. Mn.: Design PRO, 1997. 208 p. (rus)

19. Shumarova O.S., Ignatiev S.A., Samoylova E.M. Automation of recognition of defects of grinding surfaces of bearing parts during eddy current control with justification of the choice of the type of

wavelet [Avtomatizaciya raspoznavaniya defektov shlifoval'nyh poverhnostej detalej podshipnikov pri vihretokovom kontrole s obosnovaniem vybora vida vejjvleta]. News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences. 2015. No. 1 (33). Pp. 121–132. (rus)

20. Gorbunov V.V., Samoiloa E.M., Ignatiev A.A. Automation of eddy current control of the surface layer of bearing parts using neural network technology [vtomatizaciya vihretokovogo kontrolya poverhnostnogo sloya detalej podshipnikov s primeneniem tekhnologii neironnyh seteij]. News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences. 2016. No. 4 (40). Pp. 114–122. DOI 10.21685/2072-3059-2016-4-11 (rus)

21. Makarov V.F., Nikitin S.P., Pesin M.V., Gorbunov A.S. The influence of local technological stress concentrators on the operational properties of machined parts [Vliyanie lokal'nyh tekhnologicheskikh koncentratorov napryazhenij na ekspluatacionnye svoystva obrabatyvaemyh detalej]. High-tech technologies in mechanical engineering. 2017. No. 5. Pp. 31–37. DOI: 10.12737/article\_591947e238a398.97451989 (rus)

22. Tabenkin A.N. Roughness, undulation, profile. International experience [SHerohovatos', volnistost', profil'. Mezhdunarodnyj opyt]. St. Petersburg: Publishing house of the Polytechnic University, 2007. 136 p. (rus)

#### *Information about the authors*

**Kharlamov, Yuri A.** DSc, Professor. E-mail: yuri.kharlamov@gmail.com. Donbass State Technical University. Lugansk People's Republic, 94204, Alchevsk, Lenin ave., 16.

**Vishnevskiy, Dmitry A.** DSc, Assistant Professor. E-mail: dimavish.79@mail.ru. Donbass State Technical University. Lugansk People's Republic, 94204, Alchevsk, Lenin ave., 16.

**Petrov, Pavel A.** PhD, Assistant Professor. E-mail: pavelpetrov@list.ru. Donbass State Technical University. Lugansk People's Republic, 94204, Alchevsk, Lenin ave., 16.

**Orlov, Andrei A.** Postgraduate student. E-mail: orlov.orlov-andrey193@yandex.ru. Donbass State Technical University. Lugansk People's Republic, 94204, Alchevsk, Lenin ave., 16.

*Received 17.06.2022*

#### **Для цитирования:**

Харламов Ю.А., Вишнеvский Д.А., Петров П.А., Орлов А.А. Развитие конструкторско-технологической классификации деталей машин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 1. С. 121–131. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-121-131

#### **For citation:**

Kharlamov Yu.A., Vishnevskiy D.A., Petrov P.A., Orlov A.A. Development of design-engineering classification of machine parts. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 1. Pp. 121–131. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-121-131

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-132-143

*\*Григоренко А.А., Шопина Е.В.**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**\*E-mail: grigorenko1998@yandex.ru*

## ВЫПОЛНЕНИЕ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНА И АДАПТАЦИЯ К ИЗГОТОВЛЕНИЮ ПОВОРОТНОГО КУЛАКА. ЧАСТЬ I

**Аннотация.** В статье описано вычисление входных параметров для статического прочностного расчета или генеративного дизайна поворотного кулака гоночного болида класса Formula Student. Исходными данными являлись: габаритные и присоединительные размеры колесного диска и шины, ступицы и тормозного диска, величина силы, действующей на пятно контакта колеса с дорогой, величина силы трения скольжения между тормозным диском и тормозными колодками, сила, действующая на крепление рулевой тяги, координаты расположения креплений шаровых шарниров и тормозного суппорта. При расчетах были подобраны подшипники и вычислены проекций сил на оси координат, которые необходимо приложить к детали для моделирования рабочих нагрузок. Расчет выполнялся методами статики. В итоге было получено шесть случаев нагрузки, моделирующих работу в правых и левых поворотах с избыточной и недостаточной поворачиваемостью, а также работу при торможении с максимальным отрицательным ускорением. Так же была построена 3D модель поворотного кулака, обладающего избыточной прочностью (коэффициент запаса прочности более 6). Были определены величины отступов, которые задают размер неизменяемых областей, которые не дают алгоритму генеративного дизайна вычитать материал из важных конструктивных элементов детали. Величины отступов были проверены при помощи дополнительных конечно-элементных расчетов.

**Ключевые слова:** статический расчет, поворотный кулак, случаи нагрузки.

**Введение.** Поворотный кулак, в подвеске на двойных поперечных рычагах, служит для крепления подшипников колесного узла, шаровых шарниров рычагов и рулевой тяги, а также для крепления тормозного суппорта. В гоночных или спортивных автомобилях, предназначенных для участия в спортивных соревнованиях, уменьшение массы поворотного кулака снизит общую массу транспортного средства и снизит величины сил инерции, возникающих при работе подвески [1, 2]. При низком весе, поворотный кулак должен обладать и достаточной прочностью [3]. Для ее обеспечения, при проектировании необходимо проводить проверочные расчеты. При достаточной точности расчетов можно получить конструкцию, наиболее близкую к идеальному сочетанию массы и прочности.

**Материалы и методы.** Исходными данными служат габаритные и присоединительные размеры колесного диска и шины (в ходе проектирования использовались 3D модели заводских изделий), ступицы и тормозного диска (использовались 3D модели ранее спроектированных деталей), величина силы, действующей на пятно контакта колеса с дорогой (максимальна при прохождении поворота для внешнего колеса, включает вертикальную и горизонтальную составляющую, вертикальная направлена вверх, горизонтальная направлена в центр проходимого поворота), величина силы трения скольжения между тормозным диском и тормозными колодками

(направлена по касательной к окружности тормозного диска, максимальное значение принимает перед проскальзыванием шины по дорожному полотну, так коэффициент силы трения покоя выше коэффициента трения скольжения), сила, действующая на крепление рулевой тяги (препятствует самопроизвольному повороту поворотного кулака, направлена вдоль оси рулевой тяги, так как она имеет шарнирное крепление с обоих концов), координаты расположения креплений шаровых шарниров и тормозного суппорта (были определены геометрически при выборе оптимальной геометрии подвески). В данном случае:

1) Верхнее крепление шарового шарнира (А) – два резьбовых отверстия под винты, крепящие съемный кронштейн регулировки развала, с координатами -17 мм; -1.5 мм; 108 мм и -17 мм; -33,5 мм; 108 мм.

2) Нижнее крепление шарового шарнира (В) – два соосных отверстия под болт, крепящий более нагруженный нижний рычаг (в подвеске на двойных поперечных рычагах типа Push rod, тяга от упругого элемента приходит на нижний рычаг), с координатами -35 мм; 0 мм; -100 мм.

3) Крепление тормозного суппорта – две проушины с резьбовыми отверстиями под болты с координатами (С) -33.5 мм; -51 мм; 1 мм и (D) -33.5 мм; -62 мм; 49 мм.

4) Посадочные отверстия подшипников (Е и F) – ось отверстия совпадает с осью Х.

5) Крепление рулевой тяги – две проушины со сквозными соосными отверстиями под болт (G) – 19 мм; 58 мм; 0 мм.

Координаты отверстий указаны в виде расстояний в миллиметрах по осям X; Y; Z для середины осевого отрезка отверстия.

6) Усилия, действующие на пятно контакта [4, 5],  $X=2940\text{H}$  и  $Y=2940\text{H}$ .

7) Момент силы трения между диском и тормозными колодками в соответствии с характеристиками тормозных колодок (значение коэффициента трения, указанное на сайте производителя)  $P=481.8\text{H}\cdot\text{м}$  [6].

8) Сила, действующая вдоль оси рулевой тяги  $S=1470\text{H}$ .

**Основная часть.** Рассмотрим процесс проектирования поворотного кулака на примере.

I этап. Подбор подшипника по грузоподъемности и расчетному сроку службы. Максимальная нагрузка рассчитывается в соответствии со схемой (рис. 1). Жирная черная линия на рисунке 1 – это абсолютно жесткая рама, моделирующая при расчете соединенные между собой шину (серый элемент со штриховкой крест-накрест), колесный диск (белый элемент) и ступицу (зеленый элемент), передающие усилия и изгибающие моменты от пятна контакта к подшипникам. Подшипники в данном случае должны воспринимать

как радиальную, так и осевую нагрузки, поэтому выбор будет осуществляться среди радиально-упорных шариковых подшипников. Тонкие черные линии, проведенные из центров шариков, на рисунке приходят в точки опор подшипников. Угол наклона линий совпадает с углом контакта подшипников (в данном случае  $26^\circ$ ). Подшипники данной конструкции могут воспринимать осевую нагрузку только в одном направлении, следовательно, реакция по оси X будет возникать только в одной из опор. Сначала составляются три уравнения статики для сумм сил по осям X и Z, и для суммы моментов сил относительно оси Y. После составления уравнений были выражены искомые реакции в точках опор подшипников (1) [7].

$$\begin{cases} R_{ax} = X \\ R_{ay} = \frac{X \cdot r - Y \cdot c}{h} \\ R_{by} = -Y - R_{ay} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $R_{ax}$  – сила реакции по оси X в точке “а” на рис. 1,

$R_{ay}$  – сила реакции по оси Z в точке “а” на рис. 1,

$R_{by}$  – сила реакции по оси Z в точке “b” на рис. 1.

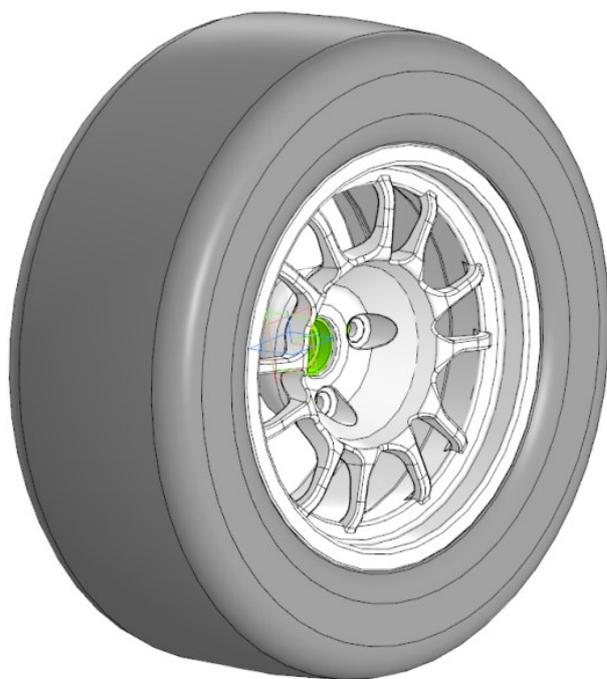
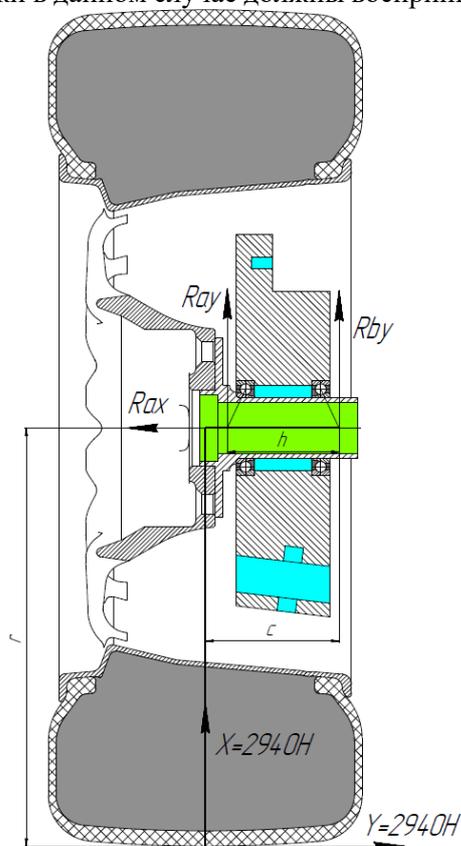


Рис. 1. Схема расчета нагрузок в подшипниках [8, 9],

где радиус колеса  $r=270\text{мм}$ , расстояние от центра колеса до правой точки опоры  $c=87.2\text{мм}$ , расстояние между точками опор  $h=38\text{мм}$

Решениями системы уравнений (1) будут значения сил, которые будут использованы для проверочного расчета подшипников.

Сначала необходимо вычислить эквивалентную нагрузку на каждый из шариковых радиально-упорных подшипников. Эквивалентная нагрузка является векторной суммой реакций в

$$P_1 = (\cos(90 - a) \cdot V \cdot R_{ay} + \cos(a) \cdot R_{ax}) \cdot K_6 \cdot K_T, \quad (2)$$

$$P_2 = (\cos(90 - a) \cdot V \cdot R_{by}) \cdot K_6 \cdot K_T$$

где  $a = 26^\circ$  - угол контакта подшипников,

$V = 1$  - коэффициент вращения,

$K_6 = 3$  - коэффициент безопасности,

$K_T = 1.4$  - температурный коэффициент.

Полученные значения нужно подставить в формулу для расчета срока службы [3] (3).

$$L_{h1} = \frac{10^6 \cdot \left(\frac{C}{P_1}\right)^p}{60 \cdot n}, \quad (3)$$

$$L_{h2} = \frac{10^6 \cdot \left(\frac{C}{P_2}\right)^p}{60 \cdot n},$$

где  $C$  - каталожная динамическая грузоподъемность подшипника,

$p=3$  - степенной показатель шарикоподшипников,

$n = 16 \text{ мин}^{-1}$  частота вращения ступицы.

В итоге получаем сроки службы в наиболее жестких условиях:

$$L_{h1} = 56 \text{ ч}; L_{h2} = 77 \text{ ч}.$$

Если расчетный срок службы не удовлетворяет требованиям, необходимо подобрать подшипник с большей грузоподъемностью (при сохранении диаметра отверстия внутреннего кольца, можно выбрать подшипник более тяжелой серии) [12].

II этап. Для последующей оптимизации необходимо построить 3D модель. Данная модель должна иметь все точки крепления (в том числе необходимый диаметр посадочного отверстия подшипников) и максимально допустимые габариты [13]. Таким образом, будет получена модель излишне прочного поворотного кулака. Нижнее крепление шаровой опоры и проушина рулевой тяги на рисунке 2 имеют цилиндрические вставки, которые будут использованы при последующем расчете методом конечных элементов для моделирования передачи усилия через крепежный болт и проставочные шайбы. Отверстие над окном нижнего крепления необходимо для установки и затяжки гайки. V-образный карман под верхним креплением необходим для прохода шляпки болта кронштейна верхней шаровой опоры. Моделирование осуществлялось в программном продукте SolidEdge - системе твердотельного и поверхностного моделирования производства Siemens PLM Software, в которой

опоре, умноженной на поправочные коэффициенты, учитывающие вращающуюся часть подшипника (внутреннее или внешнее кольцо неподвижно) и ответственность (больше единицы, чем больше цифра, тем выше ответственность места установки). Вычисление выполняется по формуле (2) для первого и второго подшипников соответственно [10, 11]:

реализованы как параметрическая технология моделирования на основе конструктивных элементов и дерева построения, так и технология вариационного прямого моделирования. Данная технология, разработанная компанией Siemens PLM Software (до 2007 года - UGS Corp.), получила название «синхронная технология». Система Solid Edge построена на основе ядра геометрического моделирования Parasolid и вариационного решателя D-Cubed и использует графический пользовательский интерфейс Microsoft Fluent. Система Solid Edge предназначена для моделирования деталей и сборок, создания чертежей, управления конструкторскими данными, и обладает встроенными средствами. Данная CAD/CAE система будет использована в будущем облегчении при помощи алгоритма генеративного дизайна.

III этап. Расчет величин сил, действующих на деталь при различных режимах работы. Максимальная нагрузка, воспринимаемая тормозным суппортом, возникает при наибольшем отрицательном ускорении при торможении. Наибольшее отрицательное ускорение возникает при торможении по прямой перед поворотом, значит, торможение можно сделать отдельным случаем нагрузки. Расчет сил, действующих на крепление тормозного суппорта при торможении, происходит по схеме (рис. 3) [14].

Расчетная схема (рис. 3) является трехмерной, следовательно, можно составить систему из шести уравнений статики (три уравнения сумм проекций сил по осям X, Y и Z, а также три уравнения сумм моментов сил относительно трех осей). Выразив искомые реакции в точках A и B, получим систему уравнений (4).

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{az} = \frac{P}{2} \\ R_{bz} = \frac{P}{2} \\ R_{ax} = \frac{P \cdot (C_x - B_x) - R_{az} \cdot (A_x - B_x)}{A_z - B_z}, \\ R_{bx} = R_{ax} \\ R_{ay} = \frac{P \cdot C_y}{A_z - B_z} \\ R_{by} = R_{ay} \end{array} \right., \quad (4)$$

где  $A_x; A_y; A_z; B_x$  и т. д. – координаты точек А, В и С.

$P$  – величина силы трения колодок о диск.

Подставив значения силы трения, координаты точек и решив систему уравнений получим:  
 $R_{ax} = 3969H; R_{ay} = 3375H; R_{az} = 2576H;$   
 $R_{bx} = 3969H; R_{by} = 3375H; R_{bz} = 2576H.$

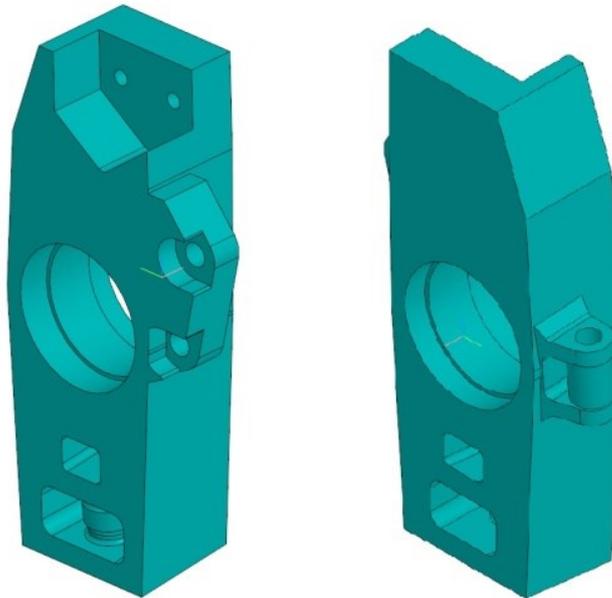


Рис. 2. Изометрические виды 3d модели излишне прочного поворотного кулака

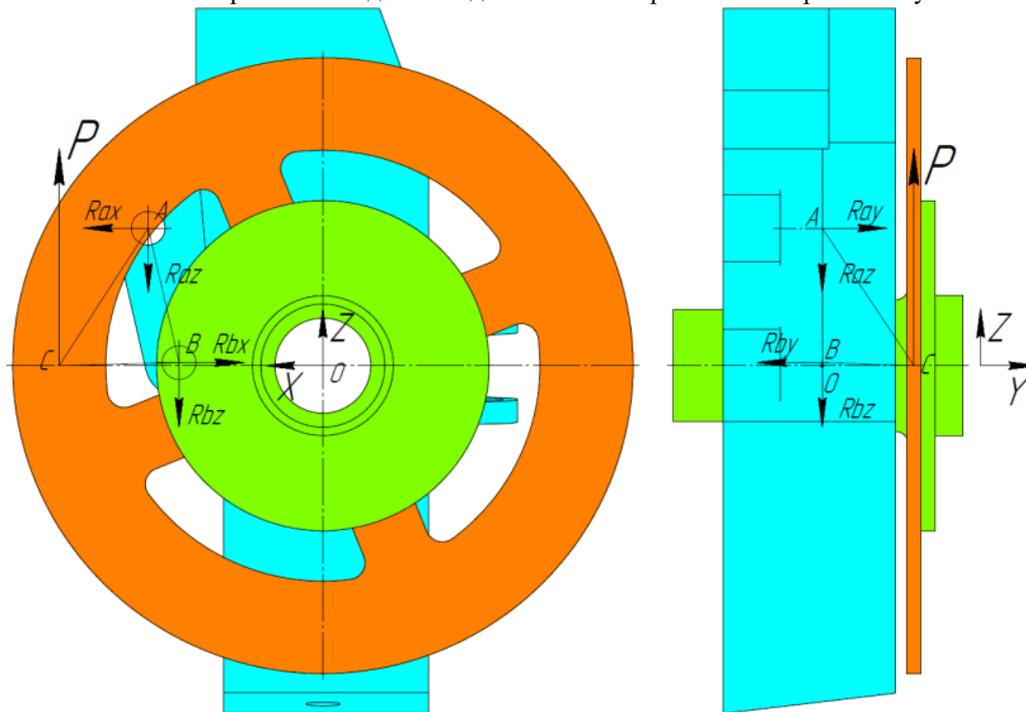


Рис. 3. Схема для расчета усилий, действующих на крепление тормозного суппорта, где голубой – поворотный кулак, зеленый – ступица, оранжевый – тормозной диск, АВС – абсолютно жесткая рама, заменяющая суппорт

Расчет и оптимизация, в случаях нагрузки моделирующих поворот, будут производиться закреплением осевого отверстия. Следовательно, необходимо рассчитать силы реакций в верхнем

и нижнем креплениях кулака [15-18], которые будут приложены в противоположном направлении к расчетной модели. Расчет реакций будет производиться по схеме (рис. 4).

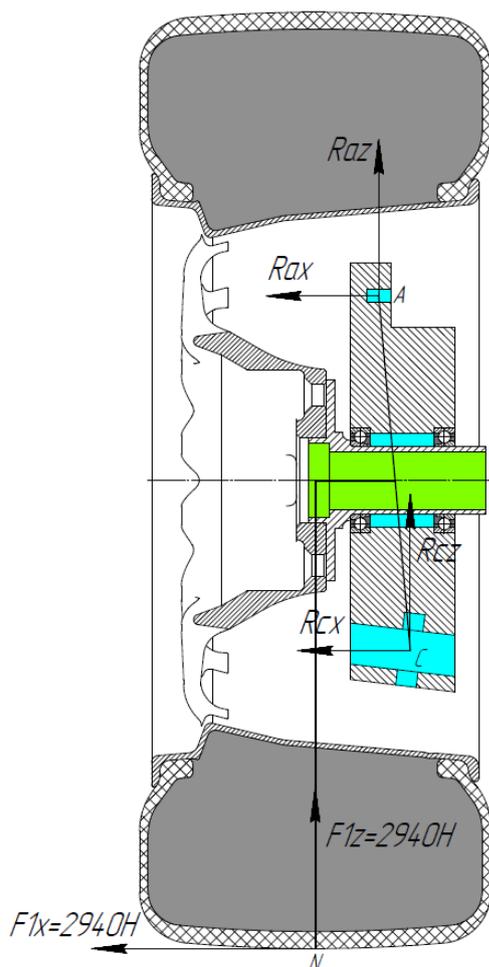


Рис. 4. Схема расчета сил реакций в креплениях поворотного кулака

Схема расчета двумерная, следовательно, необходимо составить систему из трех уравнений статики и выразить искомые реакции (5). Толстая черная линия – рама, моделирующая шину, диск, ступицу, подшипники и сам поворотный кулак. Так как подвеска имеет тип Push rod, только нижний рычаг будет воспринимать вертикальную составляющую силы, приложенной к пятну контакта колеса с дорогой, величина реакции  $R_{az}$  будет равна нулю. Неизвестных реакций в таком случае останется три.

$$\begin{cases} R_{cz} = -F1z \\ R_{cx} = \frac{F1x \cdot A_z + F1z \cdot C_x + F1z \cdot N_x + F1x \cdot N_z}{-A_z - C_z} \\ R_{ax} = -R_{cx} - F1x \end{cases} \quad (5)$$

Решениями системы уравнений будут являться значения реакций в креплениях поворотного кулака. Для расчета сил реакций в левом повороте, необходимо поменять знак у силы  $F1x$  на противоположный, так как точка центра поворота сместится на  $180^\circ$ .

IV этап. Подведение итогов. При проведении топологической оптимизации модели поворотного кулака необходимо задать несколько

случаев нагрузки [13, 19]. В данном случае их будет шесть (рис. 5). Далее по порядку сверху вниз:

I Работа поворотного кулака в правом повороте. Колесо движется по внешнему радиусу, ось колеса проходит через центр поворота.

II Работа переднего поворотного кулака при торможении с максимальным отрицательным ускорением.

III и IV Работа поворотного кулака в правом повороте в условиях недостаточной и избыточной поворачиваемости [8] (ось колеса повернута на угол  $30^\circ$  относительно отрезка, соединяющего центр колеса с центром поворота).

V Работа поворотного кулака в левом повороте. Колесо движется по внутреннему радиусу, ось колеса проходит через центр поворота.

VI Работа под действием усилия, направленного вдоль оси рулевой тяги [20]. В данном случае ось параллельна оси колеса – это создаст наибольший изгибающий момент в креплении тяги.

Модуль «Генеративный дизайн» SolidEdge в качестве входных данных использует не только значения проекций сил на координатные оси, для создания нагрузки необходимо задать также и толщину отступа, создающего объем неизменяемых областей. Неизменяемые области создаются вокруг значимых конструктивных элементов, таких как отверстия, для предотвращения удаления материала при генеративном дизайне. Толщину рекомендуется выбирать после предварительного конечно-элементного расчета. Например, бобышки под болты, нагруженные перпендикулярно оси, можно проверить приложением распределенной силы к половине поверхности отверстия. Проверочный расчет производился в приложении «Симуляция» CAD/CAE системы SolidEdge. В качестве итога были получены следующие толщины неизменяемых областей:

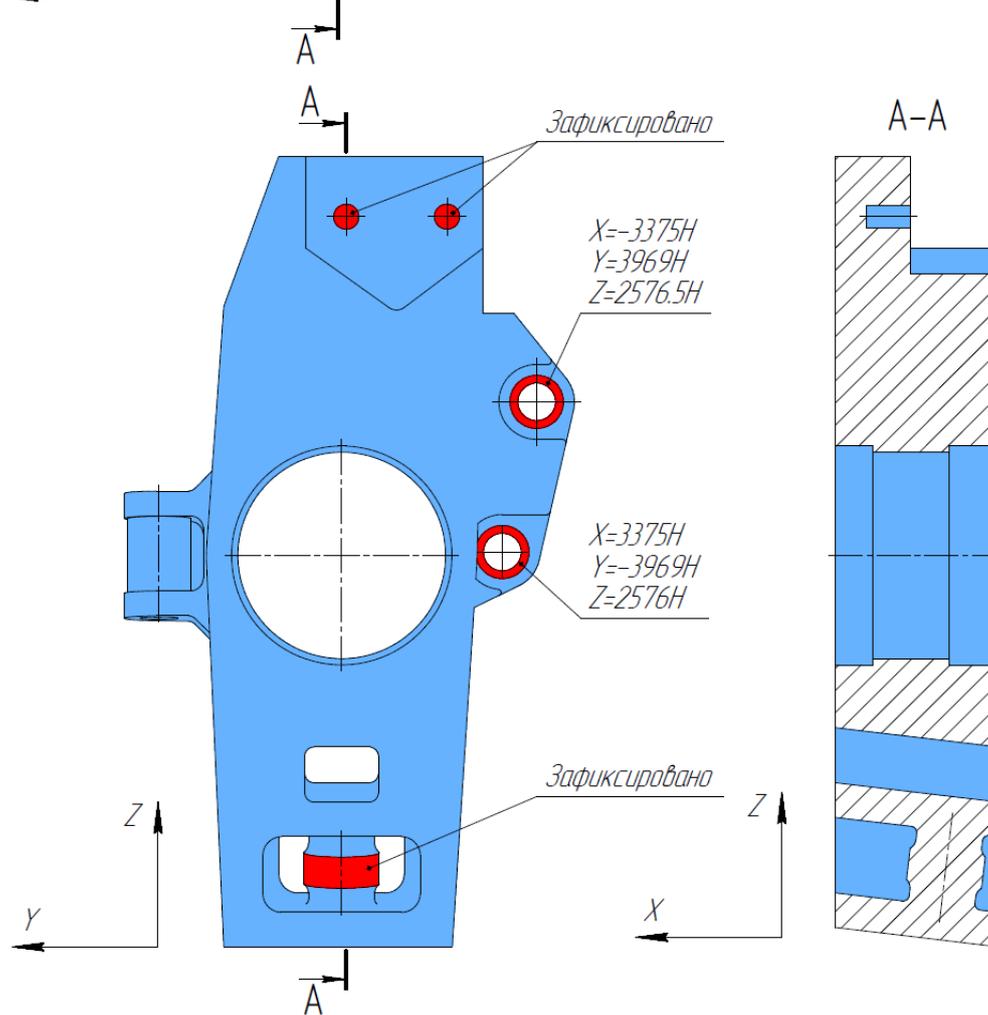
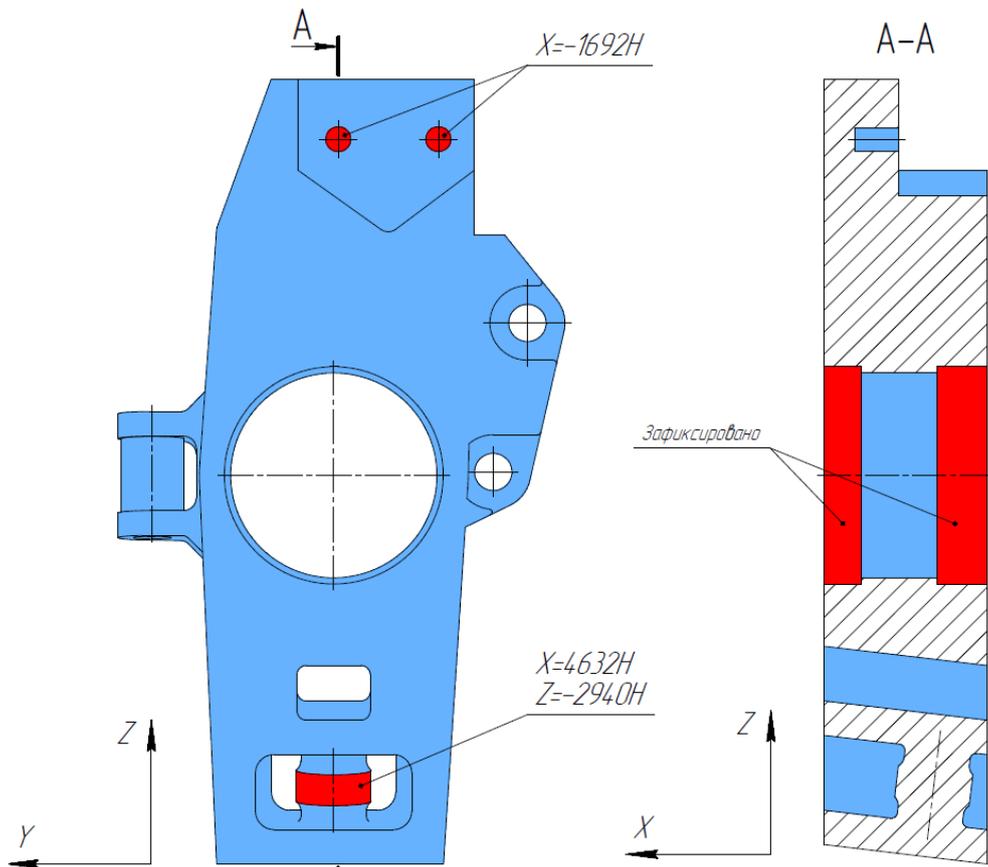
1) Два отверстия крепления верхней шаровой опоры имеют минимальный отступ в 3 миллиметра.

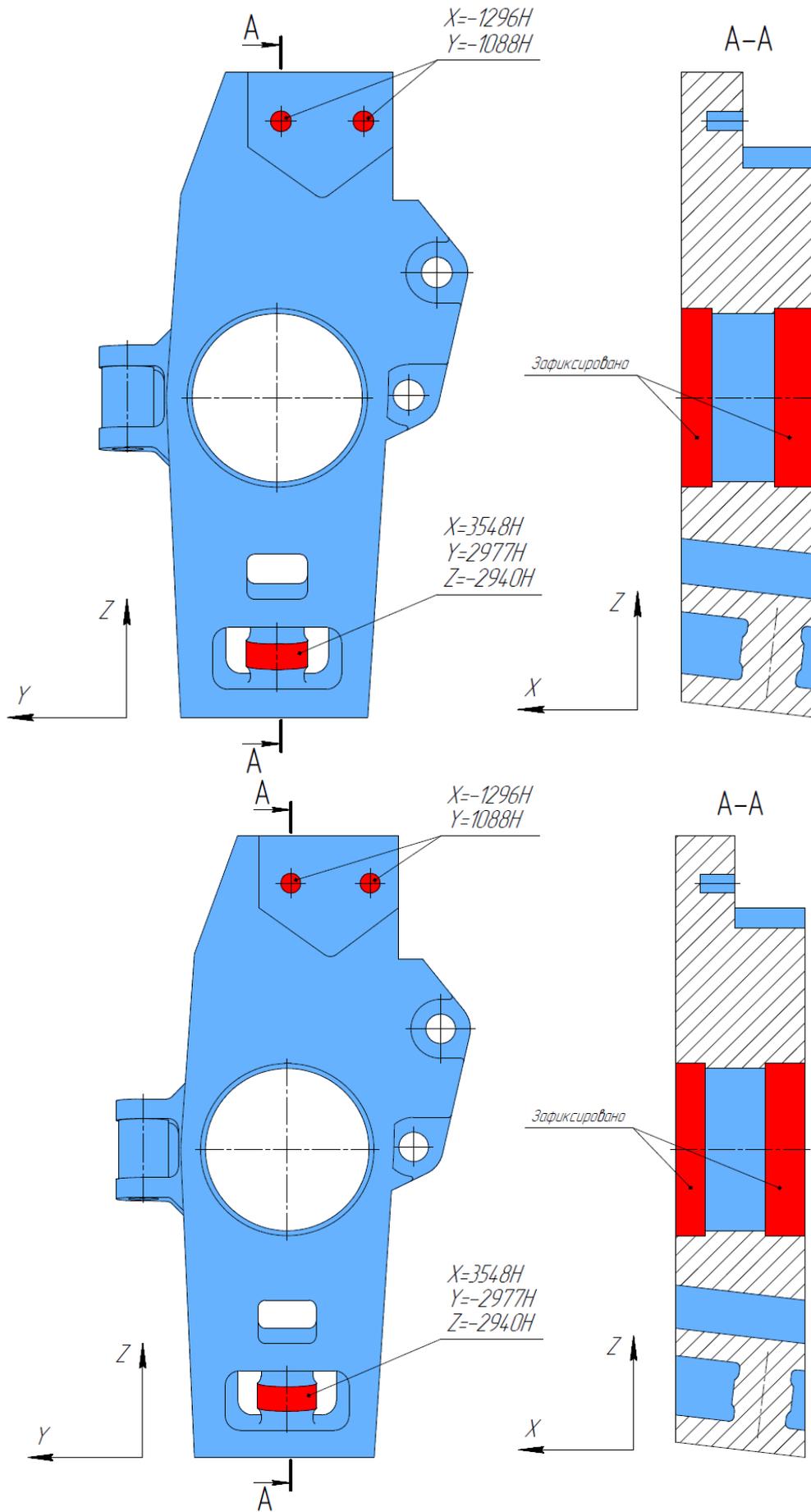
2) Нижнее крепление шаровой опоры может иметь любой отступ, так как усилие на сам поворотный кулак передается через бобышку.

3) Обе проушины крепления тормозного суппорта имеют минимальный отступ 4 миллиметра.

4) Посадочные поверхности подшипников имеют минимальный отступ в пять миллиметров. В ходе моделирования между посадочными кольцами подшипников должно быть добавлено кольцо, воспринимающее осевое усилие.

5) Отверстия обоих проушин крепления шарового шарнира рулевой тяги имеют отступ в 3 миллиметра.





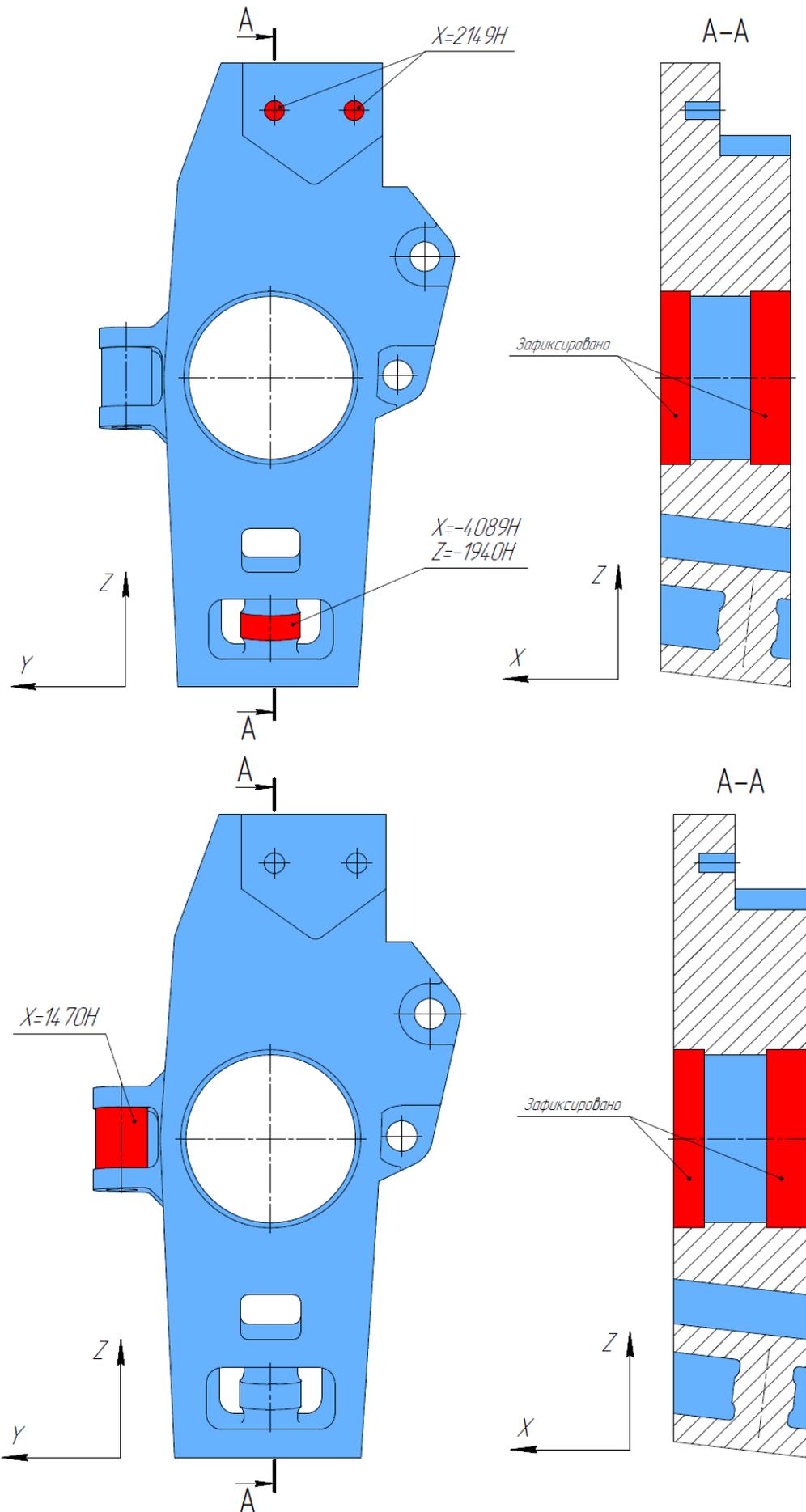


Рис. 5. Случаи нагрузки для поворотного кулака

**Выводы.**

1. В ходе расчета были выбраны подшипники. Выбор был сделан исходя из направления и значения динамической нагрузки. Наиболее компактным, достаточно надежным и способным воспринимать усилие в радиальном и осевом направлении является радиально-упорный шариковый подшипник. Всем условиям соответствует подшипник с маркировкой 1046908K ГОСТ 831-75. Проверочный расчет был произведен по сроку службы в часах. В режиме движения в повороте с максимальным центростремительным ускорением и частыми ударами о поребрик расчетный срок службы подшипника составит 56 часов.

2. С опорой координаты центров поворота шаровых шарниров, полученных при расчете геометрии подвески, габаритные и присоединительные размеры тормозного суппорта, габариты креплений шаровых шарниров с крепежными изделиями и габариты выбранных подшипников была построена 3D модель поворотного кулака, обладающего избыточной прочностью (коэффициент запаса прочности более 6). Построение выполнялось в программном продукте SolidEdge 2019 с целью упрощения последующей оптимизации геометрии во встроенном модуле «Генеративный дизайн».

3. В дополнение к исходной геометрии были выполнены расчеты проекций сил на оси координат, которые необходимо приложить к детали для моделирования рабочих нагрузок. Расчет выполнялся методами статики (составление и решение системы уравнений сумм сил и моментов). В итоге было получено шесть случаев нагрузки, моделирующих работу в правых и левых поворотах с избыточной и недостаточной поворачиваемостью, а также работу при торможении с максимальным отрицательным ускорением. Были определены величины отступов, которые задают размер неизменяемых областей, которые не дают алгоритму генеративного дизайна вычитать материал из важных конструктивных элементов детали. Величины отступов были проверены при помощи дополнительных конечно-элементных расчетов.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Гудков Н.А., Михайлов П.Г., Киселев П.И., Больших А.А. Исследование прочностных свойств стали DOCOL1000DP и верификация критерия прочности для конечно-элементного расчета поворотного кулака автомобиля класса «Формула студент» // Сборник материалов и докладов 6-ого Всероссийского форума. МГТУ им. Баумана, 2020. С. 35–46.

2. Кутепов Н.Ю., Манджапарашвили Р.З. Разработка методики оптимизации конструкции поворотных кулаков гоночного болида проекта Formula Student // Прикладная математика Материалы VI международной научно-практической конференции молодых ученых. Тольяттинский государственный университет. 2020. С. 869–872.

3. Пахомеев Н.В., Лопухов А.В., Чуйдук И.А., Салимоненко Г.Н. Разработка колесно-ступичного узла гоночного электроболида класса Formula Student // Сервис технических систем – Агропромышленному комплексу России Материалы международной научно-практической конференции института агроинженерии. Южно-Уральский государственный аграрный университет, 2019. С. 140–147.

4. Рампель Й. Шасси автомобиля: Элементы подвески. М.: Изд-во «Машиностроение», 1987. 76 с.

5. Курдюк В.А., Вольская Н.С. Влияние геометрических характеристик двухрычажной подвески на поперечных рычагах на кинематику и распределение усилий в узлах подвески // Известия московского государственного промышленного университета. 2013. №9. С. 50–55.

6. Саплинова В.В., Глаголев С.Н., Новиков А.Н., Новиков И.А. Разработка тормозной системы гоночного болида формульного типа класса «Formula Student» // Вестник гражданских инженеров. 2019. №5. С. 270–277.

7. Яблонский А.А. Никифорова В.М. Панков. Курс теоретической механики: Статика, Кинематика. М.: Изд-во Высшая школа, 1966. С. 97–98.

8. Хамилл Д. Подвеска и тормоза: Как построить и модифицировать спортивный автомобиль г. Москва: Изд-во «Veloce Publishing Plc», 2005 342 с.

9. Milliken W.F. Race car vehicle dynamics: Problems, Answers and Experiments. Изд-во SAE International, 2003. 78 с.

10. Киркач Н.Ф., Баласаян Р.А. Расчет и проектирование деталей машин. К.: Изд-во Основа, 1991. 486 с.

11. Беланов В.Я., Иванов И.Н. Особенности подбора по динамической грузоподъемности радиально-упорных подшипников качения // Материалы 11-й региональной научно-методической конференции. Донецкий национальный технический университет, 2009. С. 8–10.

12. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. М.: Изд-во Машиностроение, 2001. 420 с.

13. Гончаров П.С., Артамонов И.А., Халитов Т.Ф., Денисихин С.В., Сотник Д.Е. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ. М.: Изд-во ДМК пресс, 2012. 504 с.

14. Шкилев Д.А., Семькина А.С., Загородний Н.А. Способы определения технического состояния вакуумного усилителя тормозов // Современные материалы, техника и технологии. 2018. Том 2. №2. С.123–128

15. Гудков Н.А., Михайлов П.Г. Уточнение нагрузочных режимов для расчетов на прочность на примере гоночных болидов Vauman Racing Team // Студенческие инженерные проекты Сборник трудов V всероссийской конференции. МАДИ, 2017. С. 76–91.

16. Саплинова В.В., Каськов С.А. Система подвески гоночного болида класса «Formula Student» и ее безопасность // Новые задачи технических наук и пути их решения. 2017. С. 206–209.

17. Кулагин А.Л., Тумасов А.В., Гончаров К.О. Расчет сил, действующих в передней подвеске гоночного болида Formula Student на двойных поперечных рычагах // Безопасность транспортных средств в эксплуатации Сборник материалов 71-й Международной научно-технической конференции. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2010. С. 45-47.

18. Папунин А.В., Гончаров К.О. Проектирование элементов тормозной системы болида Formula Student Будущее технической науки Тезисы докладов IX Международной молодежной научно-технической конференции. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2010. С. 145–146.

19. Демин Е.А., Федоров А.Н., Гончаров К.О., Кулагин А.Л. Применении САПР в проектировании элементов подвески спортивного автомобиля класса Formula Student // Будущее технической науки сборник материалов Сборник выступлений международной молодежной научно-практической конференции. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2015. С. 601–602.

20. Бутин Д.А., Тумасов А.В. Расчет рулевого управления с маятниковыми рычагами для болида класса Formula Student // Сборник материалов XII Международной молодежной научно-технической конференции. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2013. С. 109–110.

#### Информация об авторах

**Григоренко Александр Александрович**, ассистент кафедры “Технология машиностроения”. E-mail: grigorenko1998@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Шопина Елена Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры “Технология машиностроения”. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 22.06.2022 г.

© Григоренко А.А., Шопина Е.В., 2023

*\*Grigorenko A.A., Shopina E.V.*

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

*\*E-mail: grigorenko1998@yandex.ru*

## CALCULATION OF INPUT PARAMETERS FOR TOPOLOGY OPTIMISATION OF STEERING KNUCKLE. PART I

**Abstract.** The paper describes the calculation of input parameters for static strength analysis or generative design of the steering knuckle of a Formula Student race car. The initial data were: overall and mounting dimensions of the rim and tire, hub and brake disk, the magnitude of the force acting on the contact patch of the wheel with the road, the magnitude of the sliding friction force between the brake disk and brake pads, the force acting on the tie rod attachment, the location coordinates ball joint mounts and brake caliper. During the calculations, bearings were selected and forces on the coordinate axes were calculated, which must be applied to the part to simulate work loads. The calculation was performed by static methods. As a result, six load cases were obtained, simulating work in right and left turns with oversteer and understeer, as well as work during braking with maximum negative acceleration. Also, a 3D model of the steering knuckle was built, which has excessive strength (factor of safety is higher than 6). Padding values of the unchangeable areas have been defined, that prevent the generative design algorithm from subtracting material from important structural features of the part. The offset values were verified using additional finite element calculations.

**Keywords:** static calculation, steering knuckle, cases of loading.

## REFERENCES

1. Gudkov N.A., Mikhailov P.G., Kiselev P.I., Bolshikh A.A. Study of the strength properties of DOCOL1000DP steel and verification of the strength criterion for finite element calculation of the steering knuckle of a Formula Student car [Issledovanie prochnostnyh svojstv stali DOCOL1000DP i verifikaciya kriteriya prochnosti dlya konechno-elementnogo rascheta povorotnogo kulaka avtomobilya klassa "Formula student"]. Sbornik materialov i dokladov 6-ogo Vserossijskogo foruma. 2020. Pp. 35–46. (rus)
2. Kutepov N.Yu., Manjaparashvili R.Z. Development of a methodology for optimizing the design of the steering knuckles of a racing car of the Formula Student project. [Razrabotka metodiki optimizacii konstrukcii povorotnyh kulakov gonochnogo bolida proekta Formula Student]. Prikladnaya matematika Materialy VI mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii molodyh uchenyh. Tol'yatinskij gosudarstvennyj universitet, 2020. Pp. 869–872. (rus)
3. Pakhomeev N.V., Lopukhov A.V., Chuyduk I.A., Salimonenko G.N. Development of a wheel-hub unit for an electric race car of the Formula Student class [Razrabotka kolesno-stupichnogo uzla gonochnogo elektrobolida klassa Formula Student]. Servis tekhnicheskikh sistem – Agropromyshlennomu kompleksu Rossii Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii instituta agroinzhenerii. YUzhno-Ural'skij gosudarstvennyj agrarnyj universitet, 2019. Pp. 140–147. (rus)
4. Rampel J. Car chassis: Suspension elements [Shassi avtomobilya: Elementy podveski]. Moscow: Mashinostroenie, 1987. 284 p. (rus)
5. Kurdyuk V.A., Volskaya N.S. Influence of geometrical characteristics of a double wishbone suspension on transverse levers on the kinematics and distribution of forces in the suspension units [Vliyanie geometricheskikh harakteristik dvuhrychazhnoj podveski na poperechnyh rychagah na kinematiku i raspredelenie usilij v uzlah podveski]. Izvestiya moskovskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta. 2013. No. 9. Pp. 50–55. (rus)
6. Saplinova V.V., Glagolev S.N., Novikov A.N., Novikov I.A. Development of the braking system for a Formula Student race car [Razrabotka tormoznoj sistemy gonochnogo bolida formul'nogo tipa klassa "Formula Student"]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2019. No. 5. Pp. 270–277. (rus)
7. Yablonsky A.A., Nikiforova V.M., Pankov. Theoretical Mechanics Course: Statics, Kinematics. [Kurs teoreticheskoj mekhaniki: Statika, Kinematika]. Moscow: Vysshaya shkola, 1966. 364 p. (rus)
8. Hamill D. Suspension and brakes: How to build and modify a sports car. Moscow: Veloce Publishing Plc, 2005. 96 p. (rus)
9. Milliken W.F. Race car vehicle dynamics: Problems, Answers and Experiments. SAE International, 2003. 78 p.
10. Kirkach N.F., Balasanyan R.A. Calculation and design of machine parts. [Raschet i proektirovanie detalej mashin]. Kiev: Osnova, 1991. 486 p. (rus)
11. Belanov V.Ya., Ivanov I.N. Peculiarities of dynamic load rating selection of angular contact rolling bearings [Osobennost' podbora po dinamicheskoy gruzopod'emnosti radial'no-upornyh podshipnikov kacheniya]. Materialy 11-j regional'noj nauchno-metodicheskoy konferencii. Doneckij nacional'nyj tekhnicheskij universitet, 2009. Pp. 8–10.
12. Anuryev V.I. Handbook of the designer-machine builder [Spravochnik konstruktora-mashinostroitel'ya]. Moscow: Mashinostroenie, 2001. 420 p. (rus)
13. Goncharov P.S., Artamonov I.A., Khalitov T.F., Denisikhin S.V., Sotnik D.E. NX Advanced Simulation. Engineering analysis [NX Advanced Simulation. Inzhenernyj analiz]. Moscow: DMK press, 2012. 504 p. (rus)
14. Shkilev D.A., Semykina A.S., Zagorodny N.A. Methods for determining the technical condition of the vacuum brake booster [Sposoby opredeleniya tekhnicheskogo sostoyaniya vakuumnogo usilitelya tormozov]. Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii. 2018. No. 2. Vol. 2. Pp. 123–128.
15. Gudkov N.A., Mikhailov P.G. Refinement of load conditions for strength calculations on the example of racing cars Bauman Racing Team [Utochnenie nagruzochnyh rezhimov dlya raschetov na prochnost' na primere gonochnyh bolidov Bauman Racing Team]. Studencheskie inzhenernye proekty Cbornik trudov V vserossijskoj konferencii. MADI, 2017. Pp. 76–91. (rus)
16. Saplinova V.V., Kaskov S.A. The Suspension System of a Formula Student Racing Car and Its Safety [Sistema podveski gonochnogo bolida klassa "Formula Student" i ee bezopasnost']. Novye zadachi tekhnicheskikh nauk i puti ih resheniya, 2017. Pp. 206–209. (rus)
17. Kulagin A.L., Tumasov A.V., Goncharov K.O. Calculation of the forces acting in the front suspension of the Formula Student racing car on double wishbones [Raschet sil, dejstvuyushchih v perednej podveske gonochnogo bolida Formula Student na dvoynyh poperechnyh rychagah]. Bezopasnost' transportnyh sredstv v ekspluatatsii Sbornik materialov 71-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Nizhegorodskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. R.E. Alekseeva, 2010. Pp. 45–47. (rus)

18. Papunin A.V., Goncharov K.O. Design of elements of the brake system of the car Formula Student [Proektirovanie elementov tormoznoj sistemy bolida Formula Student] Budushchee tekhnicheskoy nauki Tezisy dokladov IX Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Nizhegorodskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. R.E. Alekseeva, 2010. Pp. 145–146. (rus)

19. Demin E.A., Fedorov A.N., Goncharov K.O., Kulagin A.L. The use of CAD in the design of the suspension elements of a Formula Student class race car [Primenenii SAPR v proektirovanii elementov podveski sportivnogo avtomobilya klassa

Formula Student]. Budushchee tekhnicheskoy nauki sbornik materialov Sbornik vystuplenij mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Nizhegorodskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. R.E. Alekseeva, 2015. Pp. 601–602. (rus)

20. Butin D.A., Tumasov A.V. Calculation of steering with pendulum levers for a Formula Student car [Sbornik materialov XII Mezhdunarodnoj molodyozhnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii]. Nizhegorodskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. R.E. Alekseeva, 2013. Pp. 109–110. (rus)

#### *Information about the authors*

**Grigorenko, Alexander A.** E-mail: grigorenko1998@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Shopina, Elena V.** PhD. E-mail: nat-kuts@yandex.ru. RSI "Management of road facilities and transport Belgorod region». Russia, 308000, Belgorod, st. Preobragenskaya, 19.

*Received 22.06.2022*

#### **Для цитирования:**

Григоренко А.А., Шопина Е.В. Выполнение генеративного дизайна и адаптация к изготовлению поворотного кулака. Часть I // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 1. С. 132–143. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-132-143

#### **For citation:**

Grigorenko A.A., Shopina E.V. Calculation of input parameters for topology optimisation of steering knuckle. Part I. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 1. Pp. 132–143. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-132-143