

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

4

2024

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

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

№ 4, 2024 год

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

Vol. 4. 2024

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

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

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

- 2.1.1. – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
- 2.1.3. – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)
- 2.1.5. – Строительные материалы и изделия (технические науки)
- 2.1.11. – Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура)
- 2.1.12. – Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура)
- 2.1.13. – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)
- 2.1.13. – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура)
- 2.1.14. – Управление жизненным циклом объектов строительства (технические науки)
- 2.6.14. – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)
- 2.5.4. – Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки)
- 2.5.5. – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 2.5.6. – Технология машиностроения (технические науки)
- 2.5.21. – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)

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

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 522 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 44446. (+12) Online подписка: http://www.akc.ru/itm/2558104627/ Цена свободная.
Подписан в печать	15.04.2024
Выход в свет	22.04.2024

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 12,32. Уч.-изд. л. 13,25. Тираж 40 экз. Заказ № 57

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

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov

scientific and theoretical journal

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

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

- 2.1.1. – Building structures, constructions and facilities (technical sciences)
- 2.1.3. – Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (technical sciences)
- 2.1.5. – Building materials and products (technical sciences)
- 2.1.11. – Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture)
- 2.1.12. – Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture)
- 2.1.13. – Urban planning, rural settlement planning (technical sciences)
- 2.1.13. – Urban planning, rural settlement planning (architecture)
- 2.1.14. – Life-cycle management of construction projects (technical sciences)
- 2.6.14. – Technology of silicate and refractory nonmetallic materials (technical sciences)
- 2.5.4. – Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences)
- 2.5.5. – Technology and equipment of mechanical and physical-technical processing (technical sciences)
- 2.5.6. – Engineering technology (technical sciences)
- 2.5.21. – Machines, aggregates and technological processes (technical sciences)

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

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

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 522
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: http://www.akc.ru/itm/255810462/
Signed for printing:	15.04.2024

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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).

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

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

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Vladimir T. Erofeev, Academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, 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).

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

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

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

Victor S. Meshcherin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Technical University of Dresden (TU Dresden), Director of the Institute of

Building Materials and head of the department of building materials (Germany, Dresden).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ледяйкина О.В., Ледяйкин Н.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА БЕТОНА	8
Ушницкая Н.Н., Местников А.Е. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ МЕТОДАМИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА	16
Аль-Сабаеи А.К., Абсиметов В.Э. РАСЧЕТ НДС РАМНЫХ УЗЛОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ ПРИ ИХ УСИЛЕНИИ	26
Ильина Т.Н., Орлов П.А., Саввин Н.Ю., Елистратова Ю.В. ТЕПЛОМАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИСПАРИТЕЛЬНОМ БЛОКЕ ВОЗДУШНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА	36
Теслер К.И., Додонова М.А. ТЕНДЕНЦИИ РЕШЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОБЛЕМ В МЕГАПОЛИСАХ И ЭВОЛЮЦИЯ ПРОЕКТНОГО МЫШЛЕНИЯ	45
Боброва Е.Г., Малышева С.А. СОЦИАЛЬНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ В ПРЕДПРОЕКТНЫХ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ В КУРСОВОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ	58
Ладик Е.И., Син Ж. ОРГАНИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРНОЙ СРЕДЫ ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО РЕЛЬЕФА (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ЧУНЦИН, КИТАЙ)	67

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Качаев А.Е. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ДЕЗИНТЕГРАТОРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ	79
Корчагин О.А. КОНСТРУКТИВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ОБМОТКАМИ СТАТОРА И ЗУБЧАТЫМ БЕЗОБМОТОЧНЫМ РОТОРОМ	91
Хурматуллин С.Р., Каменов Р.У. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУЖКИ	100

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Ledyaykina O.V., Ledyaykin N.V. STUDY OF THE INFLUENCE OF MODIFIED ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF CONCRETE	8
Ushnitskaya N.N., Mestnikovae A.E. INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF CLAY RAW MATERIALS BY METHODS OF PHYSICO-CHEMICAL ANALYSIS	16
Al-Sabaei A.Q., Absimetov V.E. CALCULATION OF STRESS-STRAIN STATE (SSS) FOR FRAME ASSEMBLIES OF BUILDING METAL STRUCTURES WHEN THEY ARE REINFORCED	26
Il'ina T.N., Orlov P.A., Savvin N.Yu., Elistratova Yu.V. THE ECONOMIC ASPECT OF THE SCALE-FORMING DIGNOSTICS LAYERS IN PLATE HEAT EXCHANGERS	36
Tesler K.I., Dodonova M.A. TRENDS IN SOLVING TRANSPORT PROBLEMS IN MEGACITIES AND THE EVOLUTION OF DESIGN THINKING	45
Bobrova E.G., Malysheva S.A. SOCIO-SPATIAL ANALYSIS IN PRE-DESIGN URBAN PLANNING RESEARCH IN COURSE DESIGN	58
Ladik E.I., Xing Renjie ORGANIZATION OF THE ARCHITECTURAL ENVIRONMENT OF PUBLIC SPACES IN A MOUNTAIN LANDSCAPE (USING THE EXAMPLE OF CHONGQING, CHINA)	67

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Kachaev A.E. MATHEMATICAL MODEL OF VORTEX MOTION OF TWO-PHASE FLOW IN A DISINTEGRATOR MILL	79
Korchagin O.A. CONSTRUCTIVE RELATIONS IN ELECTRIC MACHINES OF MECHATRONIC SYSTEMS WITH CONCENTRATED STATOR WINDINGS AND A TOOTHE NON-WINDING ROTOR	91
Khurmatullin S.R., Kamenov R.U. SIMULATION OF THE INFLUENCE OF CUTTING SPEED DURING BLADE MACHINING ON CHIP FORMATION	100

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-8-15

Ледяйкина О.В., Ледяйкин Н.В.Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва***E-mail: oksana.ledyaykina.97@mail.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА БЕТОНА

Аннотация. Проблема улучшения эффективности качества бетона и ж/б является перспективным направлением, которое не может быть полностью реализовано без применения химических добавок. Добавки считаются достаточно простым способом для улучшения показателей цементного композита, они дают возможность уменьшить количество вяжущего и регулировать технологические характеристики бетонной смеси и физико-механические свойства материала, а также повысить долговечность зданий и сооружений. В настоящее время используют большое число добавок, вводимых в бетонные смеси, которые классифицируются по механизму действия, химическому составу и другим характеристикам. Цель настоящих исследований состояла в оптимизации составов бетонов с добавками по показателям прочности и деформативности. Объектом исследования являются мелкозернистые бетоны, изготавливаемые на цементном вяжущем с применением различных модифицирующих добавок, в качестве которых исследованы модификаторы типа «Эдванс Ультра», «Суперпласт Прима», «Суперпласт Станадарт». Исследуемыми показателями являлись прочность при сжатии и модуль упругости мелкозернистого бетона. Выявлено, что введение модифицирующих добавок способствует повышению исследуемых показателей. При этом наибольший пророст прочности и модуля упругости достигается при применении пластификатора марки «Эдванс Ультра».

Ключевые слова: мелкозернистые бетоны, модифицирующие добавки, физико-механические свойства, прочность, деформативность.

Введение. Бетон считается главным строительным материалом, который используется во всем мире и ресурсы его применения до конца не израсходованы. Он применяется уже многие столетия, развивается и улучшается [1–4].

Технология бетона на сегодняшний день проделала длительный путь в области получения материалов с уникальными свойствами, которые расширили сферу применения бетонов, их номенклатуру. В XXI веке строительная отрасль представляет огромный диапазон по усовершенствованию физико-механических характеристик изделий и конструкций. Данное положение считается разумной реакцией рынка на возрастание темпов строительства и интереса потребителей в приобретении качественных и недорогих строительных материалов [5]. Повышенный интерес здесь в первую очередь относится к тяжелому бетону. Поскольку данный материал используется фактически на всех строительных площадках и предприятиях ЖБИ, то представить его в «классическом виде», т.е. из цемента, песка, щебня и воды, весьма трудно.

В современном строительстве при возведении зданий, сооружений перспективно применение материалов, обладающих улучшенными эксплуатационными характеристиками. В настоящее время многие исследователи уделяют особое внимание созданию мелкозернистых бетонов

особо плотной структуры, которые характеризуются высокими физико-механическими свойствами и в первую очередь прочностными показателями. Прочностные характеристики бетона и других цементных композитов обуславливают долговечность и надёжность бетонных, ж/б изделий и конструкций [3, 6]. Прочность цементного композита имеет прямую зависимость от его состава, например, при снижении количественного содержания вяжущего происходит падение прочности материала. Повышая однородность и плотность материала, можно достичь достаточно высоких его прочностных свойств. Увеличить однородность бетона можно благодаря добавлению мелких заполнителей. Это происходит за счет уменьшения промежуточной зоны между заполнителем и цементным камнем, в результате значительно сокращается количество пустот и понижения В/Ц [4].

Проблема повышения качества бетона и железобетона и на сегодняшний день является актуальной, но без применения новых материалов в технологии производства бетона, она не может быть абсолютно успешно реализована [7].

Современные методы получения бетона основываются на использовании химических модификаторов разного типа, нанодобавок и микрозаполнителей [8, 9], которые позволяют регулировать свойства материала.

Среди методов улучшения свойств бетона на практике использование модифицирующих добавок считается одним из наиболее действенных. Для повышения прочностных показателей и, в частности, прочности при изгибе в составы вводится дисперсная арматура [10, 11, 12] или применяется технология изготовления бетонов на комплексных связующих [13, 14]. Усовершенствовать качество мелкозернистого бетона, с целью достижения подвижности и уменьшения объема воды, а также снижения расхода вяжущего можно благодаря использованию химических добавок [5, 6, 8, 15, 16]. Следует отметить, что в цементно-песчаных смесях с большим количеством цемента необходимо применять суперпластификаторы.

Понятие долговечность цементного композита идет параллельно с понятием химические добавки. В первую очередь это касается морозостойкости и водонепроницаемости цементного композита. Благодаря применению структурирующего действия модификаторов, можно добиться улучшенных показателей материала по морозостойкости и водонепроницаемости [17, 18]. Суть заключается в видоизменении структуры порового пространства цементного камня, благодаря созданию группы небольших относительно замкнутых пор разнообразной шаровидной формы [9, 19, 20].

Применение химических добавок относится к одному из самых несложных технологических приёмов, позволяющих добиться более усовершенствованных показателей цементных композитов [21]. При изучении характеристик бетонных смесей весьма интересны добавки, которые регулируют свойства бетонных и растворных смесей (подвижность, кинетику твердения, прочность, проницаемость, морозостойкость, коррозионную стойкость и т.д.). Это как правило группа добавок 1 согласно ГОСТ 24211–2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия». Преобладающая часть продуктов, входящих в данную группу – поверхностно-активные вещества разной химической природы и строения. Большинство видов ПАВ могут использоваться для модификации бетона. Благодаря добавкам можно значительно снизить степень затрат на единицу продукции, улучшить качество огромной номенклатуры ж/б конструкций, увеличить жизненный цикл зданий и сооружений в целом [16].

По этой причине в мировом сообществе большое внимание уделяется к данной теме, хотя в этом направлении имеется значительный объем теоретических и экспериментальных исследова-

ний, практический опыт, но создание новых видов добавок продолжается, что требует новых положительных исследований.

Цель работы состоит в изучении влияния химических добавок на физико-механические свойства мелкозернистого бетона и в оптимизации их составов.

Материалы и методы. Для проведения исследований было использовано 13 составов мелкозернистых бетонов с разными комплексными добавками: «Суперпласт Прима», «Суперпласт Стандарт» и пластификатором «Эдванс Ультра», объединяющие в себе свойства суперпластификаторов и регуляторов сохранения подвижности бетонной смеси.

Каждый из использованных ниже добавок характеризуется комплексом благоприятных свойств:

- «Эдванс Ультра» – высококачественный пластификатор, который регулирует и сохраняет подвижность товарного бетона. Основой добавки являются эфиры поликарбоксилатов и модифицированный ЛСТ, представляющие в целом сбалансированную композицию.

- «Суперпласт Прима» – комплексная добавка, представляющая химическое соединение полиметиленафталинсульфонатов разной молекулярной массы и поверхностно-активных веществ природного происхождения. Данный продукт рекомендуют использовать при производстве товарного бетона для укладки монолитных фундаментов, заливки стен для получения высокоподвижных, литых бетонных смесей и цементных композитов с высокими прочностными характеристиками.

- «Суперпласт Стандарт» является комплексной добавкой, состоящей из полиметиленафталинсульфонатов разной молекулярной массы, поверхностно-активных веществ природного происхождения, а также органических соединений. Целесообразно использовать для высокоподвижных и литых бетонных смесей. Данный продукт способствует достижению достаточно высокой прочности в ранние сроки твердения.

В качестве цементного вяжущего был использован портландцемент производства ООО «Сенгилеевский цементный завод» класса Цем 1 42,5 Б.

В качестве заполнителя для подбора состава мелкозернистого бетона на основе минерально-сырьевой базы Республики Мордовия выступал кварцевый песок Моргинского песчаного карьера со следующими физико-химическими характеристиками: влажность – 0,1 %, коэффициент фильтрации – 2,1 м/сут., истинная и насыпная

плотности песка равны $2,7 \text{ г/см}^3$ и 1300 кг/м^3 , модуль крупности $M_k = 1,8$. По зерновому составу относится к группе мелких песков.

Бетонные смеси готовили с помощью бетоносмесителя. Количество компонентов в бетонной смеси определяли в расчете на 10 кг цемента. Объем воды регулировали таким образом, чтобы получить равноподвижные смеси. Готовая бетонная смесь заливалась в стандартные формы размером $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$, заранее смазанные парафином, и простукивалась шпателем для равномерного распределения смеси. После отверждения цементных композитов в течение 28 суток в нормальных температурно-влажностных условиях, были проведены физико-механические исследования.

Исследуемыми свойствами являлись прочность на сжатие и модуль упругости. Испытания проводились следующим образом.

Одной из выбранных граней образцы-кубы устанавливают на нижнюю опорную плиту пресса центрально по отношению к его продольной оси, ориентируясь на риски, которые указаны на плите испытательной машины. Затем верхнюю плиту пресса совмещают с верхней опорной частью образца таким образом, чтобы их плоскости целиком прилегали одна к другой. Напряжение в материале при нагружении должно возрастать непрерывно с неизменной скоростью до его деструкции.

Прочность бетона R , МПа на сжатие вычисляется:

$$R = k \cdot N / A \quad (1)$$

где N – разрушающая нагрузка, Н; A – рабочая площадь образца, мм^2 ; k – масштабный коэффициент, который находят в зависимости от размеров ребер образцов.

Прочность бетона в серии образцов находят как среднеарифметическое значение прочности испытанных в серии. Для расчёта одной точки прочности испытывалось по 3 образца каждого состава мелкозернистых бетонов.

Модуль упругости представляет собой отношение нормального напряжения сжатия к относительной деформации, которая устанавливается при последовательном нагружении образца по правилам, представленных в нормативной документации. Шкала силоизмерителя пресса должна соответствовать определенным требованиям, т.е. предполагаемые значения разрушающей нагрузки должны варьироваться в пределах 70–80 % от максимальной. Нагружение бетонного образца до значения нагрузки, которая составляет $(40 \pm 5 \%) \cdot R_{\text{раз}}$ (разрушающая нагрузка, измеренная по шкале силоизмерителя пресса), выполняют постепенно, по 10 % от ожидаемых $R_{\text{раз}}$,

придерживая в рамках каждой ступени скорость нагружения $(0,6 \pm 0,2) \text{ МПа/с}$. Нагрузку на каждом этапе нагружения выдерживают, примерно, 4 минуты и определяют значения индикаторов в начале и в конце выдержки ступени. Когда показатель нагрузки становится равным $(40 \pm 5 \%) \cdot R_{\text{раз}}$, приборы снимают с образца, затем последующие нагружения до разрушения материала выполняют безостановочно с постоянной скоростью.

Модуль упругости E определяют для каждого образца при уровне нагрузки, которая представляет собой 30 % от разрушающей:

$$E = \sigma_1 / \varepsilon_{1y} \quad (2)$$

где $\sigma_1 = P_1 / F$ – приращение напряжения от условного нуля до показателя внешней нагрузки, составляющей 30 % от разрушения; P_1 – приращение внешней нагрузки; ε_{1y} – приращение упругомгновенной относительной продольной деформации образца, установленное в начале каждой ступени ее приложения.

Значения прочности при сжатии и модуля упругости рассчитывались в относительных единицах измерения.

$$R_{\text{сж}} / R_{\text{сж.к.с.}} \quad (3)$$

$$E / E_{\text{к.с.}} \quad (4)$$

где $R_{\text{сж}}$ – абсолютное значение прочности при сжатии состава с добавкой, МПа; $R_{\text{сж.к.с.}}$ – абсолютное значение прочности при сжатии контрольного состава (без добавки), МПа; E – абсолютное значение модуля упругости состава с добавкой, МПа; $E_{\text{к.с.}}$ – абсолютное значение модуля упругости контрольного состава (без добавки).

Основная часть. Прочностные и деформативные свойства цементных композитов считаются одними из наиболее важных характеристик в строительстве, которые характеризуют их сопротивление разрушению, а также определяют целостность и работоспособность конструкций.

Предлагаемая работа ориентирована на рассмотрение вопросов, отмеченных ранее. Далее в таблице 1 представлены составы изготовленных мелкозернистых бетонов.

С целью получения физико-механических показателей разработанных бетонов были выполнены кратковременные исследования, которые складывались из испытаний на сжатие кубических образцов.

В таблице 2 приведены относительные значения прочности при сжатии и модуля упругости образцов мелкозернистых бетонов в возрасте 28 суток.

Таблица 1

Компоненты составов экспериментальных образцов

№ состава	Вид добавки	Количество добавки, %	Количество цемента %	Количество песка, %	Количество воды, %
1	Эдванс Ультра	0,120	21,094	63,282	15,504
2		0,603	21,094	63,282	15,021
3		1,086	21,094	63,282	14,538
4		1,569	21,094	63,282	14,055
5	Суперпласт Прима	0,187	21,237	63,710	14,866
6		0,280	21,236	63,709	14,774
7		0,374	21,236	63,708	14,686
8		0,467	21,236	63,709	14,587
9	Суперпласт Стандарт	0,208	21,278	63,834	14,681
10		0,346	21,278	63,834	14,543
11		0,486	21,307	63,921	14,284
12		0,623	21,248	63,744	14,385
13	—	—	20,833	62,499	16,666

*Примечание: количество добавки рассчитано на 10 кг вяжущего.

Таблица 2

Относительные показатели прочности и модуля упругости модифицированных бетонов

№ составов	Прочность при сжатии	Модуль упругости
1	1,07	1,19
2	1,51	1,47
3	1,94	1,69
4	1,93	1,61
5	1,05	1,15
6	1,13	1,25
7	1,25	1,37
8	1,25	1,33
9	1,10	1,13
10	1,19	1,23
11	1,27	1,32
12	1,23	1,29
13	1	1

Как видно из таблиц 1-2, с увеличением в составах количества пластификатора «Эдванс Ультра» и комплексных добавок «Суперпласт Прима» и «Суперпласт Стандарт» до оптимального уровня наблюдается повышение прочностных свойств и деформативности.

На рисунках 1–2 показано изменение свойств разработанных мелкозернистых бетонов с модифицирующими добавками по отношению к составу без добавки.

Проведём анализ результатов по составам, отличающихся по виду использованного суперпластификатора и количественного содержания.

Рассмотрим составы № 1 – 4, где в роли модификатора выступал препарат «Эдванс Ультра» (рис. 1). Из гистограммы следует, что при увеличении концентрации пластификатора с 0,057 л до 0,744 л в составах относительные значения кубиковой прочности при сжатии изменяются от 1,07 до 1,93. При этом наибольшая относительная кубиковая прочность составляет 1,94, при количестве «Эдванс Ультра» – 0,515 л.

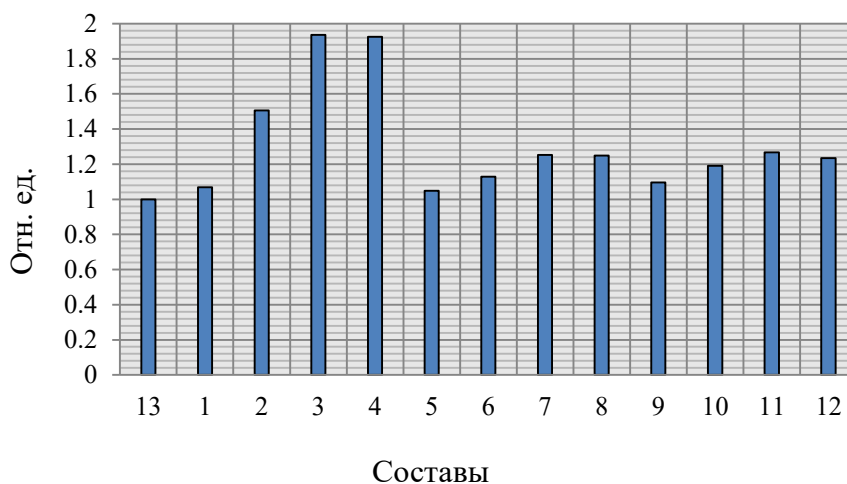


Рис. 1. Прочность при сжатии мелкозернистых бетонов, отвержденных в нормальных температурно-влажностных условиях

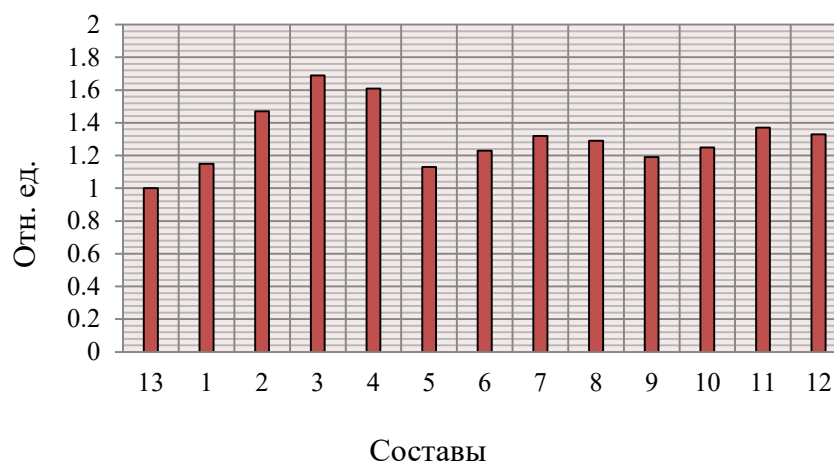


Рис. 2. Модуль упругости мелкозернистых бетонов, отвержденных в нормальных температурно-влажностных условиях

Согласно диаграмме 1 видно, что применение «Эдванс Ультра» в составе № 3 привело к увеличению прочности при сжатии по сравнению с составом №1 в 1,81 раза и в 1,94 раза по сравнению с составом № 13, где пластифицирующая добавка отсутствует.

Аналогичные зависимости характерны и для бетонов с комплексными добавками. Наибольшее относительное значение прочности при сжатии с «Суперпласт Прима» достигнуто в составе № 7, а с «Суперпласт Стандарт» в составе № 12 (рис. 1).

Следует отметить, что относительные значения модуля упругости также увеличиваются от повышения концентрации модификатора (рис. 2). Более детально разберем составы № 9 – 12 с «Суперпласт Стандарт». При увеличении комплексной добавки в составах с 0,098 л до 0,293 л относительные значения модуля упругости находятся в диапазоне 1,19–1,33. Наибольший модуль упругости соответствует составу содержащей «Суперпласт Стандарт» в количестве 0,228 л.

Согласно диаграмме 2 видно, что применение «Суперпласт Стандарт» в составе № 11 привело к повышению модуля упругости в сравнении с составом № 9 в 1,15 раз.

Анализируя полученные экспериментальные данные, можем сделать вывод, что наибольшие кубиковая прочность при сжатии и модуль упругости достигнуты с пластификатором «Эдванс Ультра». Данный модификатор является более эффективным по сравнению с комплексными добавками «Суперпласт Прима» и «Суперпласт Стандарт». Наилучшие относительные значения прочности при сжатии и модуля упругости достигнуты в составах № 3, № 7, № 11.

Выводы.

Разработаны составы мелкозернистых бетонов с различными модификаторами: «Эдванс Ультра», «Суперпласт Прима», «Суперпласт Стандарт».

Наилучшие относительные значения прочности при сжатии и модуля упругости были достигнуты в составах №3, №7, №11. Улучшение основных физико-механических показателей происходило и с минимальным количеством добавки в составах, в сравнении с бездобавочным составом №13, с которым получены менее удачные результаты. Следовательно, можно сделать вывод, что применение «Эдванс Ультра», «Суперпласт Прима», «Суперпласт Стандарт» в разных концентрациях способствует улучшению прочностных свойств и деформативности, т.е. данные модифицирующие добавки положительно воздействуют на показатели мелкозернистых бетонов.

Согласно проведенным исследованиям, наиболее эффективным модификатором, из используемых в работе, является пластификатор «Эдванс Ультра», поскольку с ним достигнуты наилучшие основные физико-механические характеристики по сравнению с «Суперпласт Прима» и «Суперпласт Стандарт».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каприелов С.С., Шенфельд А.В., Кардунян Г.С. Новые модифицированные бетоны в конструкциях высотных зданий // II Международный форум архитектуры, строительства, реконструкции городов, строительных технологий и материалов. Москва. 2008. С. 29–38.
2. Калашников В.И. Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения // Технологии бетонов. 2015. № 11–12. С. 27–35.
3. Максимова И.Н., Макридин Н.И., Ерофеев В.Т., Скачков Ю.П. Прочность и параметры разрушения цементных композитов: монография. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2015. 360 с.
4. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: АСВ, 2003. 50 с.

5. Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Черных Т.Н., Орлов А.А., Шульдяков К.В. Современный суперпластификаторы для бетонов, особенности их применения и эффективности // Строительные материалы. 2016. С. 21–25.
6. Ананенко А.А., Нижевясов В.В., Успенский А.С. Мелкозернистые бетоны с комплексными модификаторами // Известия высших учебных заведений Строительство. 2005. №5. С. 16–27.
7. Ерофеев В.Т., Дергунова А.В. Экономическая эффективность повышения долговечности строительных конструкций // Строительные материалы. 2008. №2. С. 8–89.
8. Калашников В.И., Тараканов О.В., Ерофеева И.В. Сухие реакционно-порошковые бетонные смеси и перспективы их использования // Материалы XI Международной научно-практической конференции «Актуальные достижения европейской науки». София, 2015. Т. 13. С. 90–93.
9. Калашников В.И., Ерофеев В.Т., Тараканов О.В., Архипов В.П. Концепция бетонов стратегического развития пластифицированных порошково-активированных нового поколения // Высокопрочные цементные бетоны: технологии, конструкции, экономика (ВПБ-2016): Сборник тезисов докладов международной научно-технической конференции. 2016. 36 с.
10. Булгаков А.Г., Ерофеева И.В., Ишутин А.А., Афонин В.В., Моисеев В.В. Прочность на растяжение при изгибе бетонов нового поколения // Эксперт: теория и практика. 2022. №2 (17). С. 21–27.
11. Калашников В.И., Ананьев С.В. Высокопрочные и особовысокопрочные бетоны с дисперсным армированием // Строительные материалы. № 6. 2009. С. 59–61.
12. Lesovik R.V., Klyuyev S.V., Klyuyev A.V., Netrebenko A.V., Yerofeyev V.T., Durachenko A.V. Fine-grain concrete reinforced by polypropylene fiber // Research Journal of Applied Sciences. 2015. Vol. 10. No. 10. Pp. 624–628.
13. Bobrishev A.A., Shafigullin L.N., Erofeev V.T., Treshchev A.A., Sotnikov M.I., Vyacheslav A. Study of effects of redispersable latex powders on hardening kinetics of cement-sand composites // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. Vol.7. No. 4. Pp. 795–802.
14. Erofeev V., Bobryshev A., Lakhno A., Shafigullin L., Khalilov I., Sibgatullin K., Igtisamov R. Theoretical evaluation of rheological state of sand cement composite systems with polyoxyethylene additive using topological dynamics concept // Solid State Phenomena. 2016. Vol. 871. Pp. 96–103.
15. Тараканов О.В., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф. Химические добавки в растворы и бетоны: монография: монография. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия. 2023. 168 с.
16. Батраков В.Г., Фаликмана В.Р. Химические добавки для бетонов: сборник научных трудов. НИИ бетона и железобетона. М.: НИИЖБ, 1987. 169 с.
17. Добшиц Л.М. Долговечность бетонов транспортных сооружений и пути ее повышения // Технологии бетонов. 2014. № 4. С. 32–37.
18. Erofeev V.T. Frame Construction Composites for Buildings and Structures in Aggressive Environments // Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. Pp. 1444–1447.
19. Самченко С.В., Зарин Д.А., Лам Н.З.Т., Лам Т.В. Влияние содержания комплексных добавок на деформационные характеристики цемента // Строительство: наука и образование. 2023. №1 (13). С. 137–151.
20. Лукутцова Н.П., Матвеева Е.Г., Фокин Д.Е. Исследование мелкозернистого бетона, модифицированного наноструктурной добавкой // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. № 4. С. 6–11.
21. Макридин Н.И., Максимова Н.И., Овсякова Ю.В. Долговременная прочность модифицированной структуры цементного камня. Часть 2 // Строительные материалы. 2011. № 7. С. 72–75.

Информация об авторах

Ледяйкина Оксана Васильевна, аспирант кафедры прикладной механики. E-mail: oksana.ledyaikina.97@mail.ru. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Институт Архитектуры и Строительства. Россия, 430000, , ул. Советская, д. 24.

Ледяйкин Никита Васильевич, аспирант кафедры строительных материалов и технологий. E-mail: nikita.1234.nikita@mail.ru. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Институт Архитектуры и Строительства. Россия, 430000, Саранск, ул. Советская, д. 24.

Поступила 05.02.2024 г.

© Ледяйкина О.В., Ледяйкин Н.В., 2024

***Ledyaykina O.V., Ledyaykin N.V.**

National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev

*E-mail: oksana.ledyaykina.97@mail.ru

STUDY OF THE INFLUENCE OF MODIFIED ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF CONCRETE

Abstract. The problem of improving the efficiency of the quality of concrete and reinforced concrete is a promising direction that cannot be fully realized without the use of chemical additives. Additives are considered a simple way to improve the performance of a cement composite; they allow to reduce the amount of binder and regulate the technological characteristics of the concrete mixture and the physical and mechanical properties of the material, as well as increase the durability of buildings and structures. Currently, a large number of additives are used, introduced into concrete mixtures, which are classified according to their mechanism of action, chemical composition and other characteristics. The purpose of this research was to optimize the compositions of concrete with additives in terms of strength and deformability. The object of the study is fine-grained concrete produced on a cement binder using various modifying additives, for which modifiers such as «Advance Ultra», «Superplast Prima», «Superplast Standard» have been studied. The studied parameters were the compressive strength and elastic modulus of fine-grained concrete. It was revealed that the introduction of modifying additives helped to increase the studied indicators. At the same time, the greatest increase in strength and elastic modulus is achieved when using the Advance Ultra plasticizer.

Keywords: fine-grained concrete, modifying additives, physical and mechanical properties, strength, deformability.

REFERENCES

1. Kaprielov S.S., Shenfeld A.V., Kardumyan G.S. New modified concretes in high-rise building structures [Novyye modifitsirovannyye betony v konstruktsiyakh vysotnykh zdaniy]. II International Forum of Architecture, Construction, Urban Reconstruction, Construction Technologies and Materials. Moscow. 2008. Pp. 29–38. (rus)
2. Kalashnikov V.I. How to transform old-generation concretes into high-performance new-generation concretes [Kak prevratit betony starogo pokoleniya v vysokoeffektivnyye betony novogo pokoleniya]. Concrete technologies. 2015. No. 11–12. Pp. 27–35. (rus)
3. Maksimova I.N., Makridin N.I., Erofeev V.T., Skachkov Yu.P. Strength and fracture parameters of cement composites [Prochnost i parametry razrusheniya tsementnykh kompozitov]. Saransk: Mordovian University Publishing House. 2015. 360 p. (rus)
4. Bazhenov Yu.M. Concrete technology [Tekhnologiya betona]. M.: ACB, 2003. 50 p. (rus)
5. Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Chernykh T.N., Orlov A.A., Shuldyakov K.V. Modern superplasticizers for concrete, features of their use and effectiveness [Sovremennyy superplastifikatory dlya betonov, osobennosti ikh primeneniya i effektivnosti]. Construction Materials. 2016. Pp. 21–25. (rus)
6. Ananenko A.A., Nizhevyasov V.V., Uspensky A.S. Fine-grained concrete with complex modifiers [Melkozernistyye betony s kompleksnymi modifikatorami]. News of higher educational institutions Construction. 2005. No. 5. Pp. 16–27. (rus)
7. Erofeev V.T., Dergunova A.V. Ekonomicheskaya effektivnost povysheniya dolgovechnosti stroitelnykh konstruktsiy [Ekonomicheskaya effektivnost povysheniya dolgovechnosti stroitelnykh konstruktsiy]. Construction Materials. 2008. No. 2. Pp. 8–89. (rus)
8. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Erofeeva I.V. Dry reaction-powder concrete mixtures and prospects for their use [Sukhiye reaktsionno-poroshkovyye betonnyye smesi i perspektivy ikh ispolzovaniya]. Materials of the XI International Scientific and Practical Conference "Current Achievements of European Science". Sofia. Vol. 13. 2015. Pp. 90–93. (rus)
9. Kalashnikov V.I., Erofeev V.T., Tarakanov O.V., Arkhipov V.P. The concept of strategic development of plasticized powder-activated concrete of a new generation [Kontseptsiya betonov strategicheskogo razvitiya plastifitsirovannykh poroshkovo-aktivirovannykh novogo pokoleniya]. High-strength cement concrete: technologies, structures, economics (VPB-2016): Collection of abstracts of reports of the international scientific and technical conference. 2016. 36 p. (rus)
10. Bulgakov A.G., Erofeeva I.V., Ishutin A.A., Afonin V.V., Moiseev V.V. Tensile strength in bending of new generation concretes [Prochnost na raztyazheniye pri izgibe betonov novogo pokoleniya]. Expert: theory and practice. 2022. No. 2 (17). Pp. 21–27. (rus)
11. Kalashnikov V.I., Ananyev S.V. High-strength and extra-high-strength concrete with dispersed reinforcement [Vysokoprochnyye i osobo-

vysokoprochnyye betony s dispersnym armirovaniyem]. Construction Materials. No. 6. 2009. Pp. 59–61. (rus)

12. Lesovik R.V., Klyuyev S.V., Klyuyev A.V., Netrebenko A.V., Yerofeyev V.T., Durachenko A.V. Fine-grain concrete reinforced by polypropylene fiber. Research Journal of Applied Sciences. 2015. Vol. 10. No. 10. Pp. 624–628.

13. Bobrishev A.A., Shafigullin L.N., Erofeev V.T., Treshchev A.A., Sotnikov M.I., Vyacheslav A. Study of effects of redispersable latex powders on hardening kinetics of cement-sand composites. Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. Vol. 7. No. 4. Pp. 795–802.

14. Erofeev V., Bobryshev A., Lakhno A., Shafigullin L., Khalilov I., Sibgatullin K., Igtisamov R. Theoretical evaluation of rheological state of sand cement composite systems with polyoxyethylene additive using topological dynamics concept. Solid State Phenomena. 2016. Vol. 871. Pp. 96–103.

15. Tarakanov O.V., Erofeev V.T., Smirnov V.F. Chemical additives in mortars and concretes: monograph [Khimicheskiye dobavki v rastvory i betony]. Moscow, Vologda: Infra-Engineering. 2023. 168 p. (rus)

16. Batrakov V.G., Falikmana V.R. Chemical additives for concrete [Khimicheskiye dobavki dlya betonov]. M.: NIIZhB, 1987. 169 p. (rus)

17. Dobshits L. M. Durability of concrete in transport structures and ways to increase it [Dolgovechnost betonov transportnykh sooruzheniy i puti ee povysheniya]. Concrete technologies. 2014. No. 4. Pp. 32–37. (rus)

18. Erofeev V.T. Frame Construction Composites for Buildings and Structures in Aggressive Environments. Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. Pp. 1444–1447.

19. Samchenko S.V., Zarin D.A., Lam N.Z.T., Lam T.V. Influence of the content of complex additives on the deformation characteristics of cement [Vliyaniye soderzhaniya kompleksnykh dobavok na deformatsionnyye kharakteristiki tsementa]. Construction: science and education. 2023. Vol. 13. No. 1 Pp. 137–151. (rus)

20. Lukutsova N.P., Matveeva E.G., Fokin D.E. Study of fine-grained concrete modified with a nanostructured additive [Issledovaniye melkozernistogo betona. modifitsirovannogo nanostrukturnoy dobavkoy]. Bulletin of BSTU named after. V.G. Shukhova. 2010. No. 4. Pp. 6–11. (rus)

21. Makridin N.I., Maksimova N.I., Ovsyukova Yu.V. Long-term strength of modified cement stone structure. Part 2 [Dolgovremennaya prochnost modifitsirovannoy struktury tsementnogo kamnya. Chast 2]. Construction Materials. 2011. No. 7. Pp. 72–75. (rus)

Information about the authors

Ledyaykina, Oksana V. Postgraduate student of the Department of Applied Mechanics. E-mail: oksana.ledyaykina.97@mail.ru. National Research Mordovian State University named after. N.P. Ogareva, Institute of Architecture and Construction. Russia, 430000, Saransk, st. Sovetskaya, 24.

Ledyaykin, Nikita V. Postgraduate student at the Department of Construction Materials and Technologies. E-mail: nikita.1234.nikita@mail.ru. National Research Mordovian State University named after. N.P. Ogareva, Institute of Architecture and Construction. Russia, 430000, Saransk, st. Sovetskaya, 24.

Received 05.02.2024

Для цитирования:

Ледяйкина О.В., Ледяйкин Н.В. Исследование влияния модифицированных добавок на свойства бетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №4. С. 8–15. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-8-15

For citation:

Ledyaykina O.V., Ledyaykin N.V. Study of the influence of modified additives on the properties of concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 4. Pp. 8–15. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-8-15

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-16-25

Ушницкая Н.Н., Местников А.Е.Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова***E-mail: ushnitskaya.97@mail.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ МЕТОДАМИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Аннотация. В статье приведены результаты исследования свойств глинистого сырья с использованием современных методов физико-химического анализа: РФА, РСА, РЭМ и термический анализ. Рассмотрены два вида глинистого сырья по цвету керамического черепка: светложгущиеся и красножгущиеся глины. Исследуемое глинистое сырье содержит незначительное количество глинистых и высокое содержание пылеватых частиц, относится к умереннопластичным и среднепластичным глинам и суглинкам. Рентгеноспектральный анализ позволил определить химический количественный состав основных оксидов глинистого сырья. При термическом анализе природного глинистого сырья, имеющего полиминеральный состав, наблюдаются экзо- и эндотермические эффекты, характерные для исследуемых минералов – монтмориллонита и каолинита. По минеральному составу глинистое сырье Центральной Якутии является полиминеральной, основным глинистым минералом являются монтмориллонит и каолинит, в качестве примесей установлены кварц, кальцит, хлорит, минералы из группы слюд и полевых шпатов, смешаннослойные минералы. Низкое качество глинистого сырья предполагает, в дальнейшем, проведение дополнительных исследований для улучшения технологических и физико-механических керамических изделий из местного глинистого сырья. В проектировании составов исходных смесей (шихт) могут быть использованы местное природное и техногенное минеральное сырье.

Ключевые слова: глинистое сырье, физико-химический анализ, физико-механические, химические и технологические свойства.

Введение. На территории Республики Саха (Якутия) еще в советское время геологоразведочными изысканиями были установлены 6 группировок месторождений глинистого сырья по запасам: 1) глины, суглинки легкоплавкие для кирпича; 2) глины, суглинки легкоплавкие для керамзита; 3) глины тугоплавкие для строительных изделий; 4) глины и суглинки для дренажных труб; 5) беложгущиеся глины для строительных целей; 6) глины, аргиллиты для строительных целей [1]. Из них на сегодня эксплуатируется только одно месторождение глин для производства цемента, производства кирпича и керамзита были закрыты с наступлением рыночных отношений.

Как показывает практика, Покровское и Мархинское месторождения, эксплуатируемые двумя кирпичными заводами вблизи г. Якутска, были истощены еще до их закрытия в 1986–1988 гг. Разведанные и подготовленные к эксплуатации Аллахское и Аласское месторождения для их замещения так и остались не использованными. Другие средние и мелкие месторождения, находящиеся в сельской местности, ранее использовались только для сезонного производства кирпича низкой марки, в основном, для кладки отопительных печей.

В связи с истощением крупных месторождений и наличием множества средних и мелких месторождений [2] для обеспечения потребности

локального строительства вдали от промышленных центров возникает необходимость в создании малых производств с производительностью до 3–5 млн. штук условного кирпича в год. Для малых производств экономически целесообразным вариантом может быть использование технологии полусухого прессования [3]. Таким образом, на сегодня актуальным является возобновление производств керамического кирпича на основе местного глинистого сырья, природного газа [4] и отечественного технологического оборудования [5].

Цель работы: изучение физико-механических, химических и технологических свойств глинистого сырья Центральной Якутии.

Материалы и методы. Отбор проб глинистого сырья производился на территориях Ленского бассейна, относящихся к Центральной Якутии. Образцы представительных легкоплавких красножгущихся глин отобраны из двух месторождений: Санниковское и Усть-Алданское. Образцы легкоплавких светложгущихся глин отобраны из неучтенных сводным балансом месторождений: Намцырское и Амгинское. В качестве контрольного образца взята импортная глина, которая используется для гончарного производства.

Основные свойства глинистого сырья определялись стандартными и современными методами в соответствии с требованиями

ГОСТ 21216-2014 «Сырье глинистое. Методы испытаний». Физико-химический анализ и определение физико-механических свойств глинистого сырья проведены на оборудовании Центра коллективного пользования Арктического инновационного центра СВФУ: прибор синхронного термического анализа фирмы NETZSCH – STA 449C Jupiter (Германия), дифрактометр D2 PHASER фирмы Bruker (Германия) и растровый электронный микроскоп «JEOL JSM-7800F» (Япония), машина испытательная Autograph – AG-IS модель MS (Япония), пресс гидравлический GT-7014-H10C.

Изготовление образцов пластического формования заключается в следующем. Сырье высушивалось в сушильном шкафу при температуре $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ в течении 4 часов до постоянной массы, затем добавляется требуемое количество воды отдельно для сырья из каждого месторождения. Из полученной массы формируются не менее шести образцов-балочек размерами $135 \times 30 \times 15$ мм и не менее десяти образцов-цилиндров 50×70 мм с помощью специальной формы и уплотнением с пригрузом в 32 кг. Образцы-балочки и образцы-цилиндра сушат на воздухе, а затем в сушильном шкафу при температуре $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ до постоянной массы. Сухие образцы-балочки и образцы-цилиндры охлаждаются и хранятся в эксикаторе до проведения испытания. Половина образцов обжигается в лабораторной муфельной печи при температуре 950°C в течении 6 часов по заданной программе.

Перед началом проведения испытаний образцы измеряются с точностью до 1 мм. Каждый линейный размер образца вычисляется путем

нахождения среднего арифметического результатов измерений двух средних линий противоположных поверхностей образца.

Предел прочности при изгибе определяются на приборе Autograph AGS-JSTD. W/O L CELL. Образец устанавливается на двух опорах пресса. Нагрузка прикладывается в середине пролета и равномерно распределяется по ширине образца. Нагрузка на образец должна возрастать непрерывно со скоростью, обеспечивающей его разрушение через 20–60 с после начала испытаний.

Предел прочности при сжатии определяется на приборе GT-7014-H10C. Диаметр цилиндра вычисляется как среднее арифметическое значение результатов четырех измерений: в каждом торце по двум взаимно перпендикулярным направлениям. На боковые поверхности образца наносятся вертикальные осевые линии. Образец устанавливается в центре плиты пресса, совмещая геометрические оси образца и плиты, и прижимается верхней плитой пресса. Нагрузка на образец должна возрастать непрерывно и равномерно со скоростью, обеспечивающей его разрушение через 20–60 с после начала испытания.

Основная часть. Определение гранулометрического состава по методу Рутковского (таблица 1) показало, что у импортного образца содержание частиц равномерно распределённое и классифицируется по содержанию тонкодисперсных фракций как низкодисперсный. Следует отметить, что пробы из Амгинского и Намцырского месторождений, которые согласно классификации ГОСТ 9169-2021 по содержанию глинистых частиц не уступают импортному и входят в группу низкодисперсных. Образцы Усть-Алданского и Санниковского месторождений относятся к группе грубодисперсных.

Таблица 1

Технологические свойства глинистого сырья

№ обр.	Месторождение	Гранулометрический состав, % по объёму			Число пластичности	Воздушная усадка, %	Огневая усадка, %
		50–100 мкм	5–50 мкм	<5 мкм			
1	Импортное	36,12	31,46	34,42	17	2,34	6,16
2	Амгинское	35,20	41,68	23,12	10	3,71	10,92
3	Намцырское	4,36	68,52	27,12	15	5,62	5,18
4	Усть-Алданское	39,30	47,30	13,40	8	5,86	5,67
5	Санниковское	42,50	55,24	2,26	10	6,05	6,39

По числу пластичности Импортное и Намцырское глинистое сырье относятся к среднепластичному, остальные – к умереннопластичным. По спекаемости все образцы относятся к неспекающемуся легкоплавкому глинистому сырью. Керамические черепки образцов 1, 2 и 3 после обжига обретают светлые оттенки от светло-серого до светло-кремового цвета (ввиду малого

количества железистых примесей, табл. 2) и в настоящее время, в основном, используются для гончарного производства. Поэтому их условно можно отнести к глинам. Образцы глинистого сырья 4 и 5 относятся к красножгущимся суглинкам низкого качества и требуют тщательной отработки технологии производства керамического кирпича на их основе [6, 7].

Химический анализ глинистого сырья разных месторождений проводили методом рентгеноспектрального анализа (РСА) на рентгеновском спектрометре SRS-3400 Института горного

дела СО РАН [8, 9]. Основным преимуществом данного метода является отсутствие сложной химической подготовки исследуемых материалов [10, 11].

Таблица 2

Химический состав глинистого сырья, мас. %

Оксиды	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
Импортное	0,31–0,34	0,48–0,50	34,38–34,39	60,28–60,98	0,06–0,07	0,68–0,82	0,65–0,71	0,93–0,98	1,48–1,50
Амгинское	0,25–0,28	2,28–2,30	16,40–16,43	53,58–53,66	0,21–0,22	5,34–5,48	1,28–1,35	3,28–3,32	1,20–1,22
Намцырское	0,93–0,96	0,56–0,57	22,37–22,38	63,50–63,59	0,03–0,04	2,19–2,51	0,52–0,56	1,68–1,73	0,80–0,82
Санниковское	2,09–2,12	2,13–2,15	14,34–14,71	63,26–63,31	0,12–0,13	2,58–2,66	3,08–3,15	4,27–4,39	0,76–0,78
Усть-Алданское	1,96–1,99	2,73–2,76	15,60–15,97	58,09–58,19	0,11–0,12	2,21–2,48	3,05–3,12	4,18–4,26	0,83–0,85

Для изучения минерального состава глинистого сырья широко используется рентгенофазовый анализ (РФА) [12–16]. В данном исследовании РФА проводился в Институте геологии алмаза и благородных металлов СО РАН с использованием дифрактометра D2 PHASER от фирмы Bruker (Германия) с CuK α -излучением, напряжением 30 кВ, током 10 мА и диапазоном 4,5–65° (2 θ). Для идентификации минералов использовалась база данных PDF-2/Release 2011 RDB. Исследовались измельченные образцы в порошкообразном состоянии [17]. На рисунке 1 представлена дифрактограмма глинистого сырья из определенного месторождения, включая список обнаруженных минералов. Однако следует отметить,

что формулы минералов стандартов нельзя идентифицировать с формулами действительно присутствующих минералов, так как возможные изоморфные замещения в формуле минерала могут не существенно изменить метрику элементарной ячейки и, следовательно, рентгенограмму. Как показывают результаты РФА, в образцах Намцырского глинистого сырья обнаружены кварц, минералы из группы полевых шпатов, минерал из группы монтмориллонита (смещение пика после насыщения этиленгликолем), минерал из группы слюд, как вероятный – минерал из группы каолинита.

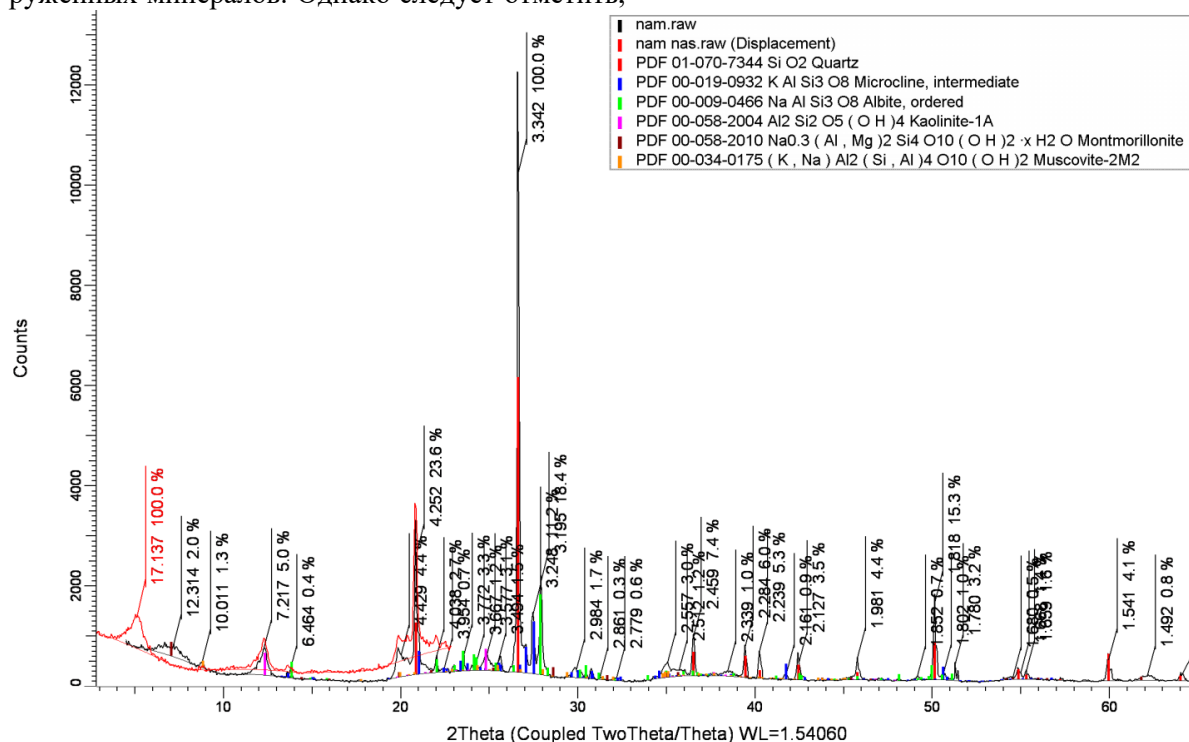


Рис. 1. Дифрактограмма глинистого сырья Намцырского месторождения – представителя светложгущихся глин

Термический анализ выполнен на приборе синхронного термического анализа фирмы NETZSCH – STA 449C Jupiter (Германия). Этот метод позволяет определить температуры, при которых происходят различные фазовые переходы,

и идентифицировать минералы в глинистых породах [18, 19]. Образцы глин в виде порошка (разной навески) нагревались в PtRh тиглях от комнатной температуры до 1000 °C со скоростью нагрева 10 °C/мин в инертной среде – аргон.

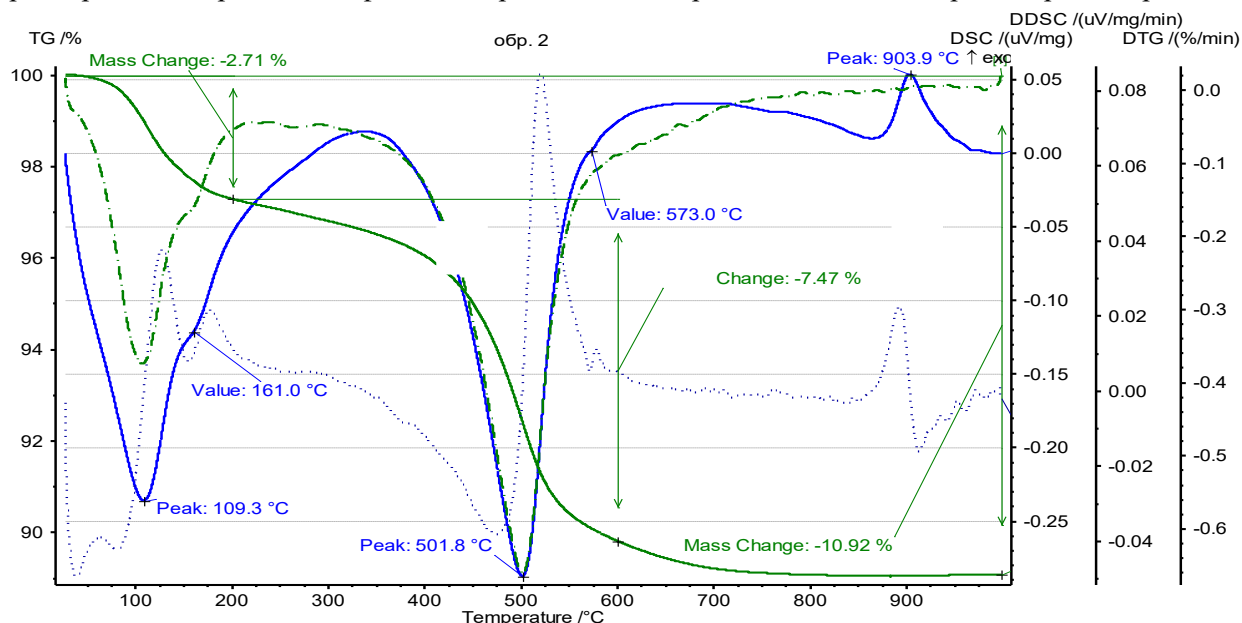


Рис. 2. Результаты термического анализа глинистого сырья Намцырского месторождения – представителя светложгущихся глин

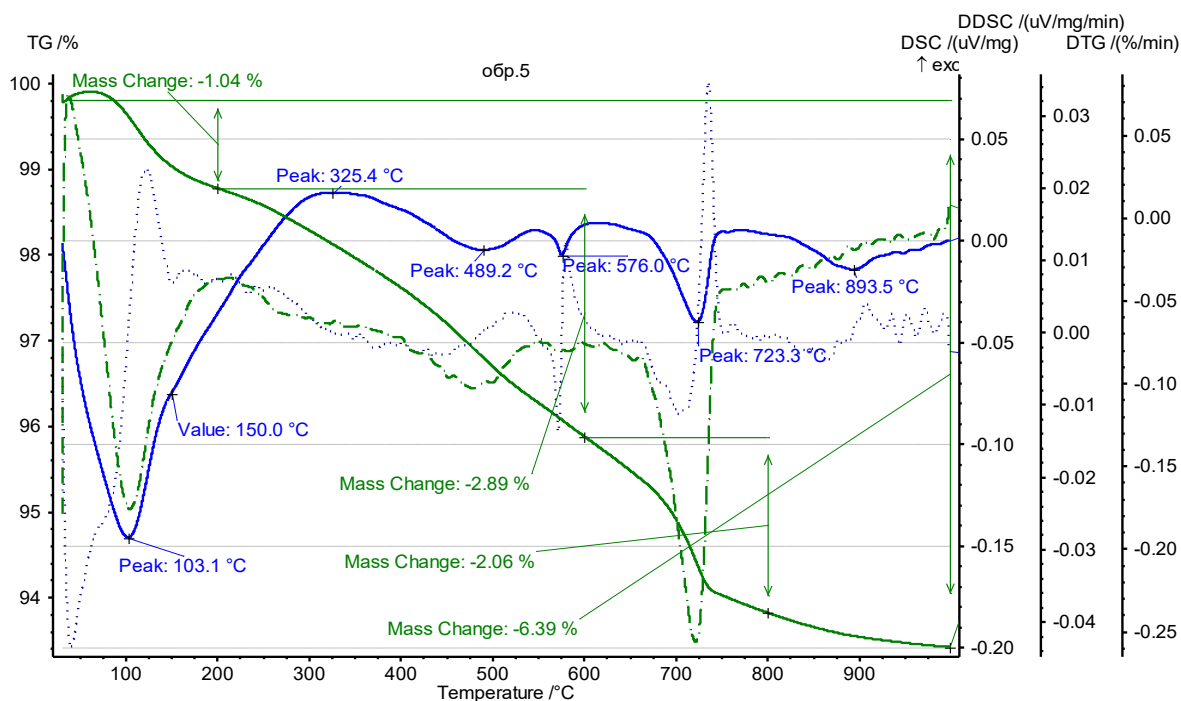


Рис. 3. Результаты термического анализа глинистого сырья Санниковского месторождения – представителя красножгущихся суглинков

Рисунки 2 и 3 демонстрируют результаты термического анализа в виде графиков: ТГ (интегральная кривая термогравиметрии) отображает изменение массы образца (%) в зависимости от температуры (°C); ДТГ (первая производная от кривой термогравиметрии) отображает скорость

изменения массы образца во времени (%/мин); ДСК (тепловые эффекты дифференциальной сканирующей калориметрии) показывает экзотермические и эндотермические эффекты (мВт/мг) в зависимости от температуры (°C).

Из графика ТГ (рис. 2 и 3) видно, что образцы теряют массу поэтапно. Первый эндотермический пик соответствует выделению сорбированной воды, второй пик связан с выделением воды, связанной с гидроксильными группами (аморфизация), третий эндотермический пик обусловлен дис-

социацией карбоната, а экзотермический пик характеризует кристаллизацию муллита в каолинитах. Кварц обнаружен во всех образцах при температуре от 573 до 576,4 °С.

Результаты количественных показателей термического анализа глинистого сырья по значениям ТГ-кривых приведены в табл. 3.

Таблица 3

Потеря массы образцов при фазовых переходах, %

№ обр.	Масса, мг	24–200 °С	200–600 °С	600–750 °С	750–1000 °С	Общая потеря массы при 1000 °С
1*	39,65	0,35	4,43	1,50	0,13	6,16
2	32,09	2,71	7,47	–	–	10,92
3	34,62	0,75	3,83	–	–	5,18
4	32,51	0,84	2,59	1,97	–	5,67
5	36,11	1,04	2,89	2,06	–	6,39

* – номера образцов приведены в соответствии с табл. 1

В интервале температур 24–200 °С потеря массы у всех образцов сильно не отличается, что вызвано удалением адсорбционной воды и сгоранием органических примесей. Максимальная потеря массы образцов происходит в интервале

температур 200–600 °С в пределах 2,59–7,47 % по массе определяется разрушением структуры каолинита, как и предполагают в работе [18].

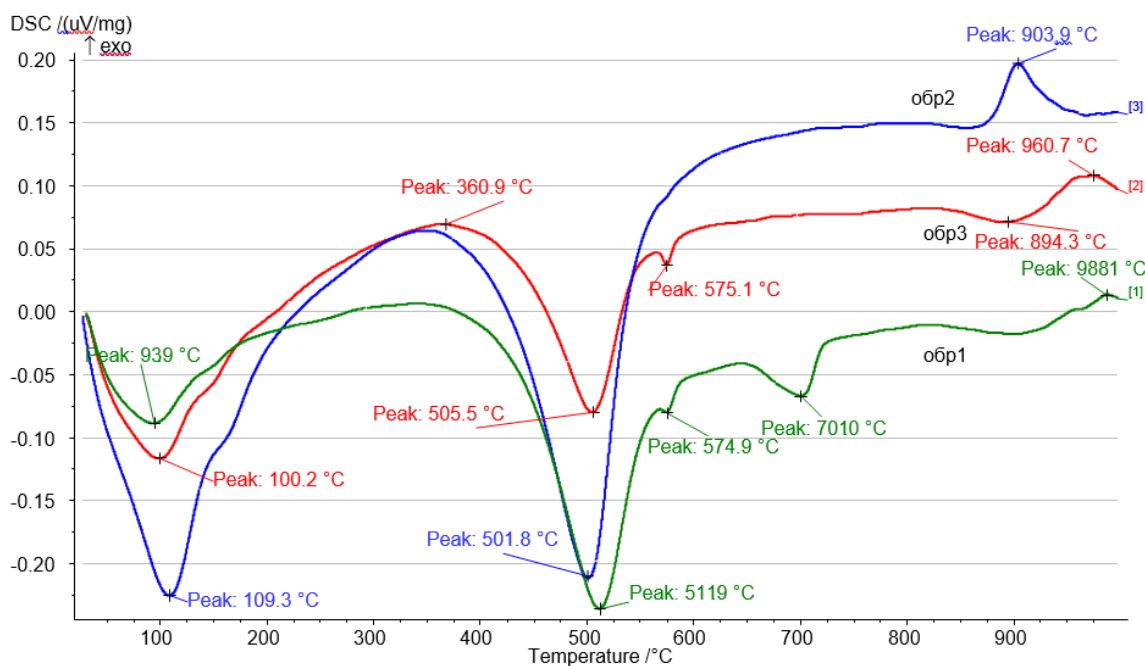


Рис. 4. Термическая диаграмма (ДСК-кривая) светложущихся глин:
1 (зеленая линия) – импортное, 2 (синяя) – Амгинское, 3 (красная) – Намцырское

Ярко выраженный эндотермический эффект каолинита наблюдается в светложущихся глинах (рис. 4) в интервалах температур 500–600 °С с острой вершиной в 511,9, 501,8 и 505,5 °С соответственно у образцов 1, 2 и 3. В данном случае, как отмечается в работе [19], процесс для муллита происходит быстро, интенсивно, так как на амплитуда эндотермического эффекта значи-

тельная, и пик имеет острую форму. Экзотермический эффект проявляется в диапазоне температур от 900 до 1000 °С с достаточно острыми пиками в 988,1, 960,7 и 903,9 °С соответственно у образцов 1, 2 и 3. Таким образом, следует отметить в светложущихся глинах присутствующий каолинит имеет очень хорошую степень кристаллизации.

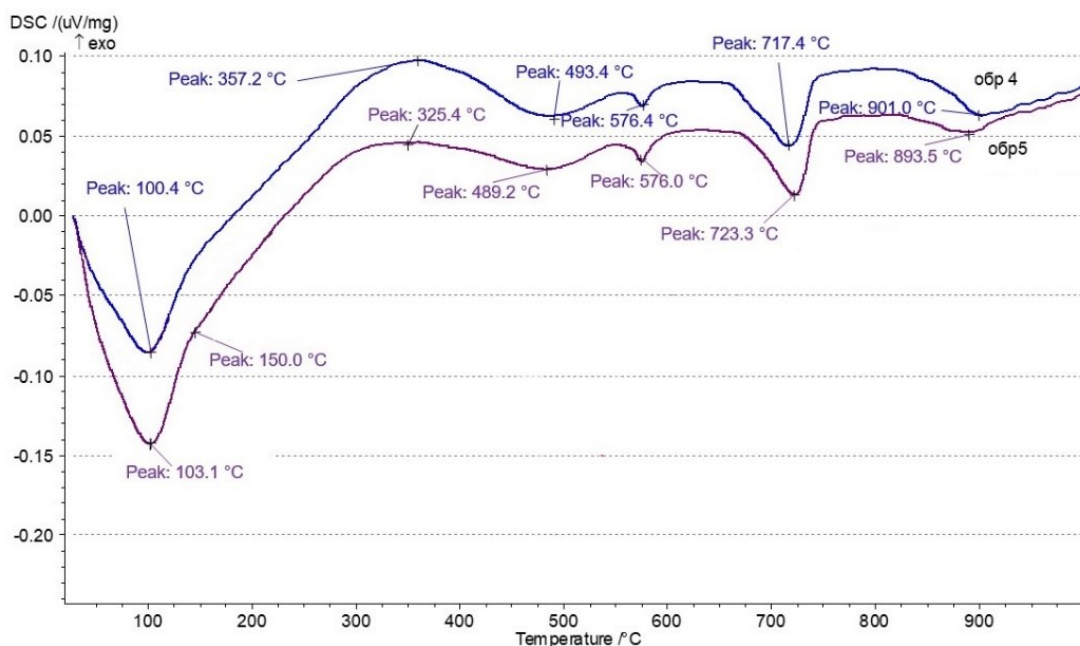


Рис. 5. Термическая диаграмма (ДСК-кривая) красножгущихся суглинков: 4 (голубая) – Усть-Алданское, 5 (фиолетовый) – Санниковское

Как показывают ДСК-кривые в табл. 5, слабый эндотермический эффект каолинита наблюдается у образцов красножгущихся суглинков при температурах меньше 500 °С с пиками в 493,4 и 489,2 °С для образцов 4 и 5 соответственно. Экзотермический эффект в интервале температур 900–1000 °С практически не заметен. Поэтому следует отметить, что в образцах красножгущихся суглинков в незначительных количествах имеется каолинит со низкой степенью кристаллизации.

Как отмечено в статье [20], в Ал-монтмориллонитах температура второго эндозэффекта колеблется в пределах 600–700 °С и 700–800 °С. Поэтому в ДСК-кривых рис. 4-5 наличие эндозэффектов с пиком в 701,0, 717,4 и 723,3 у образцов 1, 4 и 5 соответственно предполагает присутствие в них монтмориллонита (табл. 4).

По результатам рентгенофазового и термического анализа образцов глинистого сырья составлена таблица наличия основных минералов, влияющих на свойства керамических изделий из них (табл. 2).

Таблица 4

Минералогический состав глинистого сырья

Название минерала	Месторождения				
	1 Импортное	2 Амгинское	3 Намцырское	4 Усть-Алданское	5 Санниковское
Монтмориллонит	+			+	+
Каолинит	+	+	+	+	+
Кварц	+	+	+	+	+
Полевой шпат			+		
Слюда	+	+	+	+	+
Кальцит	+				
Карбонат				+	+
Альбит			+		

Сопоставление изображений, полученных в разных сигналах РЭМ, позволяет делать вывод о морфологии и составе поверхности глинистых образцов. По результатам РЭМ установлены элементы и их процентные соотношения. Кристаллы монтмориллонита хорошо наблюдаются по форме и структурным особенностям. Они обнаружены в красножгущихся глинах (Санниковская и Усть-Алданская). Кристаллы каолинита обнаружены во всех образцах глинистого сырья,

на изображениях хорошо проглядываются контуры плоских ограненных частиц и их микроагрегатов.

Прочностные характеристики образцов сырья и обожженных материалов определялись по стандартной методике (табл. 6). Повышенной прочностью при сжатии в 6,03 и 3,91 МПа обладают обожженные глины (импортная и Намцырская), применяемые в гончарном деле, хотя имеют низкие показатели прочности при изгибе

по сравнению с другими керамическими образцами. Следует отметить, что по показателям технологических (табл. 1) и прочностных характеристик (рис. 6) исследуемые суглинки разведанных месторождений (Амгинское, Усть-Алданское и

Санниковское) относятся к низкокачественному глинистому сырью для производства керамического кирпича и требуют дальнейшей отработки технологии.

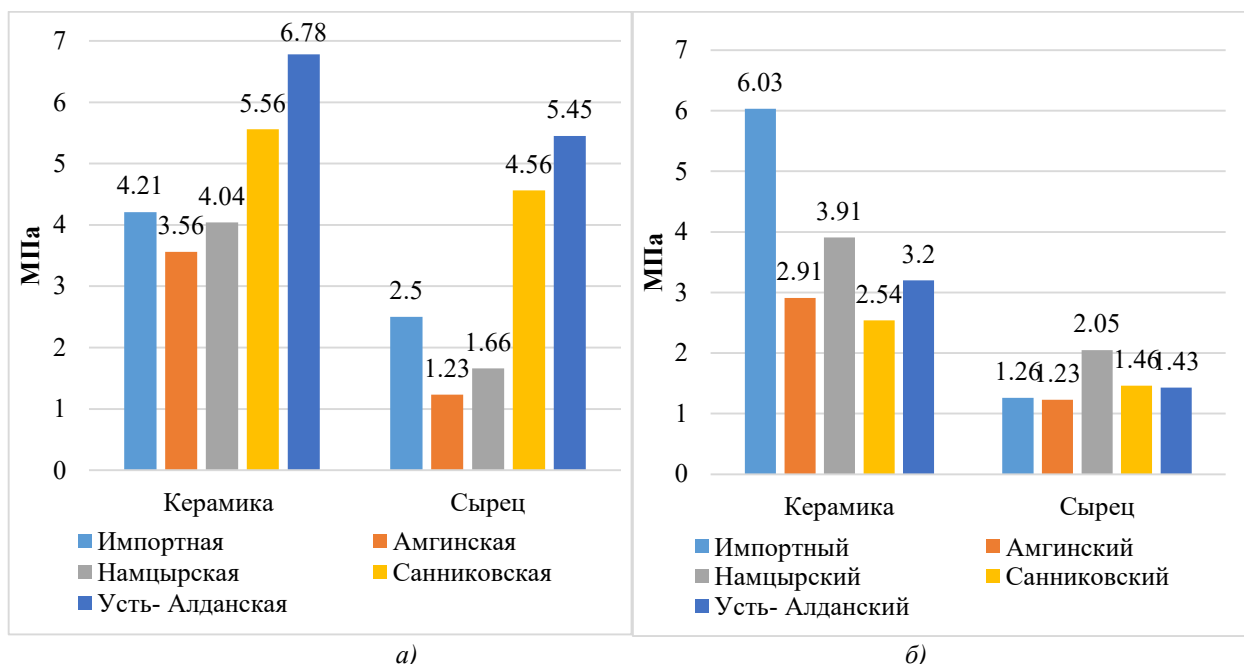


Рис. 6. Прочностные характеристики образцов:

а – предел прочности при сжатии, МПа; б – предел прочности при изгибе, МПа

Испытуемые образцы подвергались резким перепадам температур согласно ГОСТ 473.5-81 «Изделия химически стойкие термостойкие керамические». Установлено, что керамические образцы из природного глинистого сырья (Намцырский – 14, Амгинский – 8, Санниковский и Усть-Алданский – 10 циклов) обладают меньшей термостойкостью, чем из импортной гончарной глины (18 циклов).

Выводы.

1. Показана эффективность использования современных методов физико-химического анализа (РФА, РСА, РЭМ и термический анализ) в исследовании физико-механических, химических и технологических свойств глинистого сырья для производства керамических изделий.

2. Химический состав исследуемого глинистого сырья определялся методом рентгеноспектрального анализа, не требующей предварительной химической подготовки исходных образцов. Глинистое сырье содержит оксиды кремния (53,58–63,59 % мас.), алюминия (14,34–34,39 % мас.), железа (0,93–4,39 % мас.), кальция (0,52–3,15 % мас.), магния (0,48–2,76 % мас.), натрия (0,25–2,12 % мас.), калия (0,68–5,48 % мас.), титана (0,76–1,50 % мас.), а также следы различных примесей.

3. Комплексный термический и рентгенофазовый анализ позволяет определить минеральный состав исследуемого глинистого сырья. В

процессе термического анализа природного глинистого сырья, которое состоит из разнообразных минералов, наблюдаются экзотермические и эндотермические эффекты, соответствующие монтмориллониту и каолиниту. Результаты исследования указывают на то, что исследуемое легкоплавкое глинистое сырье в основном состоит из каолинита и монтмориллонита, присутствуют примеси кварца, слюды, кальцита, хлорита и многослойных минералов.

4. Красножгущиеся суглинки относятся к глинистому сырью низкого качества для производства керамического кирпича. Обоженные образцы пластического формования имеют невысокие показатели по прочности при сжатии в пределах 6,78–5,56 МПа. Поэтому глинистое сырье подлежит дальнейшему исследованию для улучшения технологии переработки сырьевых компонентов. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании исходных составов смесей (шихт) с различными добавками из природного и техногенного сырья.

5. Светложгущиеся глины могут быть использованы с последующей доработкой технологии в изготовлении керамических изделий декоративно-художественного, бытового и строительного назначения, а также в качестве минеральной добавки в производстве лицевого кирпича.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пояснительная записка к обзорной карте месторождений строительных материалов Якутской АССР масштаба 1:2500000. Т. 1 и 2. М: Объединение «Союзгеолфонд», 1988. 421 с.
2. Ушницкая Н.Н., Местников А.Е. Физико-химический анализ глинистого сырья для керамики // Успехи современного естествознания. 2022. № 10. С. 124–129.
3. Тацки Л.Н., Ильина Л.В., Филин Н.С. Технологические принципы повышения качества керамического кирпича полусухого прессования из низкокачественного сырья // Известия вузов. Строительство. 2019. № 7. С. 35–48.
4. Соромотин А.М. Нефтегазовые ресурсы Республики Саха (Якутия): состояние, перспективы использования // Вестник СВФУ. 2014. Том 11. № 2. С. 129–136.
5. Женжурист И.А. Проблемы предприятий строительной керамики малой мощности // Строительные материалы. 2000. № 7. С. 2–3.
6. Столбоушкин А.Ю. Перспективное направление развития строительных керамических материалов из низкокачественного сырья // Строительные материалы. 2018. № 4. С. 24–28.
7. Столбоушкин А.Ю., Фомина О.А., Дашжамц Д. Перспективы использования некондиционного сырья в производстве керамических изделий // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 115–119.
8. Sutakova E., Mestnikov A. Basics of recreation of ancient ceramics production technology // EDP Science. 2018. Pp. 95–100.
9. Карпова В.Г., Сутакова Э.М. Изучение технологических параметров керамической глазури на основе глин Санниковского и Верхневилуйского месторождений Республики Саха (Якутия) // Естественно-научные исследования: итоги и перспективы развития. Ч. 3. 25-летие химического отделения: итоги и перспективы развития: сборник научных трудов научно-практической конференции. Якутск: издательство СВФУ, 2018. С. 212–216.
10. Батршина Г.С., Давлетшина А.Д. Исследование структуры глинистого сырья для керамических изделий // Строительные материалы и изделия. 2020. Том 3. № 4. С. 13–23.
11. Evtushenko E.I., Moreva I.Yu., Sysa O.K., Bedina V.I., Trunov E.M. Control of the structural and phase characteristics of raw materials in the technology of fine ceramics // Refractories and Industrial Ceramics. 2011. Vol 51. № 6. Pp. 397–398.
12. Рентгеноспектральные и морфологические исследования продуктов дробления // Наука и образование. 2016. № 3. С. 68–75.
13. Ильина Л.В., Тацки Д.Н. Наномодифицирование низкокачественного глинистого сырья – способ повышения прочности керамического черепка // Вестник ЮрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2022. Т. 22. № 2. С. 28–36.
14. Chetverikova A.G., Kanygina O.N., Filyak M.M., Savinkova E.S. Physical optics methods of recording weak structural responses of dispersed clay systems to the effect of microwave radiation // Measurement Techniques. 2018. T. 60. № 11. Pp. 1109–1115.
15. Morozov V., Eskin A., Salakhov A., Korolev E. Modern methods studying the phase composition of clay raw material at kiln process // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 21, Construction - The Formation of Living Environment. 2018. 032048.
16. Oranska O.I., Gornikov Yu.I. X-Ray Diffraction and Thermal Studies on Some Food and Cosmetic Bentonite Clays. Khimiya, fizika ta tekhnologiya poverkhni = Chemistry, Physics and Technology of Surface. 2019. Vol. 10. №1. Pp. 13–21.
17. Будыкина Т.А., Гандурина Л.В. Исследование свойств глинистых пород методом термического анализа // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2023. №65(1). С. 77–88.
18. Нгуен Нгок Нам, Лай Тхи Биск Тхуи, Фам Динь Ан. Оценка эффективности методов рентгеноструктурного анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии при анализе глинистых минералов // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Гидрогеология и инженерная геология месторождений полезных ископаемых. 2019. Т. 42. № 2. С. 221–228.
19. Маслова М.Д., Белопухов С.Л., Тимохина У.С., Шнее Т.В., Нефедьева Е.Э., Шайхиев И.Г. Термохимические характеристики глинистых минералов и слюд // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 21. С. 121–127.

Информация об авторах

Ушницкая Нюргуяна Нюргуновна, аспирант. E-mail: ushnitskaya.97@mail.ru. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, 58.

Местников Алексей Егорович, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной механики и строительного материаловедения. E-mail: mestnikovae@mail.ru. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, 58.

Поступила 18.02.2024 г.

© Ушницкая Н.Н., Местников А.Е., 2024

***Ushnitskaya N.N., Mestnikova A.E.**

North-Eastern Federal University named M.K. Ammosov

*E-mail: ushnitskaya.97@mail.ru

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF CLAY RAW MATERIALS BY METHODS OF PHYSICO-CHEMICAL ANALYSIS

Abstract. The article presents the results of the study of the properties of clay raw materials using modern methods of physico-chemical analysis: X-ray fluorescence analysis (XRF), X-ray diffraction analysis (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and thermal analysis. Two types of clay raw materials based on the color of the ceramic shard were considered: light-burning and red-burning clays. The studied clay raw materials contain a small amount of clay minerals and a high content of dusty particles, belong to moderately plastic and medium plastic clays and loams. X-ray spectral analysis allowed to determine the chemical quantitative composition of the main oxides of clay raw materials. Thermal analysis of natural clay raw materials, which have a polymineral composition, reveals exothermic and endothermic effects characteristic of the studied minerals – montmorillonite and kaolinite. According to the mineral composition, the clay raw materials of Central Yakutia are polymineral, with the main clay minerals being montmorillonite and kaolinite, and quartz, calcite, chlorite, minerals from the mica and feldspar groups, and mixed-layer minerals found as impurities. The low quality of the clay raw material suggests that further research should be conducted to improve the technological and physical-mechanical properties of ceramic products made from local clay raw material. In the design of raw material mixtures, local natural and man-made mineral raw materials can be used.

Keywords: clay raw material, physicochemical analysis, physico-mechanical, chemical and technological properties.

REFERENCES

1. Explanatory note for the overview map of, Construction materials deposits in the Yakut ASSR [stroitel'nyh materialov Yakutskoj ASSR]. at a scale of 1:2500000. Vol. 1 and 2. Moscow: Union "Soyuz-geolfond", 1988. 421 p. (rus).
2. Ushnitskaya N.N., Mestnikov A.E. Physico-chemical analysis of clay raw materials for expanded clay aggregate [Fiziko-himicheskij analiz glinistogo syr'ya dlya keramzita]. Advances in Modern Natural Sciences. 2022. No. 10. Pp. 124–129. (rus)
3. Tatski L.N., Ilina L.V., Filin N.S. Technological principles for improving the quality of ceramic bricks using semi-dry pressing from low-quality raw materials [Tekhnologicheskie principy povysheniya kachestva keramicheskogo kirpicha polusuhogo pressovaniya iz nizkokachestvennogo syr'ya]. University News. Construction. 2019. No. 7. Pp. 35–48. (rus)
4. Soromotin A.M. Oil and gas resources of the Republic of Sakha (Yakutia): current state, prospects of use [Neftegazovye resursy Respubliki Saha (Yakutiya): sostoyanie, perspektivy ispol'zovaniya]. NEFU. 2014. Vol. 11. No. 2. Pp. 129–136. (rus)
5. Zhenzhurist I.A. Issues of small-scale building ceramics enterprises [Problemy predpriyatij stroitel'noj keramiki maloj moshchnosti]. Building Materials. 2000. No. 7. Pp. 2–3. (rus)
6. Stolboushkin A.Yu. Promising direction of development for building ceramic materials from low-quality raw materials [Perspektivnoe napravlenie razvitiya stroitel'nyh keramicheskikh materialov iz nizkokachestvennogo syr'ya]. Building Materials. 2018. No. 4. Pp. 24–28. (rus)
7. Stolboushkin A.Yu., Fomina O.A., Dashjamts D. Perspectives for the use of off-grade raw materials in the production of ceramic products [Perspektivy ispol'zovaniya nekonditsionnogo syr'ya v proizvodstve keramicheskikh izdelij]. Expert: Theory and Practice. 2023. Vol. 4 (23). Pp. 115–119. (rus)
8. Sutakova E., Mestnikov A. Basics of recreation of ancient ceramics production technology EDP Science. 2018. Pp. 95–100.
9. Karpova V.G., Sutakova E.M. Study of technological parameters of ceramic glazes based on clays from the Sannikovsky and Verkhnevilyuysky birthplaces of the Republic of Sakha (Yakutia) [Izuchenie tekhnologicheskikh parametrov keramicheskoy glazuri na osnove glin Sannikovskogo i Verkhnevilyujskogo mestorozhdenij Respubliki Saha (Yakutiya)]. Natural scientific research: results and development prospects. Part 3. 25th anniversary of the chemical department: results and development prospects: collection of scientific papers of the scientific-practical conference. Yakutsk: NEFU Publishing House, 2018. Pp. 212–216. (rus)
10. Batrshina G.S., Davletshina A.D. Study of the structure of clay raw materials for ceramic products [Issledovanie struktury glinistogo syr'ya dlya

keramicheskikh izdelij]. Construction materials and products. 2020. Vol. 3. No. 4. Pp. 13–23. (rus)

11. Evtushenko E.I., Moreva I.Yu., Sysa O.K., Bedina V.I., Trunov E.M. Control of the structural and phase characteristics of raw materials in the technology of fine ceramics. Refractories and Industrial Ceramics. 2011. Vol. 51. No. 6. Pp. 397–398.

12. X-ray spectral and morphological studies of crushing products [Rentgenospektral'nye i morfologicheskie issledovaniya produktov drobleniya]. Science and Education. 2016. No. 3. Pp. 68–75. (rus)

13. Ilyina L.V., Tatski D.N. Nanomodification of low-quality clay raw materials - a way to increase the strength of ceramic shards [Nanomodificirovanie nizkokachestvennogo glinistogo syr'ya - sposob povysheniya prochnosti keramicheskogo cherepka]. Bulletin of South Ural State University. Series Construction and Architecture. 2022. Vol. 22. No. 2. Pp. 28–36. (rus)

14. Chetverikova A.G., Kanygina O.N., Filyak M.M., Savinkova E.S. Physical optics methods of recording weak structural responses of dispersed clay systems to the effect of microwave radiation. Measurement Techniques. 2018. Vol. 60. No. 11. Pp. 1109–1115.

15. Morozov V., Eskin A., Salakhov A., Korolev E. Modern methods studying the phase composition of clay raw material at kiln process. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 21, Construction - The Formation of Living Environment. 2018. 032048.

16. Oranska O.I., Gornikov Yu.I. X-Ray Diffraction and Thermal Studies on Some Food and

Cosmetic Bentonite Clays. Khimiya, fizika ta tekhnologiya poverkhni = Chemistry. Physics and Technology of Surface. 2019. Vol. 10. No. 1. Pp. 13–21.

17. Roco M.C. National nanotechnology initiative: Past, present and future. Hand book on nanoscience, engineering and technology. Ed. Goddard, W.A. et al. CRC, Taylor and Francis, Boca Raton and London, 2007. Pp. 3.1–3.26.

18. Budykina T.A., Gandurina L.V. Study of the properties of clayey rocks by thermal analysis [Issledovanie svoystv glinistyh porod metodom termicheskogo analiza]. News of higher educational institutions. Geology and exploration. 2023. No. 65(1). Pp. 77–88. (rus)

19. Nam N.N., Thuy L.T.B., An P.D. Assessing the effectiveness of X-ray diffraction analysis and differential scanning calorimetry methods in the analysis of clay minerals [Ocenka effektivnosti metodov rentgenostrukturnogo analiza i differentsial'noj skaniruyushchej kalorimetrii pri analize glinistyh mineralov]. News of the Siberian Branch of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Hydrogeology and engineering geology of mineral deposits. 2019. Vol. 42. No. 2. Pp. 221–228. (rus)

20. Maslova M.D., Belopukhov S.L., Timokhina U.S., Shnee T.V., Nefedeva E.E., Shaikhiev I.G. Thermochemical characteristics of clay minerals and mica [Termohimicheskie harakteristiki glinistyh mineralov i slyud]. Bulletin of the Kazan Technological University. 2014. Vol. 17. No. 21. Pp. 121–127. (rus)

Information about the authors

Ushnitskaya, Nyurguyana N. Postgraduate student. E-mail: ushnitskaya.97@mail.ru. North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov. Russia, 677000, Yakutsk, Belinskogo street, 58.

Mestnikov, Aleksey E. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Applied Mechanics and Building Materials Science. E-mail: mestnikovae@mail.ru. North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov. Russia, 677000, Yakutsk, Belinskogo street, 58.

Received 18.02.2024

Для цитирования:

Ушницкая Н.Н., Местников А.Е. Исследование свойств глинистого сырья методами физико-химического анализа // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №4. С. 16–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-16-25

For citation:

Ushnitskaya N.N., Mestnikovae A.E. Investigation of the properties of clay raw materials by methods of physico-chemical analysis. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 4. Pp. 16–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-16-25

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-26-35

*Аль-Сабаети А.К., Абсиметов В.Э.

Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова

*E-mail: kacem90@bk.ru

РАСЧЕТ НДС РАМНЫХ УЗЛОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ ПРИ ИХ УСИЛЕНИИ

Аннотация. Опыт эксплуатации усиленных металлоконструкций промышленных зданий показал, что при усиленном воздействии статических нагрузок редко выходят из строя узлы рамных элементов, что нельзя отметить в случае длительного приложения динамических нагрузок. Как правило, разрушению подвергаются сварные соединения креплений элементов усиления, что послужило причиной проведения данного исследования. В ходе работ выявлено влияние остаточных сварочных напряжений на долговечность усиленных рамных узлов при воздействии динамических нагрузок. Использован метод численного моделирования с применением программного комплекса Ansys SpaceClaim. Вибрационная прочность швов обуславливается высотой катета сварных соединений, связанных с переходом материала в стадию деформирования и смещения узлов конструкций, подвергающихся циклическому нагружению. Следует отметить, что усталостное разрушение подразделяют на две категории: многоцикловая усталость и малоцикловая усталость. Многоцикловая усталость, когда число циклов приложения нагрузки велико (порядка $1e^4 - 1e^9$). При такой постановке обычно уровень напряжений более низкий, в сравнении с пределом прочности материала. Оценка долговечности, в зависимости от уровня напряжений, обычно используется для расчета многоцикловой усталости. Малоцикловая усталость, когда число циклов прикладываемой нагрузки относительно невелико. Пластические деформации часто ассоциируются с расчетом малоцикловой усталости, это приводит к уменьшению времени усталостной долговечности. Оценка долговечности в зависимости, от уровня деформаций, более применима к расчету малоцикловой усталости.

Ключевые слова: металлические конструкции, рамные узлы, долговечность, многоцикловая усталость, остаточное сварочное напряжение, усиления.

Введение. Применение на практике усиленных металлических конструкций дает возможность сделать вывод, что одной из основных причин, приводящих к их разрушению, является усталость [1–4].

Среди показателей усталостной прочности металлоконструкций наиболее распространенным является понятие вибрационной прочности. В данной статье рассматривается вибрационная прочность рамных узлов [5, 6]. Для оценки долговечности усиленных рамных узлов металлоконструкций использован метод моделирования, для чего разработана и реализована конечно-элементная модель с применением программы Ansys [7–10].

Характеристики циклов напряжений:

Рассматривается случай с постоянной амплитудой пропорциональной нагрузкой, с $\min$ и $\max$ значениями напряжений $\sigma_{\min}$ и $\sigma_{\max}$:

- Диапазон напряжений цикла D_s определяется $(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$

- Среднее напряжение цикла σ_m определяется $(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$. В данном случае наибольшее значение напряжения цикла соответствует $D_s/2$. Показатель асимметрии R при этом равняется $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$. Также, под симметричным циклом нагружения подразумевается цикл, в котором наибольшее и наименьшее значения напряжения равны по величине и противоположны по знаку. В данном случае $\sigma_m = 0$; $R = -1$.

- Знакопостоянный цикл характеризуется в качестве отнулевого (пульсирующего) цикла. Он преобразуется от нуля до максимума — $\sigma_m = \sigma_{\max}/2$; $R = 0$.

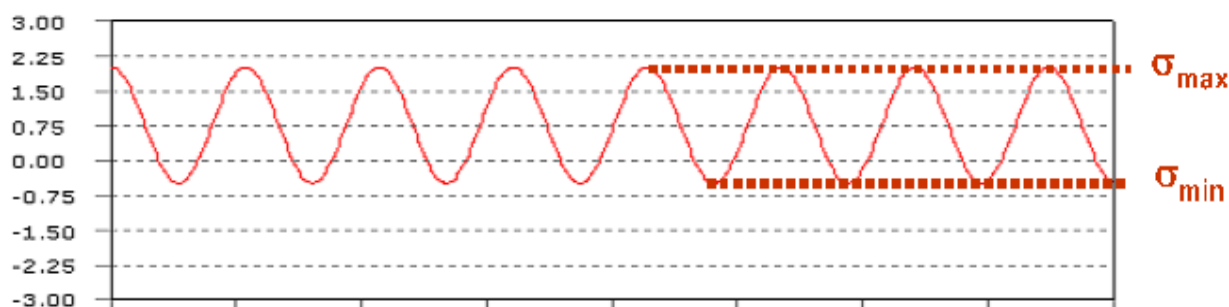


Рис. 1. Размах напряжений цикла

Проведение расчета на усталостную долговечность базируется на принципах проведения линейного статического расчета. Несмотря на то, что расчет усталостной долговечности относится к разделу циклической или повторяющейся нагрузки, как видно на рис. 1, результаты основываются на линейной статике, а не на гармоническом виде анализа. Так же надо понимать, что даже, если нелинейности присутствуют в расчетной модели, то расчет усталостной долговечности все равно будет проводиться в линейной постановке, и это надо учитывать при оценке результатов.

Много факторов влияют на данные кривой усталости, некоторые из них перечислены ниже:

1. Пластичность материала, способы механической и других обработок материала.

2. Топология геометрии, включая параметры шероховатости поверхности, остаточные напряжения, и наличие концентраторов напряжений.

3. Условия нагружения, включая средние напряжения цикла, температурное состояние, химический состав.

Отметим, что в сфере многоциклового усталости долговечность выражается как функция от показателей цикла напряжений. Такое описание является общепринятым [12, 13].

В большинстве зарубежных трудов данный подход характеризуется как SN подход. Соответственно, кривая носит также название SN, по причине определения осей координат на английском языке [14]. Схематичный вид кривой SN для различных материалов представлен на рис. 2:

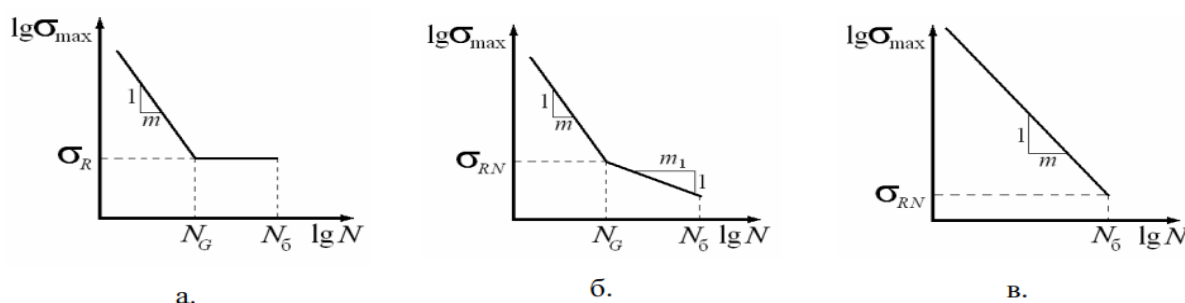


Рис. 2. Схематичный вид кривой SN для различных материалов: углеродистые и среднелегированные стали (а), алюминий, медь и их сплавы и нержавеющие стали (б) и высокопрочные стали и титановые сплавы (в)

В настоящее время в практике для разных видов кривой применяется уравнение, предложенное М. Басквиным.

Статический расчет использовался для анализа конструкции на многоцикловое воздействие. Применялся симметричный цикл посечного нагружения: $R = -1$; амплитуда цикла 1 как видно на рис.3.

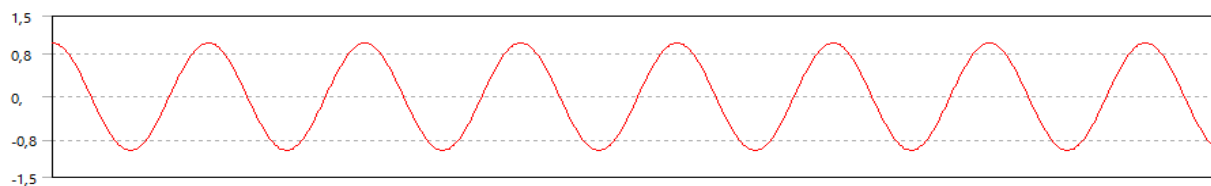


Рис.3. Осесимметричный цикл для многоциклового задачи.

Методы исследований. Для решения поставленной задачи использовано моделирование, с применением программы Ansys SOLID186.

Получены результаты в виде:

1. Суммарных перемещений;
2. Эквивалентных напряжений по 4-й теории прочности;
3. Количества циклов до разрушения после многоциклового нагружения;
4. Силы реакции в заделке.

На рис. 4 приведена конечно-элементная модель, а также 3D-модель элемента «Колонна – Балка».

СAD-моделирования была применена программа Ansys SpaceClaim.

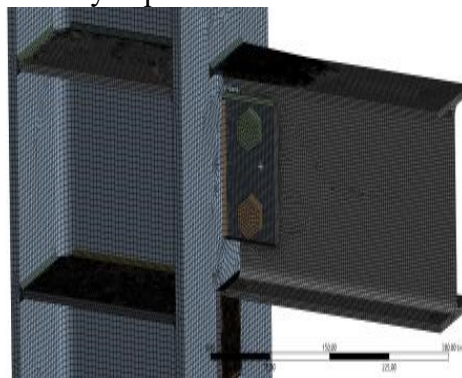


Рис. 4. Конечно-элементная модель

На базе геометрических моделей разрабатывались конечные элементы, которые включают срединные узлы. Также, в модели входят такие элементы как: гексаэдральные и тетраэдральные. Каждый равняется 6 мм.

Необходимо рассмотреть, какие величины нагрузок использовались в процессе:
Для балок 40Б1х40К1 (по СТО АСЧМ), $N = 264779,55\text{H}$.
Параметры нагружения, направление нагрузки, точки фиксации изображены на рис. 5.

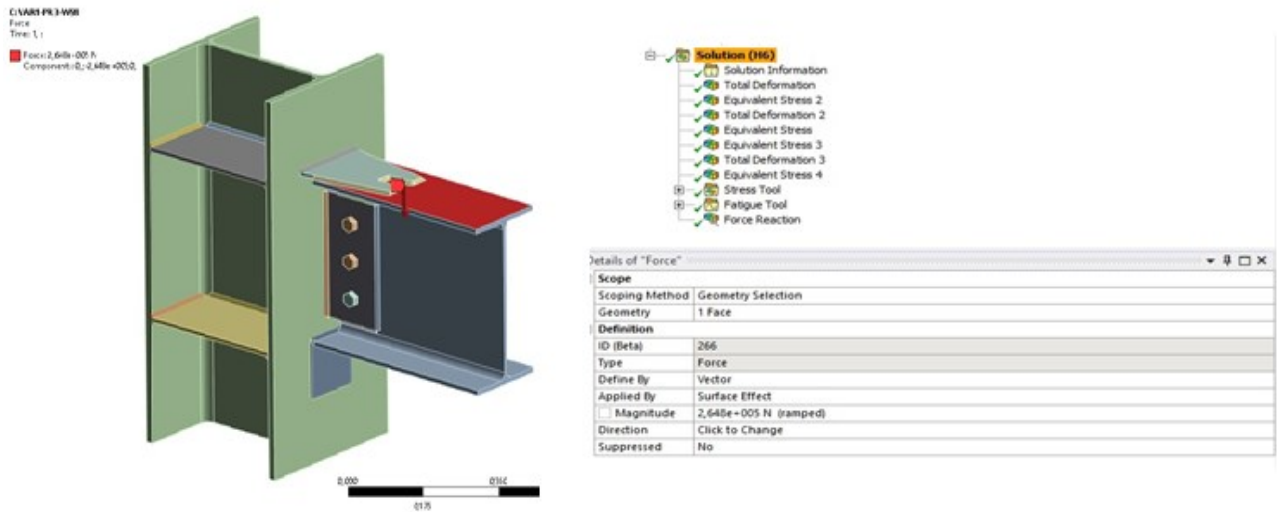


Рис. 5. Параметры нагружения

Для исследования влияния остаточных сварочных напряжений в узлах предварительно решается тепловая задача, в которой определяется поле температуры в деталях после формирования сварных швов (используется допущение при мгновенном выполнении швов). Затем поле температур импортируется в прочностную задачу и на первом шаге нагружения прикладывается к деталям. В результате расчета в материале вблизи

сварных швов появляются пластические деформации, на втором шаге нагружения поле температур снимается и прикладывается основная нагрузка.
В расчете используется нелинейная модель материала, свойства материала показаны на рис. 6.

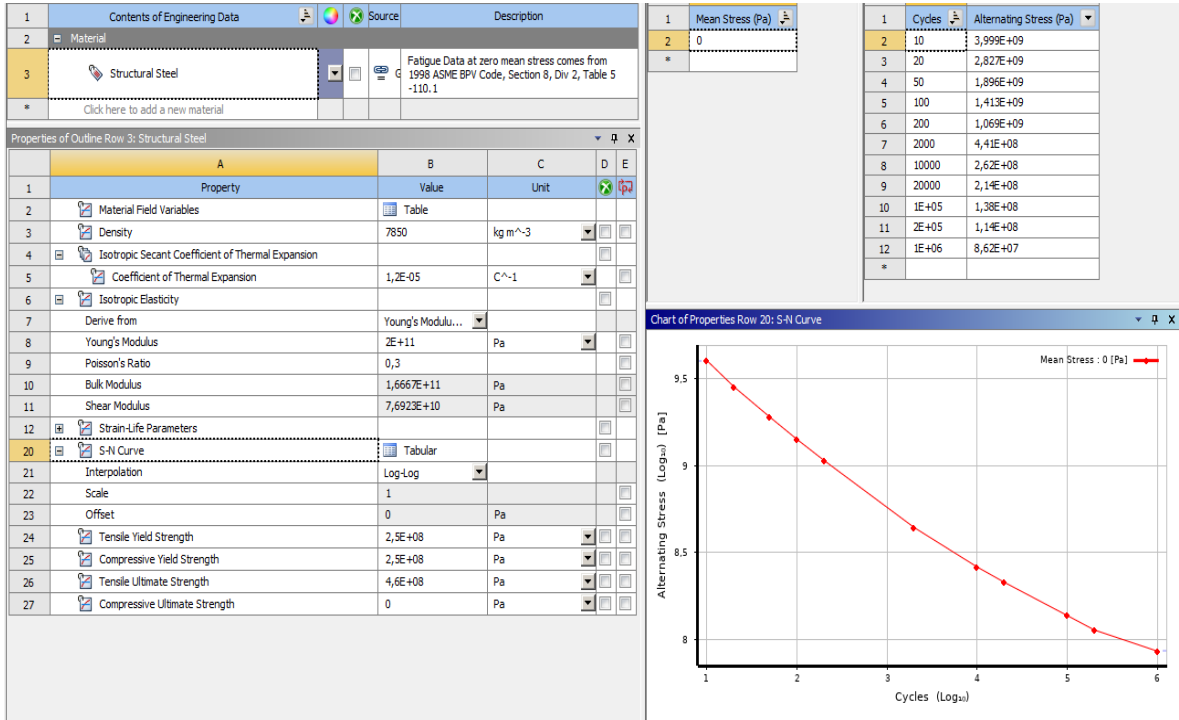


Рис. 6. Свойства материала

Результаты моделирования образцов сечением 40×40 (усиление с помощью накладки)

а – Размер профиля – 40×40 (по СТО АСЧМ),
катет сварного шва – 10 мм.

1. Расчет перемещений

H: VAR1-PR3-WS10
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s

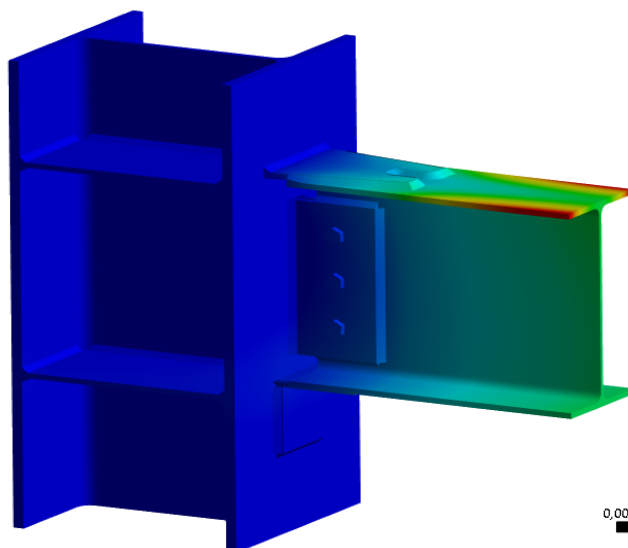
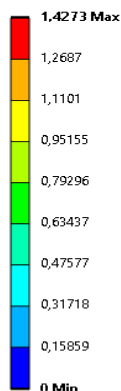


Рис. 7. Общие перемещения

2. Определение эквивалентных напряжений по Мизесу

Для большинства материалов напряжение сжатия не приводит к необратимым изменениям форм и размеров. По этой причине придерживаются мнения, что при пластичности действует функция инвариантов девиатора.

Определение величины суммарных перемещений в элементах рамного узла и анализ их изменения в сочетании с величинами эквивалентных напряжений позволяет более полно характеризовать наступление предельного состояния при динамических воздействиях [15].

В случае повторно-статического нагружения показатель на рис. 7 равняется 1,43 мм.

Из большого количества условий пластичности целесообразно использовать условия Мизеса и Треска, которые являются наиболее простыми и при этом дают точные результаты.

Наибольшие напряжения балки в случае приложения повторно-статических нагрузок на рис. 8 составляют 288,63 МПа и отмечены в нижнем углу усиления.

H: VAR1-PR3-WS10
Equivalent Stress 2
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s

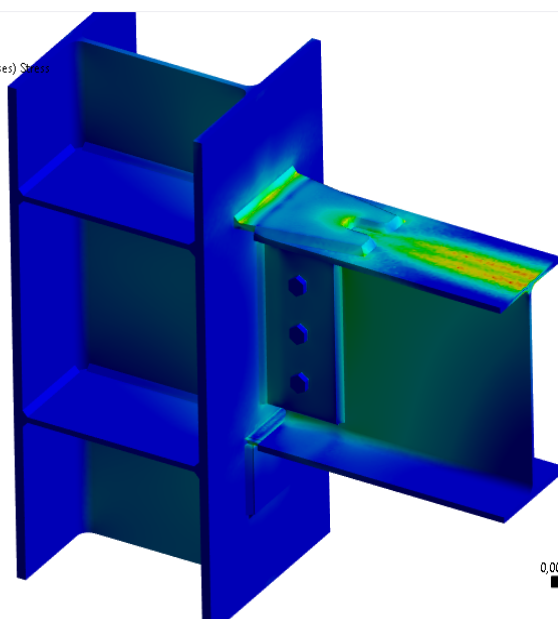
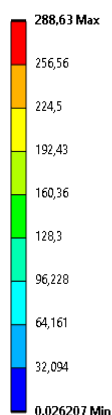


Рис. 8. Эквивалентные напряжения по Мизесу

На рис. 9. представлены показатели запаса прочности в швах деталей усиления. Наибольшая концентрация напряжений в сварных швах возникает в местах соединения деталей усиления с вертикальной опорой. Минимальный коэффициент запаса прочности в сварных швах верхней и

нижней деталей усиления при заданном пределе текучести материала составляет 0,87. В тех местах, где коэффициент меньше 1, после приложения нагрузки возникают пластические деформации, в остальных местах – деформации упругие.

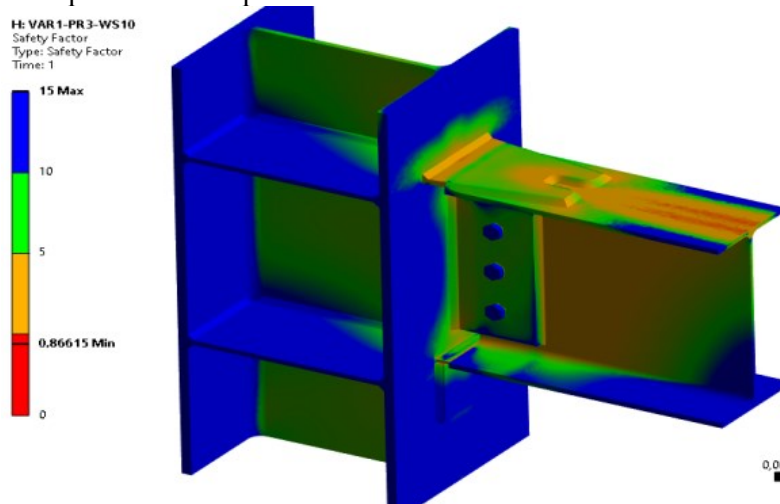


Рис. 9. Коэффициент запаса прочности

3. Расчет количества циклов до разрушения

Наименьшее число циклов до полного разрушения в случае симметричного нагружения на рис. 10 равняется 7414 циклам. Явление усталости отмечается на уголках, расположенных в верхней и нижней части узла.

На рис. 11 представлена расчетная долговечность в сварных зонах деталей усиления. Сила реакции в закреплениях вертикальной балке равна $2,648 \times 10^5$ Н.

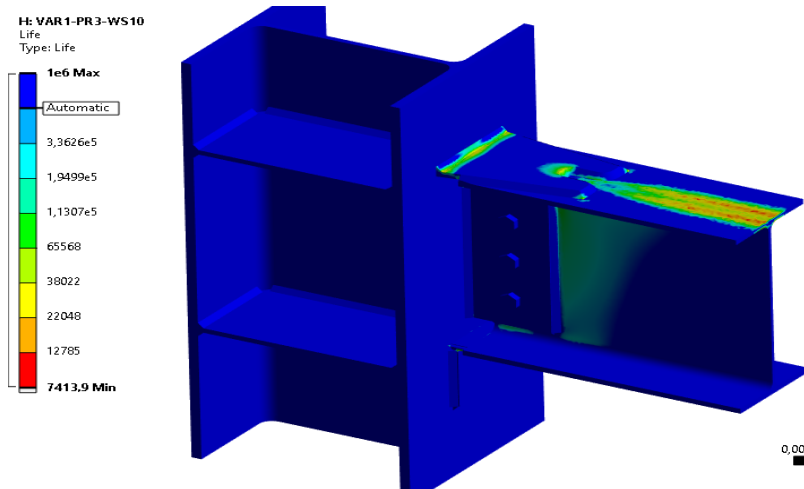


Рис. 10. Количество циклов до разрушения

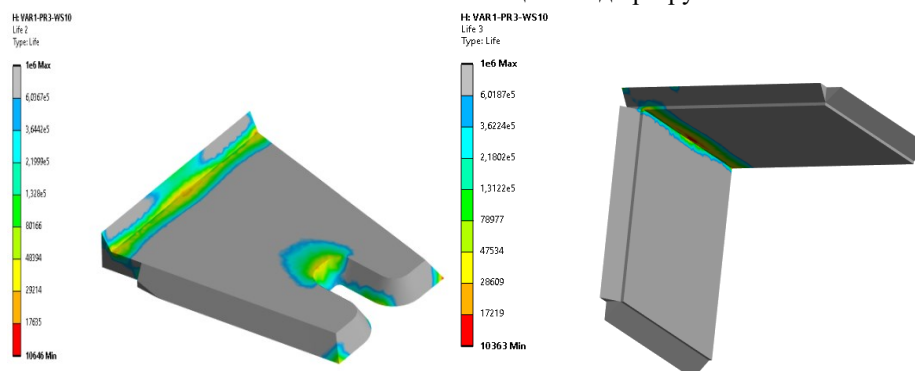


Рис. 11. Расчетная долговечность в сварных зонах деталей усиления

Б – Размер профиля – 40×40(по СТО АСЧМ), катет сварного шва – 12 мм. В случае повторно-статического нагружения показатель

на рис.12 равняется 1,97 мм. Наибольшие напряжения в балке при повторно-статической нагрузке, приведенные на рис. 13, составляют 422,3 МПа и отмечены в нижнем углу усиления.

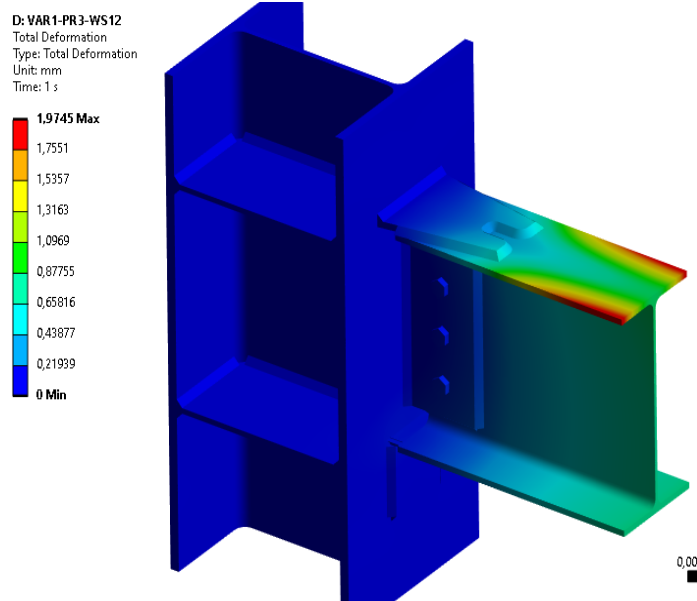


Рис. 12. Общие перемещения

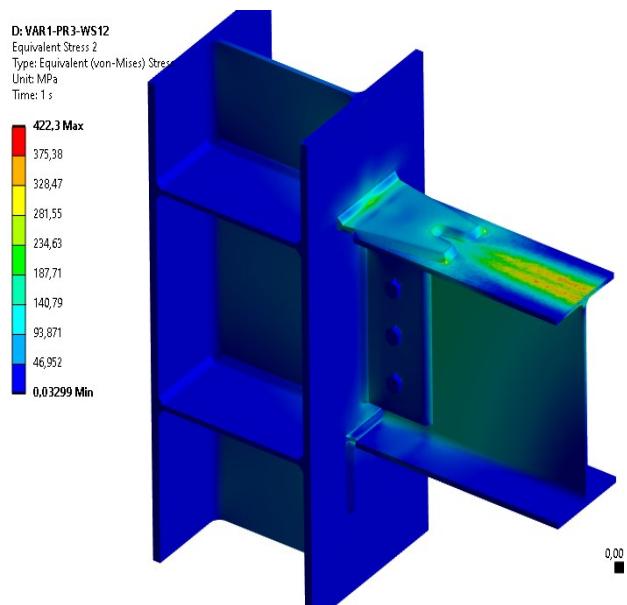


Рис. 13. Эквивалентные напряжения по Мизесу

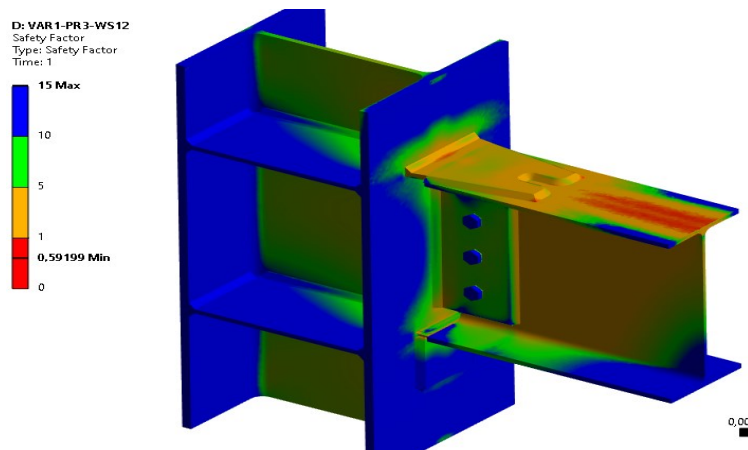


Рис. 14. Коэффициент запаса прочности

На рис. 14. приведены показатели запаса прочности в швах деталей усиления. Наибольшая концентрация напряжений в сварных швах возникает в местах соединения деталей усиления с вертикальной опорой. Минимальный коэффициент запаса прочности в сварных швах верхней и

нижней деталей усиления при заданном пределе текучести материала составляет 0,59. В тех местах, где коэффициент меньше 1, после приложения нагрузки возникают пластические деформации, в остальных местах – деформации упругие.

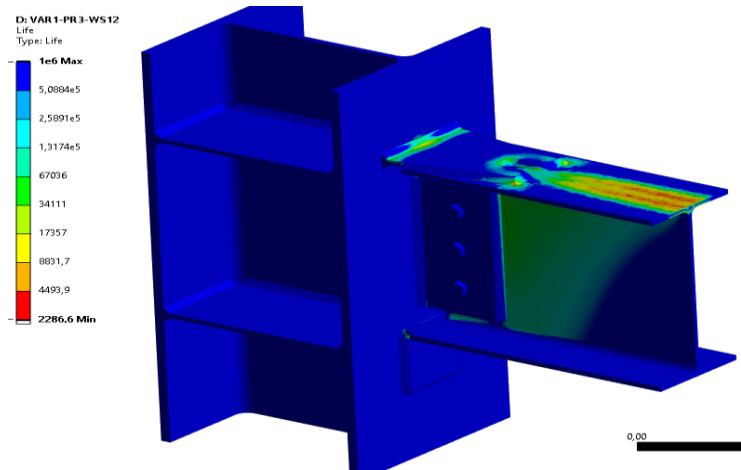


Рис. 15. Количество циклов до разрушения

Наименьшее число циклов до полного разрушения в случае симметричного нагружения, приведенное на рис. 15, равняется 2287 циклам. Явление усталости отмечается на уголках, расположенных в верхней и нижней части узла.

На рис. 16 представлена расчетная долговечность в сварных зонах деталей усиления.

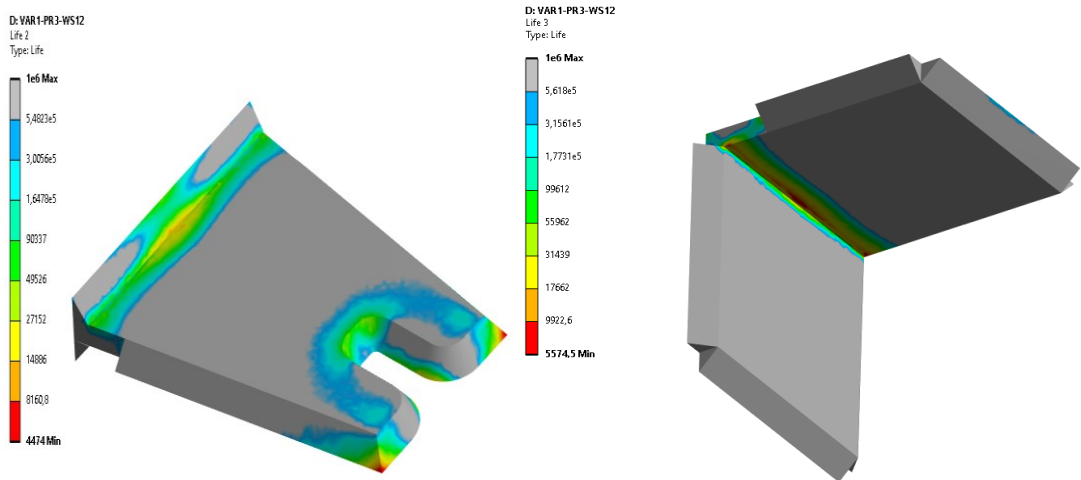


Рис. 16. Расчетная долговечность в сварных зонах деталей усиления

Сила реакции в закреплениях вертикальной балки равна $2,648e+005$ Н.

Обсуждение. По результатам расчётов можно сделать следующие выводы.

Образцы с наименьшими катетами сварных швов менее подвержены разрушению и способны выдержать большее число циклов.

Можно предположить, что величина катетов сварных швов и соответствующие им величины остаточных сварочных напряжений оказывают существенное влияние на усталостную прочность усиливаемого узла.

В таблице 1 предоставлен общий анализ результатов моделирования.

Таблица 1

Общий анализ результатов моделирования

Вариант сечения	Нагрузка, Н	Катет шва, мм	Количество циклов до разрушения	Общие перемещения, мм	Эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа
40Б1×40 К1	264779,55	10	7414	1,43	288,63
		12	2287	1,97	422,3

Выводы. На базе подробного анализа итогов моделирования удалось определить, что прочность соединений обуславливается высотой катета швов, что подтверждает влияние остаточных сварочных напряжений на прочность соединений при динамических нагрузках. Это также подтверждается числом циклов до разрушения.

Можно рекомендовать, при проектировании необходимо использовать размеры катетов сварных швов минимально допустимые по действующим нормам СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции актуализированная редакция СНиП II-23-81».

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Форрест П. Усталость металлов. М.: Машиностроение, 1968. 354 с.
2. Берендеев Н.Н. Сопротивление усталости. Основы. Учебно-методическое. Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2010. 65 с.
3. Абсиметов В.Э. Дефекты монтажа, методы устранения надёжность и долговечность строительных конструкций. Белгород: Изд-во БГТУ, 2021. 222с.
4. Пичугин С.Ф. Надёжность стальных конструкций производственных зданий. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2011. 455 с.
5. Аль-Сабаеи А.К., Абсиметов В.Э., Проблемы оценки надёжности металлических конструкций // Сборник докладов VI Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры строительства и городского хозяйства. Том 1. Белгород, 2022. С. 9–14.
6. Аль-Сабаеи А.К., Усиление узлов опирания и сопряжения строительных металлоконструкций // V Международный студенческий строительный форум-2020. Сборник докладов. В 2-х томах. Том 1. Белгород, 2020. С. 23–30.
7. Huei-Huang L. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench: SDC Publications, 2023. 600 p.
8. Саченков О.А., Саченков А.А., Большаков П.В., Герасимов О.В., Автоматизированное моделирование и расчёт конструкций в ANSYS: одномерные модели. Казань: Казан. ун-т, 2019. 140 с.
9. Иванов Д.В., Доль А.В. Введение в Ansys Workbench: Учеб.-метод. пособие для студентов естественно-научных дисциплин. Саратов: Амирит, 2016. 56 с.
10. Конюхов А. В. Основы анализа конструкций в Ansys: учебное пособие. Казань: КГУ, 2001. 102 с
11. Belen'kii D.M., Vernezi N.L., Cherpakov A.V. Changes in the mechanical properties of butt welded joints in elastoplastic deformation. Welding International. 2004. No. 18. Pp. 213–215.
12. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надёжность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.
13. Шпете Г. Надёжность несущих строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1994. 288 с.
14. Абсиметов В.Э. Проектирование стальных конструкций с применением Еврокодов [EN 1993] примеры расчета. Белгород: Изд-во БГТУ, 2023. 142 с.
15. Довнар Е.П., Климова Л.Б. Расчет рам на статические и динамические нагрузки. Мн.: БНТУ, 2004. 186 с.

Информация об авторах

Аль-Сабаеи Арафат Касем, ассистент кафедры строительства и городского хозяйств. E-mail: kasem90@bk.ru . Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

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

Поступила 05.02.2024 г.

© Аль-Сабаеи А.К., Абсиметов В.Э., 2024

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

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: kacem90@bk.ru

CALCULATION OF STRESS-STRAIN STATE (SSS) FOR FRAME ASSEMBLIES OF BUILDING METAL STRUCTURES WHEN THEY ARE REINFORCED

Abstract. Experience in the operation of reinforced metal structures of industrial buildings has shown that under increased influence of static loads, units of frame elements rarely fail, which cannot be noted in the case of prolonged application of dynamic loads. As a rule, welded joints of fastenings of reinforcement elements are subject to destruction, which is the reason for conducting this study. During the work, the influence of residual welding stresses on the durability of reinforced frame assemblies under the influence of dynamic loads was revealed. The numerical modeling method was used using the Ansys SpaceClaim software package. The vibration strength of seams is determined by the height of the leg of welded joints associated with the transition of the material to the stage of deformation and displacement of structural units subjected to cyclic loading. It should be noted that fatigue failure is divided into two categories: high-cycle fatigue and low-cycle fatigue. High-cycle fatigue, when the number of cycles of load application is large (around $1e^4$ - $1e^9$). With this formulation, the stress level is usually lower in comparison with the ultimate strength of the material. Durability assessment, depending on the stress level, is usually used to calculate high-cycle fatigue. Low-cycle fatigue, when the number of cycles of the applied load is relatively small. Plastic deformation is often associated with low cycle fatigue calculations and results in reduced fatigue life. Assessment of durability depending on the level of deformation is more applicable to the calculation of low-cycle fatigue.

Keywords: metal structures, frame assemblies, durability, multi-cycle fatigue, residual welding stresses, reinforcements.

REFERENCES

1. Forrest P. Fatigue of metals [Ustalost' metallov]. M.: Mashinostroenie, 1968. 354 p. (rus)
2. Berendeev N.N., Fatigue resistance. The basics. Educational and methodical [Soprotivlenie ustalosti. Osnovy. Uchebno-metodicheskoe]. N. Novgorod: Nizhny Novgorod State University, 2010. 65 p. (rus)
3. Absimetov V.E. Installation defects, methods of elimination reliability and durability of building structures: monograph. Belgorod: Publishing House of BSTU, 2021. 222 p. (rus)
4. Pichugin S.F. Reliability of steel structures of industrial buildings [Nadezhnost' stal'nykh konstrukcij proizvodstvennykh zdaniy]. Moscow: Publishing house of the Association of Civil Engineering Universities, 2011. 455 p. (rus)
5. Al-Sabaei A.K., Absimetov V.E., Problems of assessing the reliability of metal structures [Problemy ocenki nadezhnosti metallicheskih konstrukcij]. Collection of reports of the VI International Scientific and practical Conference dedicated to the 50th anniversary of the Department of Construction and Urban Management. Vol 1. Belgorod, 2022. Pp. 9–14. (rus)
6. Al-Sabaei A.K., Reinforcement of support and coupling nodes of building metal structures [Usilenie uzlov opiraniya i sopryazheniya stroitel'nykh metallokonstrukcij]. V International Student Construction Forum 2020. Collection of reports. In 2 Vol. Vol 1. Belgorod, 2020. Pp. 23–30. (rus)
7. Huei-Huang L. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench: SDC Publications, 2023. 600 p.
8. Sachenkov O.A., Sachenkov A.A., Bolshakov P.V., Gerasimov O.V., Automated modeling and calculation of structures in ANSYS: one-dimensional models: textbook. Manual. Kazan: Kazan. Univ., 2019. 140 p. (rus)
9. Ivanov D.V., Dol A.V. Introduction to Ansys Workbench: Study method. a manual for students of natural sciences. Saratov: Amirit, 2016. 56 p. (rus)
10. Konyukhov A.V. Fundamentals of structural analysis in Ansys: textbook. Kazan: KSU, 2001. 102 p. (rus)
11. Belen'kii D.M., Vernezi N.L., Cherpakov A.V. Changes in the mechanical properties of butt welded joints in elastoplastic deformation. Welding International. 2004. No. 18. Pp. 213–215.
12. Rzhantsyn A.R. Theory of calculation of building structures for reliability [Teoriya rascheta stroitel'nykh konstrukcij na nadezhnost']. M.: Stroyizdat, 1978. 239 p. (rus)
13. Shpete G. Reliability of load-bearing building structures [Nadezhnost' nesushchih stroitel'nykh konstrukcij]. M.: Stroyizdat, 1994. 288 p. (rus)
14. Absimetov V.E. Design of steel structures using Eurocodes [EN 1993] calculation examples: monograph. Belgorod: Publishing House of BSTU, 2023. 142p. (rus)
15. Dovnar E.P. Calculation of frames for static and dynamic loads: Textbook. E.P. Dovnar, L.B. Klimova. Mn.: BNTU, 2004. 186 p. (rus)

Information about the author

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

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

Received 05.02.2024

Для цитирования:

Аль-Сабаети А.К., Абсиметов В.Э. Расчет НДС рамных узлов строительных металлоконструкции при их усилении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №4. С. 26–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-26-35

For citation:

Al-Sabaei A.Q., Absimetov V.E. Calculation of stress-strain state (SSS) for frame assemblies of building metal structures when they are reinforced. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 4. Pp. 26–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-26-35

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-36-44

Ильина Т.Н., Орлов П.А., Саввин Н.Ю., Елистратова Ю.В.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: ilina50@rambler.ru*

ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИСПАРИТЕЛЬНОМ БЛОКЕ ВОЗДУШНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА

Аннотация. Рассмотрены теплонасосные установки и возможность их применения в инженерных системах, что позволяет значительно расширить возможности использования возобновляемых источников энергии, а также выбросной теплоты от различных технологических процессов в инженерных системах создания микроклимата. Наиболее перспективными являются воздушные тепловые насосы, однако их применение в регионах с холодным климатом ограничено в связи с конденсацией паров влаги на холодопроводе испарительного блока с последующим образованием наледи, что снижает эффективность работы установки. В настоящей работе рассмотрен модернизированный испарительный блок воздушного теплового насоса с системой удаления наледи MOVEBIT.

С учетом конструкции теплообменника, включающего блок магнитострикционного излучателя, рассмотрено влияние тепломассообменных процессов в испарительном блоке на эффективность работы теплонасосной установки в широком диапазоне температур наружного воздуха. Получено критериальное уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи в испарительном блоке в зависимости от гидродинамических условий проведения процесса и теплофизических параметров воздушной среды. Данное уравнение позволяет рассчитывать теплопроизводительность, холодопроизводительность, определять коэффициент трансформации энергии теплонасосной установки на всех этапах жизненного цикла инженерных систем. Получена зависимость влияния температуры и относительной влажности на кинетику образования наледи, что позволяет рассчитать время работы установки между циклами включения излучателя для разрушения наледи. По результатам исследований разработаны программы для ЭВМ управления основными теплотехническими параметрами воздушного теплового насоса с системой MOVEBIT и электрической частью магнитострикционного излучателя в широком диапазоне температур.

Ключевые слова: теплонасосная установка, коэффициент трансформации теплоты, тепломассообмен, энергоэффективность, испарительный блок, магнитострикционный излучатель.

Введение. Энергосбережение и защита окружающей среды от вредных выбросов является актуальной проблемой. Создание и поддержание требуемых параметров микроклимата обеспечивают инженерные системы, для работы которых требуются источники теплоснабжения, оказывающие существенное влияние на жизненный цикл строительного объекта, а также являются наиболее затратной статьёй коммунальных расходов. Перспективным направлением энергосбережения является использование возобновляемых и нетрадиционных источников энергии, к которым относятся тепловая энергия недр земли, воздуха, воды, а также тепловые выбросы вытяжных вентиляционных систем, технологических процессов промышленных предприятий [1–3], для утилизации которых применяют тепловые насосы.

В зависимости от источника энергии различают геотермальные, водяные и воздушные теплонасосные установки. Системы с использованием теплонасосных установок имеют меньшие эксплуатационные расходы и выделяют меньше вредных веществ в атмосферу, по сравнению с традиционными источниками теплоснабжения

[4–7]. Следовательно, разработка энергоэффективных конструкций теплонасосных установок, оптимизация их работы на различных этапах функционирования инженерных систем, является актуальной задачей управления жизненным циклом объектов строительства.

Наиболее перспективными с точки зрения эксплуатации и изготовления являются воздушные теплонасосные установки по сравнению с геотермальными [8–11]. Однако несмотря на преимущество воздушных тепловых насосов, их применение ограничено в регионах с холодным климатом, в том числе в России, в связи с образованием на наружной поверхности испарителя инея и ледяной корки. Это приводит к повышению сопротивления теплопередачи и снижению коэффициента преобразования теплоты. Существующие способы удаления наледи требуют дополнительных затрат энергии, что снижает эффективность работы установки. Наиболее эффективным является метод разрушения наледи с помощью механических колебаний [12, 13].

В рамках программы Приоритет-2030, нами разработан испарительный блок воздушного теплового насоса, включающий теплообменник ори-

гинальной формы, магнитострикционный излучатель для удаления наледи, разработан способ крепления сердечника излучателя к поверхности теплообменника, а также изготовлена теплонасосная установка и проведены ее испытания [14]. Целью настоящей работы является повышение теплопроизводительности и коэффициента трансформации теплоты воздушного теплового насоса на основании совершенствования системы удаления наледи и улучшения гидродинамических условий проведения тепло-массообменных процессов в испарительном блоке установки с системой MOVEBIT.

Материалы и методы. Исследования проводили на экспериментальном стенде воздушного теплового насоса, включающего модернизированный теплообменник испарительного блока с системой удаления наледи MOVEBIT, представленный на рис. 1.



Рис. 1. Экспериментальный стенд с воздушным тепловым насосом, оснащенный системой MOVEBIT

Холодопровод испарительного блока представлен в виде стержня диаметром 80 мм, для увеличения поверхности теплообмена имеет 12 пластин высотой 28 мм. Стержень теплообменника изготовлен из сплава алюминия методом экструзии. Поперечное сечение стержня составляет $14,24 \text{ см}^2$ ($0,001424 \text{ м}^2$), длина стержня 1,5 м. Стержень теплообменника находится в трубе длиной 1,8 м с утеплителем. Внутренний диаметр трубы 100 мм. Соответственно площадь живого сечения для прохода воздуха составляет $0,006426 \text{ м}^2$. площадь одного стержня теплообменника составляет $0,984 \text{ м}^2$. В дальнейших расчетах принимаем площадь теплообменной поверхности одного стержня, равной 1 м^2 . Испарительный блок лабораторной установки содержит

4 теплообменника типа «труба в трубе» площадью теплообмена 4 м^2 соответственно (рис. 2).



Рис. 2. Наружный блок теплонасосной установки с трубами и утеплителем (один стержень показан без трубы)

В испарительном блоке воздушного теплового насоса происходят процессы охлаждения воздуха и массообменные процессы с конденсацией паров влаги на поверхности теплообменника с последующим образованием инея и ледяной корки. Интенсивность процессов зависит от теплофизических свойств теплоносителя, гидродинамических условий обтекания теплообменной поверхности и формы теплообменника.

Для описания теплообменных процессов в модернизированной конструкции испарительного блока наиболее пригодной является критериальное уравнение Нуссельта (Nu) для теплообмена в кольцевом канале при критерии Прандтля (Pr) в диапазоне 0,7 -100 и соотношением диаметров $1,2 < (d_2/d_1) < 1,4$ [15]:

$$Nu = A \cdot Re_{d_{\text{экв}}}^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot (d_2 / d_1)^{0,18} \cdot \varepsilon_i, \quad (1)$$

здесь d_2 – внутренний диаметр наружной трубы, м; d_1 – эквивалентный диаметр внутреннего стержня, м; $Re_{\text{экв}}$ – критерий Рейнольдса, рассчитанный по эквивалентному диаметру канала.

Отношение температур среды и поверхности учитывается температурным коэффициентом:

$$\varepsilon_i = (T_c / T_{\text{жс}})^{-0,36}, \quad (2)$$

где T_c – температура наружного воздуха, подаваемого в межтрубное пространство, К; $T_{\text{жс}}$ – температура поверхности внутреннего стержня, равная температуре фреонового хладагента К.

Преимущество этого уравнения заключается в учете отношения диаметров наружной d_2 и внутренней d_1 трубы, температур, режима движе-

ния воздуха в межтрубном пространстве, оцененного по значениям критерия Рейнольдса (Re), рассчитанного по значениям эквивалентного диаметра межтрубного канала. Свободный коэффициент A в уравнении (1) можно рассматривать как критерий, оценивающий влияние структуры поверхности трубы на интенсивность теплообменных процессов.

Основная часть. Исследования проводили при расходах наружного воздуха, подаваемого в испарительный блок от 400 м³/ч, до 1200 м³/ч, при этом скорость воздуха в межтрубном пространстве менялась от 4,2 м/с до 13 м/с. Исследования проводили при температурах среды от -26 °С до +10 °С.

Обработка экспериментальных данных позволила установить численное значение коэффициента в уравнении (1), который составил 0,043, вместо 0,017 в исходном уравнении для гладкой поверхности внутренней трубы. Увеличение коэффициента объясняется изменением формы внутренней трубы и увеличением площади ее поверхности по сравнению с традиционной гладкой.

В таблице 1 представлены экспериментальные и расчетные значения коэффициента теплоотдачи в испарительном блоке теплонасосной установки.

Практическая значимость полученного уравнения заключается в возможности рассчитать количество теплоты, отбираемого в испарительном блоке, т.е. холодопроизводительность установки. определить холодильный и отопительный коэффициенты и, соответственно, рассчитать количество отданного теплонасосной установкой теплоты, т.е. теплопроизводительность.

В испарительном блоке воздушного теплового насоса происходят сложные тепло-массообменные процессы, изучению которых посвящено много работ [16–18]. Процессы теплоотдачи от наружного воздуха к поверхности теплообменника сопровождаются образованием конденсата, так как температура теплообменной поверхности испарителя ниже точки росы подаваемого наружного воздуха. Поэтому в испарительном блоке образуется наледь, отрицательно влияющая на эффективность работы воздушной теплонасосной установки. Кинетика образования наледи имеет важное значение для регулирования тепло-массообменных процессов теплонасосной установки и режима работы магнитострикционного излучателя для удаления наледи.

Таблица 1

Расчетные и экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи в испарительном контуре при различных температурах и скорости воздуха

№ п/п	$t_{ср},$ °С	$t_{ф},$ °С	$V,$ м/с	$\rho,$ кг/м ³	$\lambda,$ Вт/м К	$\nu \cdot 10^5,$ м ² /с	Re	Pr	Nu	$\alpha_{рас},$ Вт/м ² К	$\alpha_{экс},$ Вт/м ² К
1	9,2	-11,6	4,8	1,249	0,0251	1,406	5852	0,704	39,07	57,15	64,66
2	5,4	-19,3	4,2	1,266	0,0248	1,374	5239	0,705	35,57	51,46	51,54
3	0,8	-20,5	5,0	1,288	0,0245	1,336	6414	0,707	42,05	60,00	65,03
4	-4,0	-25,6	4,4	1,311	0,0241	1,297	5815	0,709	38,87	54,67	58,48
5	-9,3	-28,8	5,1	1,337	0,0237	1,254	6970	0,711	45,09	62,40	65,41
6	-17,1	-30,2	5,2	1,378	0,0231	1,192	7475	0,714	48,19	65,05	70,40
7	-20,2	-32,7	4,6	1,395	0,0229	1,168	6749	0,715	44,47	59,43	65,69
8	-26,4	-32,4	4,0	1,430	0,0224	1,120	6119	0,717	41,56	54,43	60,21
9	10,0	-6,7	12,8	1,246	0,0251	1,413	15532	0,704	85,77	125,76	120,1
10	5,0	-13,4	13,0	1,268	0,0248	1,371	16255	0,705	88,79	128,30	112,92
11	0,2	-16,4	12,5	1,290	0,0244	1,331	16095	0,707	88,36	125,86	120,37
12	-5,0	-19,7	13,0	1,316	0,0240	1,289	17289	0,709	93,88	131,63	127,69

Как видно из таблицы, эффективность теплообмена в основном зависит от гидродинамических условий в межтрубном пространстве. На рис. 3 представлена зависимость экспериментальных и расчетных значений коэффициента

теплоотдачи в межтрубном канале испарительного блока от критерия Рейнольдса, которая показала удовлетворительную сходимость.

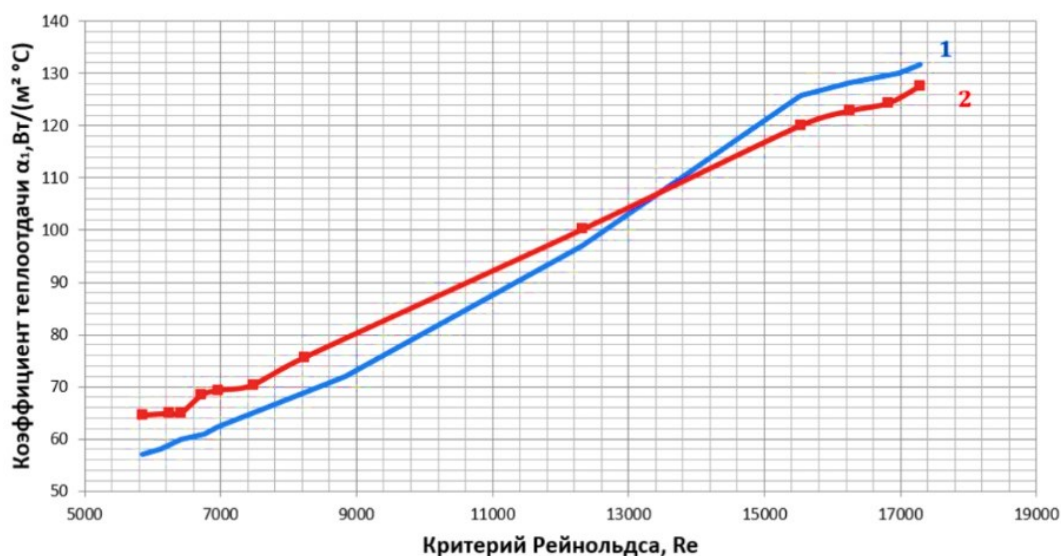


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса:
1 – расчетные значения; 2 – экспериментальные значения

Кинетика процессов образования конденсата и инея зависит от температуры, относительной влажности, скорости воздуха, подаваемого в испарительный блок. Исследования показали, что наибольшее влияние оказывает влажность воздуха. Поэтому представляет интерес получение зависимости роста наледи в зависимости от относительной влажности воздуха.

Влажность воздуха регулировали парогенератором, скорость движения воздуха в проходных каналах испарителя регулировали расходом воздуха, который в блоке из четырех элементов составлял 400, 600 и 1200 м³/ч. Скорость воздуха устанавливалась в пределах: 5,1–5,5; 7,5–8,2, и 12–13 м/с соответственно. Исследования проводились при температурах подаваемого воздуха -5; -10; 0; 5; 10 °С. Относительную влажность поддерживали в диапазоне 40–100 %. Удельное количество влаги, (г влаги/кг сухого воздуха) конденсирующейся на поверхности теплообменника, рассчитывали с помощью i-d диаграммы по уравнению:

$$W^1 = (d_1 - d_2), \quad (3)$$

где d_1 – влагосодержание воздуха на входе в испаритель (г /кг); d_2 – влагосодержание воздуха при температуре газового трубопровода испарителя (г/кг).

Значения влагосодержания определяли по i-d диаграмме при соответствующих параметрах воздуха, поступающего в испарительный блок, и температуре хладагента в испарителе. Данные для расчетов взяты из протоколов проведенных испытаний. Анализ температурного поля в кольцевом сечении испарительного блока позволяет предположить, что вся сконденсировавшаяся влага превращается в иней плотностью 300 кг/м³. Количество образующего инея (W) зависит от

массовой производительности установки по воздуху и может быть рассчитано по уравнению:

$$W = W^1 \cdot 10^{-3} \cdot G, \quad (4)$$

где G – массовый расход воздуха, кг/ч.

Массовый расход воздуха находили по уравнению:

$$G = L \cdot \rho, \quad (5)$$

где L – объемный расход воздуха, м³/ч; ρ – плотность влажного воздуха кг / м³.

$$\rho = \rho_{с.св} (1 + d_1). \quad (6)$$

Скорость образования инея рассчитывали по уравнению, мм/ч:

$$v' = \frac{W \cdot 10^{-3}}{\rho F}, \quad (7)$$

где плотность инея $\rho_{и} = 300$ кг/м³, F – поверхность теплообменника, 4 м².

Исследования показали, что для стабильной и эффективной работы воздушной теплонасосной установки сброс наледи с поверхности теплообменника испарительного блока необходимо производить при толщине слоя $h = 3,0–5,0$ мм.

Расчет времени работы между циклами включения магнитострикционного излучателя рассчитывали по уравнению, ч:

$$t = \frac{h}{v'}. \quad (8)$$

Таким образом, можно рассчитать скорость образования наледи при заданном расходе, температуре и влажности наружного воздуха, и соответственно время между циклами работы до снятия наледи по уравнениям (3) – (8).

В табл. 2 представлены результаты расчета скорости образования наледи при расходе воздуха $L = 600$ м³/ч, $G = 600 \cdot 1,31 = 786$ кг/ч.

Рассчитано время образования ледяной корки толщиной $h = 5$ мм, т.е. период работы установки до включения излучателя.

Таблица 2

Результаты экспериментальных и расчетных значений кинетики роста наледи

№ п/п	W'	t, °C	φ, %	W'	W, кг/ч	v', мм/ч	t, мин
1	6,13	-5	60	6,04	4747,00	3,96	75
2	5,32	0	60	5,58	4385,88	3,65	82
3	5,19	5	60	5,12	4024,32	3,3536	89
4	8,21	-5	80	8,04	6319,44	5,27	60
5	7,4	0	80	7,58	5957,88	4,96	60,5
6	7,34	5	80	7,12	5596,32	4,66	64,38
7	10,13	-5	100	9,66	7592,76	6,32	71,20
8	9,32	0	100	9,58	7529,88	6,27	47,85
9	9,19	5	100	9,12	7168,32	5,97	50,25

В результате проведения планированного эксперимента было получено уравнение множественной регрессии, кг/кг:

$$W' = -0,4189 - 0,09167t + 0,109\varphi, \quad (9)$$

Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Как видно из таблицы, экспериментальные значения удельного количества конденсата (второй столбец) и расчетные значения (четвертый столбец) показывают близкие значения с расхождением 1–3 %

Для массовой производительности 500 кг/час по результатам эксперимента рассчитана скорость образования конденсата v' в диапазоне изменения температуры X_1 (t от -5 до +5 °C) и относительной влажности в диапазоне 60–100 % (X_2). Полученные данные описываются уравнением регрессии, мм/ч:

$$v' = -0,1389 - 0,04t + 0,04108\varphi, \quad (10)$$

По результатам комплексных исследований получен патент на изобретение и разработана программа для ЭВМ. для автоматизации и мониторинга работы воздушного теплового насоса с системой MOVEBIT, включающие расчет теплопроизводительности, коэффициента трансформации, управление электрической частью излучателя в широком диапазоне температур [19, 20]. Полученные объекты интеллектуальной собственности подтверждают практическую значимость применения воздушных тепловых насосов с системой MOVEBIT в регионах с холодным климатом для создания с помощью инженерных систем требуемых параметров микроклимата в помещениях различного назначения.

Выводы. В настоящей работе представлены результаты исследования влияния гидродинамических условий на тепло- и массообменные процессы в испарительном блоке теплонасосной установки. Получено уравнение зависимости критерия Нуссельта от критериев Рейнольдса, Прандтля, а также отношений температур наруж-

ного воздуха и фреонового холодопровода. Данное уравнение позволяет определить холодопроизводительность, теплопроизводительность и коэффициенты трансформации тепловой энергии в широком диапазоне температуры, расходов и скоростей движения наружного воздуха. На основании полученных данных разработаны программы для расчета теплопроизводительности и коэффициента трансформации теплоты для всех этапов жизненного цикла инженерных систем, включая: сбор, хранение, обработку и передачу данных. Получено уравнение кинетики роста наледи на поверхности теплообменника испарительного блока, позволяющее рассчитать время работы установки до включения магнитострикционного излучателя. Установлено, что удаление наледи целесообразно проводить при толщине корки не более 5 мм. Полученные результаты использованы для разработки программы работы электрической части излучателя.

Таким образом, применение магнитострикционных излучателей в испарительном блоке воздушного теплового насоса позволяет использовать возобновляемые источники энергии в инженерных системах создания микроклимата помещений, с том числе в вентиляционных установках с рекуперацией теплоты, что в перспективе значительно расширит географию применения воздушных теплонасосных установок в том числе в регионах с холодным климатом.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сидорович В.С. Мировая энергетическая революция: Как возобновляемые источники энергии изменят наш мир. М.: Альпина Паблишер. 2015. 208 с.

2. Зайцев О.Н., Дихтярь Т.В., Циплина А.А. Совершенствование систем микроклимата в сооружениях открытого типа // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 11 (63). С. 187–193.
3. Зайцев О.Н., Ангелюк И.П. Технико-экономическое обоснование использования системы рекуперации тепла дымовых газов // Строительство и техногенная безопасность. 2019. № 16 (68). С. 99–104.
4. Жерлыкина М.Н., Колосов А.И., Панов М.Я., Чуйкин С.В. Теоретическое обоснование режимов работы системы кондиционирования воздуха производственных помещений с незначительными теплоизбытками // Научный журнал строительства и архитектуры. 2020. №1 (57). С. 22–29. DOI: 10.25987/VSTU.2020.57.1.002
5. Исанова А.В., Мартыненко Г.Н. Оптимизация работы теплонасосной пофасадной системы отопления при соблюдении требуемых параметров теплового комфорта жилых зданий // Научный журнал строительства и архитектуры. 2018. № 3 (51). С. 4047.
6. Толмачев В.М., Семичева Н.Е., Амелина Н.В., Амелин В.Ю. Разработка системы умного дома. Перспективная модель и стратегия развития // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2021. № 1 (1037). С. 58–59.
7. Григорова Н.П., Монастырев П.В., Пахомова Е.Г., Семичева Н.Е. Исследование степени интенсификации коэффициента массообмена теплоносителя в вихревом теплообменном аппарате системы отопления газорегуляторного пункта // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25. № 1. С. 53–65.
8. Ежов В.С., Семичева Н.Е., Тютюнов Д.Н., Бурцев А.П., Перепелица Н.С., Бурцев А.П. Математическая модель для автоматизированного управления тепловыми потоками энергоэффективной системы вентиляции // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25. № 1. С. 38–52.
9. Филиппов С.П., Ионов М.С., Дильман М.Д. Перспективы применения воздушных тепловых насосов для теплоснабжения жилых зданий в различных климатических условиях // Теплоэнергетика. 2012. № 11. С. 11–18.
10. Ural T., Dolgun G.K., Guler O.V., Kecebas A. Performance analysis of a textile based solar assisted air source heat pump with the energy and exergy methodology // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2021. Vol. 47. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101534
11. Mohanraj M., Karthick L., Dhivagar R. Performance and economic analysis of a heat pump water heater assisted regenerative solar still using latent heat storage // Applied Thermal Engineering. 2021. Vol. 196. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117263
12. Орлов П.А., Ильина Т.Н., Орлов К.П. Воздействие механических колебаний на обледенение испарителей воздушного теплового насоса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. №. 6. С. 36–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-36-44
13. Il'ina T.N., Orlov P.A., Chizhov A.V. Influence of material structure on the magnetostrictive properties of a radiator for defrosting heat exchangers of ventilation equipment // Constructions materials and productions. 2021. Vol. 4. № 4. Pp. 5–10.
14. Orlov P.A., Il'ina T.N., Orlov K.P. Test of heat pump unit with MOVEBIT anti-icing system // Constructions materials and productions. 2022. Vol. 5. № 2. Pp. 43–50. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-2-43-50
15. Цветков Ф.Ф., Керимов Р.В., Величко В.И. Задачник по тепломассообмену: учебное пособие 2-е изд., исправ. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 196 с.
16. Il'ina T.N., Orlov P.A., Echina A.O. Efficiency of Operation of Air Heat Pumps with Evaporators of Various Designs. Proceedings of the Southwest State University. 2023. Vol. 27. No. 2. Pp. 62–74.
17. Бараков А.В., Дубанин В.Ю., Прутских Д.А., Надеев А.А. Разработка воздухоохладителя испарительного типа для систем вентиляции // Научный журнал строительства и архитектуры. 2021. № 3 (6). С. 37–44. DOI: 10.36622/VSTU.2021.63.3.003
18. Семичева Н.Е., Брежнев А.В., Михайлов Д.С., Лисунов А.А., Пахомов В.Е., Мармоледжо-Дуарте К. Создание благоприятных санитарно-гигиенических условий жизнедеятельности человека в городской среде // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2022. № 12 (1060). С. 30–31.
19. Орлов П.А., Ильина Т.Н., Орлов К.П., Яцуха О.С. Патент № 2795336 РФ. Способ контроля образования инея и льда на рабочей поверхности испарителя теплового насоса. Заявка № 2022128768 от 07 ноября 2022 г.
20. Ильина Т.Н., Саввин Н.Ю., Уваров В.А., Орлов П.А., Орлов К.П. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023668022 «Программа управления основными теплотехническими параметрами воздушного теплового насоса с системой MOVEBIT / Правообладатель ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова. Заявка № 2023667231. Дата поступления 11 августа 2023 г.

Информация об авторах

Ильина Татьяна Николаевна, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: ilina50@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Орлов Павел Анатольевич, соискатель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: orlov Pavel67@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Саввин Никита Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: n-savvin@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Елистратова Юлия Васильевна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: tg.v.info@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 20.02.2024 г.

© Ильина Т.Н., Орлов П.А., Саввин Н.Ю., Елистратова Ю.В., 2024

**Il'ina T.N., Orlov P.A., Savvin N.Yu., Elistratova Yu.V.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
E-mail: ilina50@rambler.ru

THE ECONOMIC ASPECT OF THE SCALE-FORMING DIGNOSTICS LAYERS IN PLATE HEAT EXCHANGERS

Abstract. Heat pump installations and the possibility of their application in engineering systems are considered. This allows expanding significantly the possibilities of using renewable energy sources, as well as waste heat from various technological processes in engineering systems for creating a microclimate. Air heat pumps are the most promising, but their use in regions with a cold climate is limited due to condensation of moisture vapors on the cooling line of the evaporation unit with subsequent formation of ice, which reduces the efficiency of the installation. In this paper, an upgraded evaporative unit of an air heat pump with a MOVEBIT ice removal system is considered. Taking into account the design of the heat exchanger, which includes a magnetostrictive radiator unit, the influence of heat and mass transfer processes in the evaporation unit on the efficiency of the heat pump unit in a wide range of outdoor temperatures is considered. A criterion equation has been obtained for calculating the heat transfer coefficient in the evaporation unit depending on the hydrodynamic conditions of the process and the thermophysical parameters of the air environment. This equation allows to calculate the heating capacity and cooling capacity. In addition, to determine the coefficient of energy transformation of a heat pump installation at all stages of the life cycle of engineering systems. The dependence of the influence of temperature and relative humidity on the kinetics of ice formation is obtained. This provide calculation the operating time of the installation between the cycles of switching on the radiator to destroy the ice. Based on the research results, computer programs have been developed for controlling the main thermal parameters of an air heat pump with a MOVEBIT system and an electrical part of a magnetostrictive radiator in a wide temperature range.

Keywords: heat pump unit, transformation ratio, heat and mass transfer, energy efficiency, evaporation unit, magnetostrictive emitter.

REFERENCES

1. Sidorovich V.S. Global energy revolution: How renewable energy sources will change our world [Mirovaya energeticheskaya revolyuciya: Kak vozobnovlyayemye istochniki energii izmenyat nash mir]. M.: Alpina Publisher. 2015. 208 p. (rus)
2. Zaitsev O.N., Dikhtyar T.V., Tsiplina A.A. Improving microclimate systems in open-type structures [Sovershenstvovanie sistem mikroklimata v sooruzheniyah otkrytogo tipa]. Construction and technogenic safety. 2018. No. 11 (63). Pp. 187–193. (rus)
3. Zaitsev O.N., Angelyuk I.P. Feasibility study for the use of a flue gas heat recovery system [Feasibility study of using a flue gas heat recovery system]. Construction and technogenic safety. 2019. No. 16 (68). Pp. 99–104. (rus)
4. Zherlykina M.N., Kolosov A.I., Panov M.Ya., Chuikin S.V. Theoretical justification of the operating modes of the air conditioning system of in-

dustrial premises with minor heat excess [Teoreticheskoe obosnovanie rezhimov raboty sistemy kondicionirovaniya vozduha proizvodstvennyh pomeshchenij s neznachitel'nymi teploizbytkami]. Scientific journal of construction and architecture. 2020. No. 1 (57). Pp. 22–29. DOI: 10.25987/VSTU.2020.57.1.002. (rus)

5. Isanova A.V., Martynenko G.N. Optimization of the operation of a heat pump façade heating system while observing the required parameters of thermal comfort of residential buildings [Optimizaciya raboty teplonasosnoj pofasadnoj sistemy otopeniya pri soblyudenii trebuyemyh parametrov teplovogo komforta zhilyh zdaniy]. Scientific Journal of Construction and Architecture. 2018. No. 3 (51). Pp. 40–47. (rus)

6. Tolmachev V.M., Semicheva N.E., Amelina N.V., Amelin V.Yu. Development of a smart home system. Promising model and development strategy [Razrabotka sistemy umnogo doma. Perspektivnaya model' i strategiya razvitiya]. BST: Bulletin of Construction Equipment. 2021. No. 1 (1037). Pp. 58–59. (rus)

7. Grigorova N.P., Monastirev P.V., Pakhomova E.G., Semicheva N.E. Study of the degree of intensification of the coolant mass transfer coefficient in a vortex heat exchange apparatus of the heating system of a gas control point [Issledovanie stepeni intensivatsii koeffitsienta massoobmena teplonositelya v vihrevom teploobmennom apparate sistemy otopeniya gazoregulyatornogo punkta]. News of the South-Western State University. 2021. Vol. 25. No. 1. Pp. 53–65. (rus)

8. Ezhov V.S., Semicheva N.E., Tyutyunov D.N., Burtsev A.P., Perepelitsa N.S., Burtsev A.P. Mathematical model for automated control of heat flows of an energy-efficient ventilation system [Matematicheskaya model' dlya avtomatizirovannogo upravleniya teplovymi potokami energoeffektivnoj sistemy ventilyacii]. News of the South-West State University. 2021. Vol. 25. No. 1. Pp. 38–52. (rus)

9. Filippov S.P., Ionov M.S., Dilman M.D. Prospects for the use of air heat pumps for heat supply of residential buildings in various climatic conditions [Perspektivy primeneniya vozdukhnyh teplovyh nasosov dlya teplosnabzheniya zhilyh zdaniy v razlichnykh klimaticheskikh usloviyakh]. Thermal power engineering. 2012. No. 11. Pp. 11–18. (rus)

10. Ural T., Dolgun G.K., Guler O.V., Kecebas A. Performance analysis of a textile based solar assisted air source heat pump with the energy and exergy methodology. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2021. Vol. 47. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101534

11. Mohanraj M., Karthick L., Dhivagar R. Performance and economic analysis of a heat pump water heater assisted regenerative solar still using latent

heat storage. Applied thermal Engineering. 2021. Vol. 196. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117263

12. Orlov P.A., Il'ina T.N., Orlov K.P. The impact of mechanical vibrations on icing of evaporators of an air heat pump. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. 2021. No. 6. Pp. 36–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-36-44.

13. Il'ina T.N., Orlov P.A., Chizhov A.V. Influence of material structure on the magnetostrictive properties of a radiator for defrosting heat exchangers of ventilation equipment. Constructions materials and productions. 2021. Vol. 4. № 4. Pp. 5–10.

14. Orlov P.A., Il'ina T.N., Orlov K.P. Test of heat pump unit with MOVEBIT anti-icing system. Constructions materials and productions. 2022. Vol. 5. No 2. Pp. 43–50. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-2-43-50.

15. Tsvetkov F.F., Kerimov R.V., Velichko V.I. Problem book on heat and mass transfer [Zadachnik po teplomassoobmenu]. M.: MPEI Publishing House. 2008. 196 p.

16. Il'ina T.N., Orlov P.A., Echina A.O. Efficiency of Operation of Air Heat Pumps with Evaporators of Various Designs. Proceedings of the Southwest State University. 2023. Vol 27. No. 2. Pp. 62–74.

17. Barakov A.V., Dubanin V.Yu., Prutskikh D.A., Nadeev A.A. Development of an evaporative type air cooler for ventilation systems [Razrabotka vozduhoohladitelya isparitel'nogo tipa dlya sistem ventilyacii]. Scientific Journal of Construction and Architecture. 2021. No. 3 (6). Pp. 37–44. DOI: 10.36622/VSTU.2021.63.3.003. (rus)

18. Semicheva N.E., Brezhnev A.V., Mikhailov D.C., Lisunov A.A., Pakhomov V.E., Marmoleggo-Duarte K. Creation of favorable sanitary and hygienic conditions for human life in the urban environment [Sozdanie blagopriyatnykh sanitarno-gigienicheskikh uslovij zhiznedeyatel'nosti cheloveka v gorodskoj srede]. BLS: Bulletin of Construction Technology. 2022. No. 12 (1060). Pp. 30–31. (rus)

19. Orlov P.A., Il'ina T.N., Orlov K.P., Yatsukha O.S. Patent No. 2795336 RF. A method for controlling the formation of frost and ice on the working surface of a heat pump evaporator [Sposob kontrolya obrazovaniya ineya i l'da na rabochej poverhnosti isparitelya teplovogo nasosa.]. Application No. 2022128768 dated November 07. 2022. (rus)

20. Il'ina T.N., Savvin N.Yu., Uvarov V.A., Orlov P.A., Orlov K.P. Certificate of state registration of a computer program No. 2023668022 «Program for controlling the main thermal parameters of an air heat pump with the MOVEBIT system» [Programma upravleniya osnovnymi teplotekhnicheskimi parametrami vozdukhного teplovogo nasosa s sistemoy MOVEBIT]. Copyright holder FSBEI HE BSTU

named after. V.G. Shukhova. Application No. 2023667231. Received date: August 11. 2023. (rus)

Information about the author

Il'ina, Tat'yana N. DSc, Professor. E-mail: ilina50@rambler.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Orlov, Pavel A. Applicant for the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation. E-mail: orlovpavel67@gmail.com. Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Savvin, Nikita Yu. PhD, Assistant professor. E-mail: n-savvin@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Elistratova, Yulia V. PhD, Assistant professor. E-mail: tgv.info@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 20.02.2024

Для цитирования:

Ильина Т.Н., Орлов П.А., Саввин Н.Ю., Елистратова Ю.В. Тепломассообменные процессы в испарительном блоке воздушного теплового насоса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №4. С. 36–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-36-44

For citation:

Il'ina T.N., Orlov P.A., Savvin N.Yu., Elistratova Yu.V. The economic aspect of the scale-forming diagnostics layers in plate heat exchangers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 4. Pp. 36–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-36-44

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-45-57

Теслер К.И., *Додонова М.А.*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет***E-mail: dodonova02@mail.ru*

ТЕНДЕНЦИИ РЕШЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОБЛЕМ В МЕГАПОЛИСАХ И ЭВОЛЮЦИЯ ПРОЕКТНОГО МЫШЛЕНИЯ

Аннотация. Заторы в мегаполисах из-за экстремальной плотности населения и недостаточной эффективности транспортной инфраструктуры приводят к серьезным последствиям. Пробки влекут за собой не только дискомфорт для пассажиров, но и негативное воздействие на экономику и окружающую среду. Чтобы стабилизировать ситуацию и ликвидировать отрицательное влияние неэффективного трафика на жизнь мегаполисов, необходимо пересмотреть ранее используемые приемы и определить новые меры по решению проблемы. Методы исследования включают в себя обзор и систематизацию информационных источников, связанных с экономическими, градостроительными и социальными аспектами транспортной инфраструктуры. С помощью обобщения и сопоставления результатов отечественного и зарубежного опыта устранения дорожных заторов выявлены устаревшие методы и определены тенденции развития проектного мышления в области строительства дорожных пространств. Актуальные рейтинги транспортных систем позволяют зафиксировать список лидеров с эффективной политикой развития общественного транспорта. Концептуальное моделирование демонстрирует современные особенности размещения улично-дорожных сетей в границах города. Для совершенствования городской мобильности необходим комплексный подход: активное внедрение инноваций в транспортную структуру, изменение градостроительного мышления, пересмотр управленческого воздействия, изменение приоритетов в пользу потребностей пешеходов и формирование общества, вовлечение его в процесс модернизации. Эти приемы позволяют создать современные и умные городские пространства, соответствующие потребностям современного общества.

Ключевые слова: транспортная инфраструктура, мобильность, урбанизированные территории, инновация, мегаполис, устойчивые городские планы.

Введение. Мегаполисы, как высоко урбанизированные территории, характеризуются развитой инфраструктурой, множеством социокультурных и экономических возможностей. Как следствие, их особенностью является экстремальная плотность населения, большое число автомобилей, густонаселенные города-спутники.

Ядра агломераций ориентированы на эффективную деятельность человека. Жители мегаполисов вынуждены справляться с оперативностью и мобильностью. Однако в соответствии с тезисом Гегеля об «иронии истории», который фиксирует феномен несовпадения целей человеческих усилий и полученного результата, массовая автомобилизация приводит к образованию заторов и замедлений на оживленных участках дороги взамен быстрых и комфортных перемещений [1]. Выбор транспортной инфраструктуры мегаполисов в качестве объекта исследования позволит установить закономерность действий, ведущих к желаемым условиям мобильности.

Вынужденное длительное пребывание в пути забирает самый ценный ресурс человека, такой как время, оказывает негативное влияние на эмоциональное состояние и работоспособность населения. Пробки не только доставляют неудобство пассажирам, но и отрицательно сказываются

на экономических процессах и экологической ситуации планеты [2].

Задержки товаров не удовлетворяют запросы потребителей и ослабляют бизнес. Пробки приводят к деградации финансового механизма, поскольку транспортная система является одним из важнейших элементов экономики [3]. Непродуктивный транспорт бессмысленно расходует топливо, как экономический и материальный ресурс, и загрязняет окружающую среду. Испорченный выбросами воздух подвергает опасности здоровье человека, животных и ухудшает состояние экосистемы в целом [4]. Непроработанность и легкомыслие в этой теме могут замедлить инновационное развитие городов и даже довести положение до катастрофы, потому что современные мегаполисы нуждаются в постоянном увеличении объема транспортного сообщения, повышения его надежности, безопасности и качества. [5].

Транспортная проблема существует уже более сотни лет. Ещё в начале XX века появились первые упоминания об остановке движения на улицах крупных американских городов из-за избытка автомобилей. По некоторым источникам само слово "пробка" (traffic jam) было создано журналистами из Saturday Evening Post в 1908 г., когда потребовалось описать затруднительную

автомобильную ситуацию, возникшую на улицах района Манхэттен в Нью-Йорке. В этот период начали внедряться различные меры и инновации по борьбе с пробками.

Урбанизация, стремление к сокращению времени на получение результата и растущее число горожан ставят новые задачи перед техническим прогрессом в транспортной сфере. В научной литературе множество работ исследует вопрос преобразования негативных особенностей транспортной сети. Например, советский и российский ученый Н.В. Правдин занимался вопросом транспортной логистики, делая упор на взаимодействие различных видов транспорта [6]. Он разработал основы построения генеральных схем транспортных узлов, внес значительный вклад в проектирование железнодорожных станций и их конструкций, размещенных в комплексе с городскими видами транспорта, что положило начало унифицированной транспортной системе. Независимый консультант Д. Саттон занимался исследованием географической мобильности в социальном и политико-экономическом контексте. Он разработал транспортные информационные системы, и предложил концепцию сочетания технологий с логистикой [7]. Настоящее время характеризуется активной цифровизацией, развитием искусственных интеллектуальных систем и быстрым изменением условий и характера мобильности. Вопрос внедрения инновационных технологий в градостроительное планирование и оптимизации навигации потоков транспортных средств остаётся малоизученным. Процесс по увеличению мобильности и снижению дорожных заторов продолжается и сегодня, несмотря на большое количество проведенных реформ в этой сфере.

Некоторые из разработанных средств оказались неэффективными. Например, в Лос-Анджелесе (США) проводились мероприятия по расширению дорог и строительству новых магистралей. Предпосылкой этому процессу послужило активное расширение частного сектора и производственных учреждений города. В конце XIX в. появились новые тесно взаимодействующие города, такие как Пассадина и Бербанк. Автобусные маршруты не могли обеспечить доступ ко всем жилым кварталам и актуальным удаленным территориям, а местные власти, стремясь удовлетворить потребности автовладельцев, не принимали инновационных мер по созданию разветвленной сети общественного транспорта. Карта города стала представлять плотную сетку дорог и хайвеев, где вопрос мобильности граждан решался с помощью личного автомобиля. Растущее число машин все больше перерастало

возможности дорожного полотна, из-за чего пробки стали характерной чертой мегаполиса.

Иногда нестандартные события создают пробки на дорогах: так в 1969 году штат Вашингтон (США) остановился из-за рок-фестиваля, ураган Техаса (США) сформировал 60-километровый дорожный затор, Сан-Пауло (Бразилия) прославился самым длинным затором в 292 км в 2008 году, а в Китае люди провели в пробке 11 дней в 2010 году.

Неудобные схемы движения стали причиной заторов на улицах Санкт-Петербурга (Россия). Плохая координация перемещений и неэффективное управление светофорами ухудшили ситуацию на дорогах. В Москве (Россия) первые пробки появились в начале 20-го века, а с ростом числа автомобилей и населения заторы стали частью городской дорожной сети. «Генплан возможностей», предусматривающий развитие деловых районов и масштабное строительство дорог, оказался провальной идеей. Парадокс Браса фиксирует закономерность: увеличение пробок с растущим числом дорог [8]. Поэтому переустройство города под автомобилистов ограничивает в правах людей, которым недоступно владение транспортным средством, и затрудняет перемещение владельцев автомобилей в силу нехватки территорий для прокладки достаточного количества дорог. Из-за совокупности этих факторов по исследованию нидерландской компании Том Том в 2013 году Москва была признана мировым лидером по длине пробок [9].

Современный мир нуждается в быстром выполнении задач и оперативном принятии решений. Чем крупнее и многофункциональнее город, тем острее стоит вопрос мобильности, комфорта и безопасности [10], вследствие которых этот город становится еще более эффективным и развитым. Планирование городской среды, безусловно, остается важнейшим элементом для получения продуктивных и устойчивых результатов, падения автомобильной зависимости [11]. Но меры по расширению транспортной инфраструктуры и изменению её конфигурации не оказывают положительное влияние на возникшую транспортную проблему в мегаполисах, хотя экстенсивный метод иногда является необходимым направлением изменений, без которых дальнейшее интенсивное развитие невозможно [12].

Обзор проблем, возникающих на дорогах крупных городов позволяет установить актуальные научно-исследовательские задачи: выявление и фиксация верных градостроительных решений, установление негативных факторов, оказывающих влияние на городской трафик, изучение комплекса разработанных и принятых решений по устранению заторов в мегаполисах.

Цель исследования: определить вектор развития мер по совершенствованию городского трафика и разработать предложения по оптимизации процессов и их модернизации внутри заложенной инфраструктуры в рамках интенсивного эволюционирования.

Материалы и методы. Чтобы выявить результативные меры устранения транспортных заторов, обратимся к сравнительному анализу градостроительных структур мегаполисов, изучим характерные показатели транспортной сферы и сопоставим принципы устройства дорожной логистики с эффективностью борьбы с пробками.

Исследование городской инфраструктуры Лондона (Англия) показывает среднюю скорость движения на дорогах в 34 км/ч. Такого результата удалось добиться благодаря утверждению платы за въезд в центральные районы. В городе введены существенные ограничения на личный транспорт, выраженные в стоимости его использования (рис. 1). Снижение транспортной активности

стало возможным за счет ценообразования на зонированный проезд и парковочные места. Эта мера привела к увеличению использования общественного транспорта и шеринговых средств передвижения. Альтернативные пути проезда, такие как железнодорожные ветки, велодорожки, при высокой доступности и удобстве (рис. 2, 3) разгрузили основные дорожные магистрали Лондона. Мегаполис испытывал негативное влияние автомобилизации, но еще в конце шестидесятых годов стали разрабатываться меры по его ослаблению. В 1968 году в Лондоне была обустроена первая полоса для автобусов с бордюром на Парк-Лейн. Хорошая статистика передвижения была получена в результате внедрения полос на Брикстон-роуд в 1969 году и набережной Альберта в 1975 году. Сейчас общественный транспорт мегаполиса остается безопасным способом передвижения, связывает все районы города разветвленной сеткой маршрутов (рис.4) и сохраняет высокие показатели устойчивого развития (рис. 5).

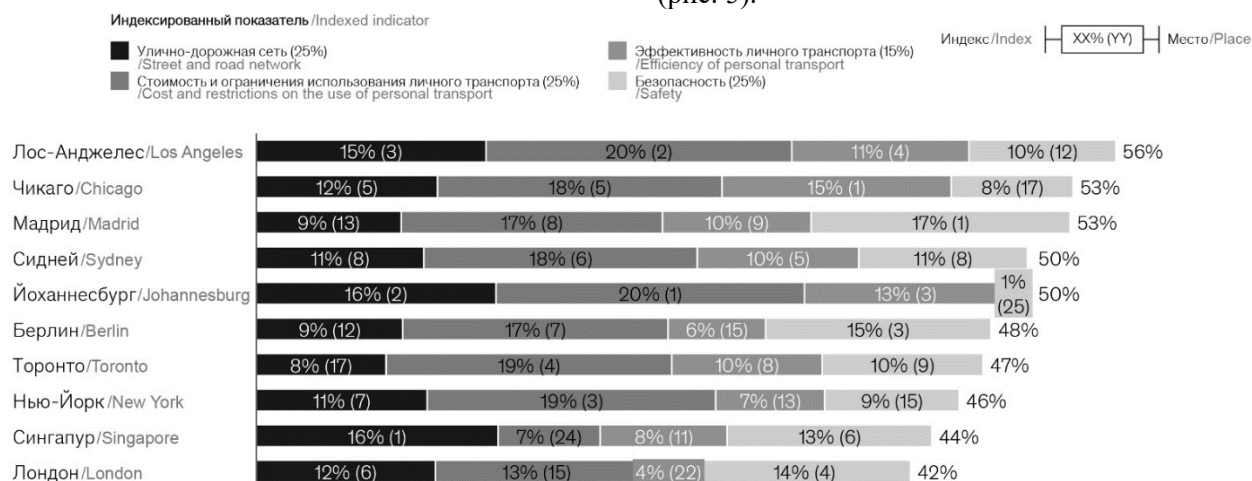


Рис. 1. Рейтинг стран мира по показателям использования личного транспорта. [https://clck.ru/34hJea]

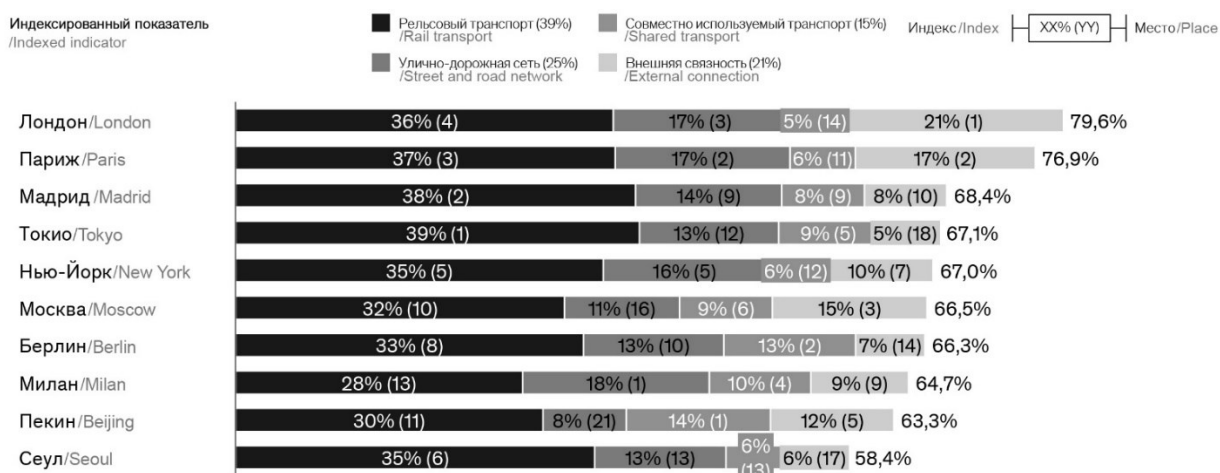


Рис. 2. Рейтинг стран мира по показателям физической доступности. [https://clck.ru/34hJea]

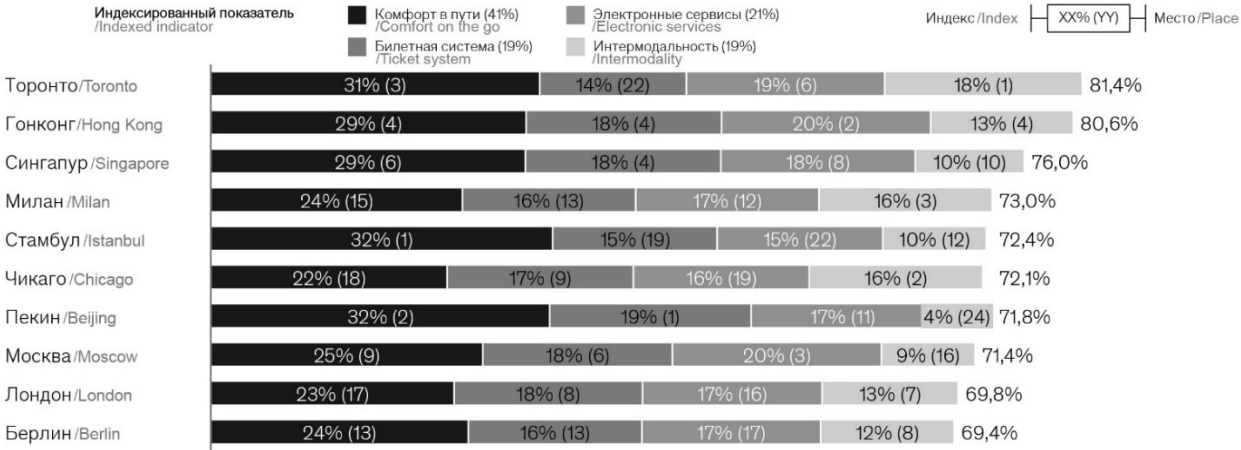


Рис. 3. Рейтинг стран мира по показателям удобства. [https://clck.ru/34hJea]

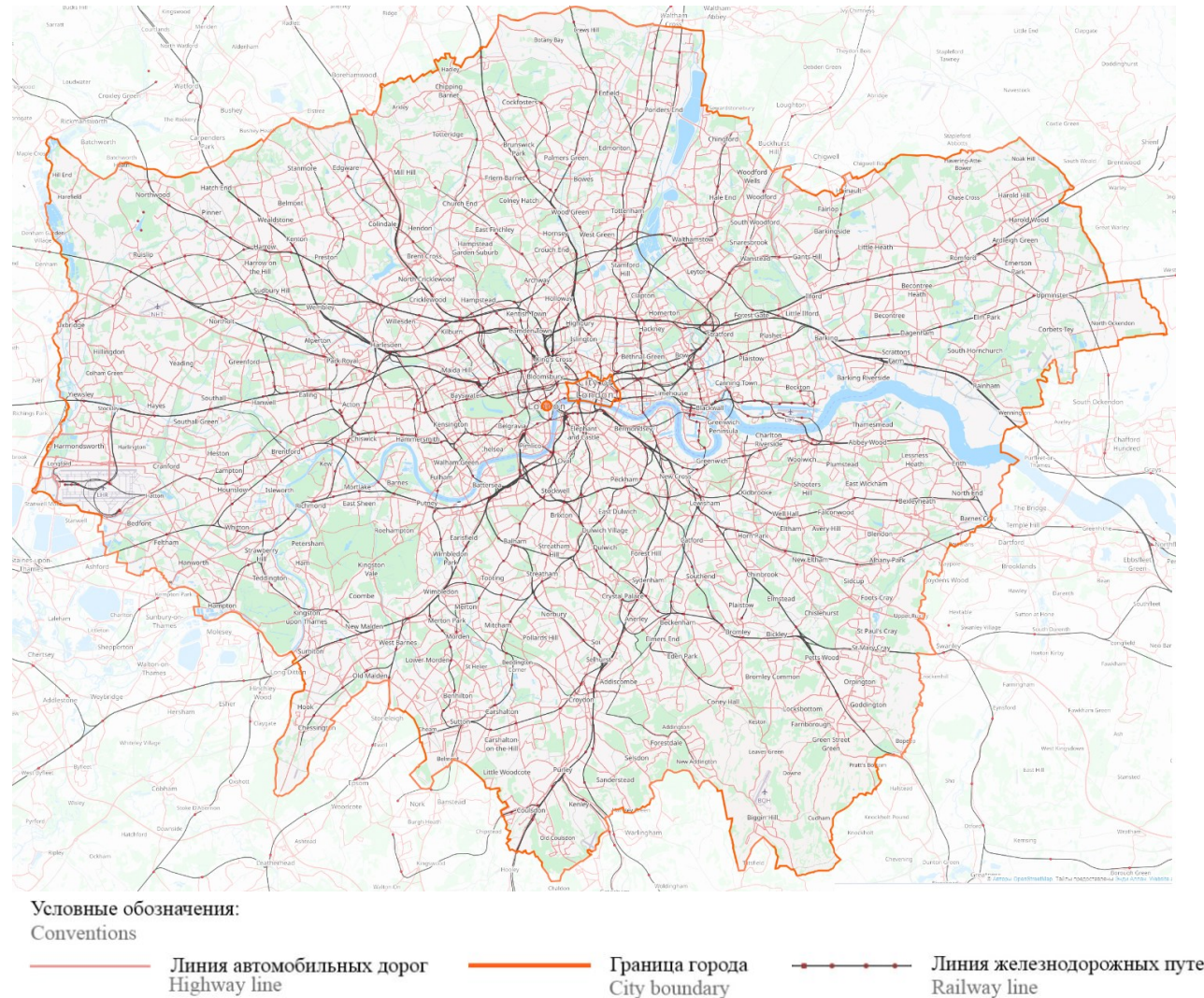


Рис. 4. Карта-схема транспортной сети Лондона. [https://clck.ru/392vkU]

Нью-Йорк (США) изначально проектировался с учетом высокой транспортной нагрузки. Он имеет систему улиц, ориентированных в строгом прямом направлении, развитую дорожную

сеть (рис.1), что облегчает движение и обеспечивает хорошую проходимость. В настоящее время карта города представляет из себя стройную систему взаимосвязанных железнодорожных и автомобильных линий (рис. 6).

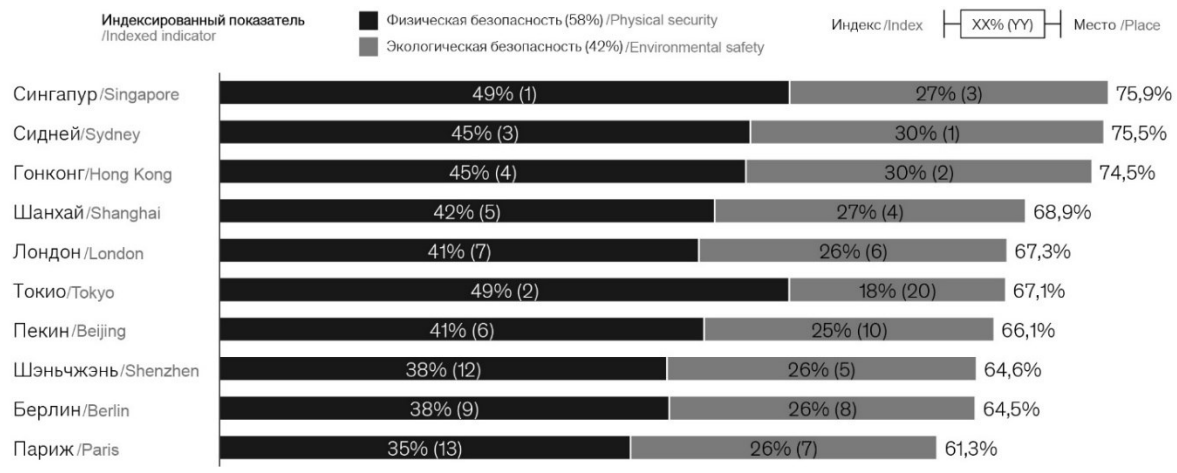


Рис. 5. Рейтинг стран мира по показателям безопасности и устойчивого развития. [https://clck.ru/34hJea]

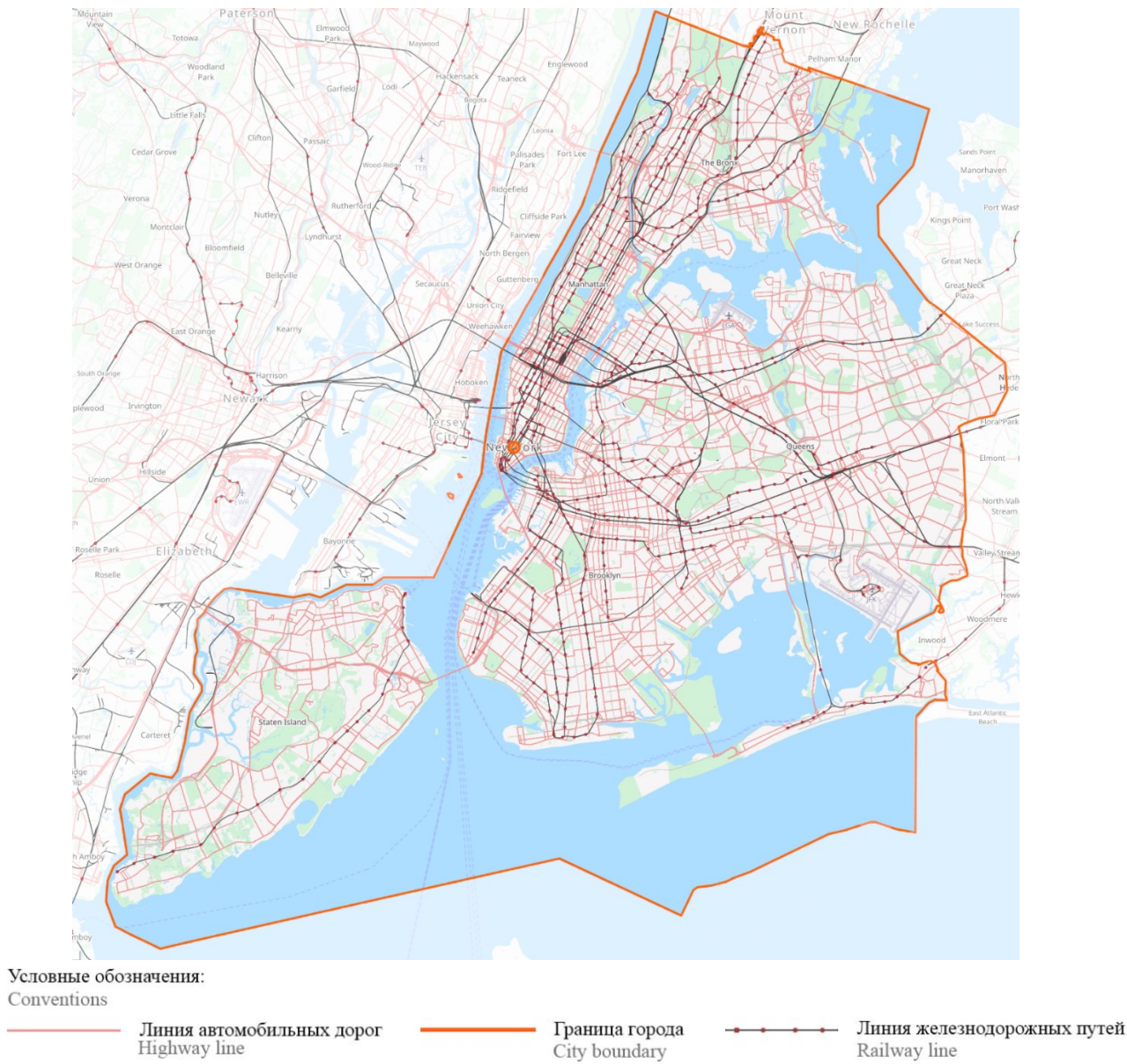


Рис. 6. Карта-схема транспортной сети Нью-Йорка. [https://clck.ru/392vkU]

Унифицированный общественный транспорт характеризуется высоким качеством, большой густотой покрытия и активно пользуется

спросом благодаря доступности [13] (рис. 2, 7). Адаптация предложения, инвестиционная деятельность и экономическое влияние на смягчение

спроса помогли стабилизировать транспортное положение мегаполиса [14]. Комфортное функционирования города было обеспечено с помощью восстановления баланса между развитием инфраструктуры для частного, общественного

транспорта и созданием качественных пешеходных зон, закрывающих не менее важные потребности в передвижении [15]. Сохранение многофункциональности улиц делает их безопасными и эффективными.

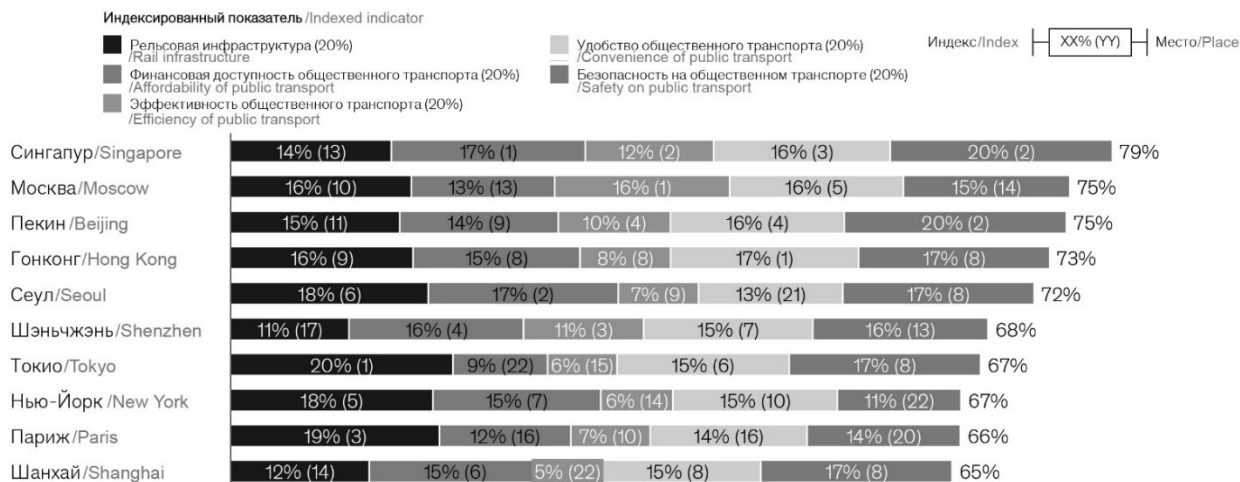


Рис. 7. Рейтинг стран мира по показателям спроса на общественный транспорт. [https://clck.ru/34hJea]

Многие жители Парижа (Франция) отдают предпочтение общественному транспорту из-за его рентабельности и доступности по сравнению с автомобилями (рис. 2, 7). Транспортная система города насчитывает около 400 станций метро, более 300 автобусных маршрутов и крупную трамвайную сеть (рис. 8). Система выделенных полос

для автобусов и такси, инфраструктура для велосипедов и высокие штрафы за нарушение правил движения способствуют оптимизации дорожного движения, склоняя основной поток людей к использованию маршрутных транспортных средств.

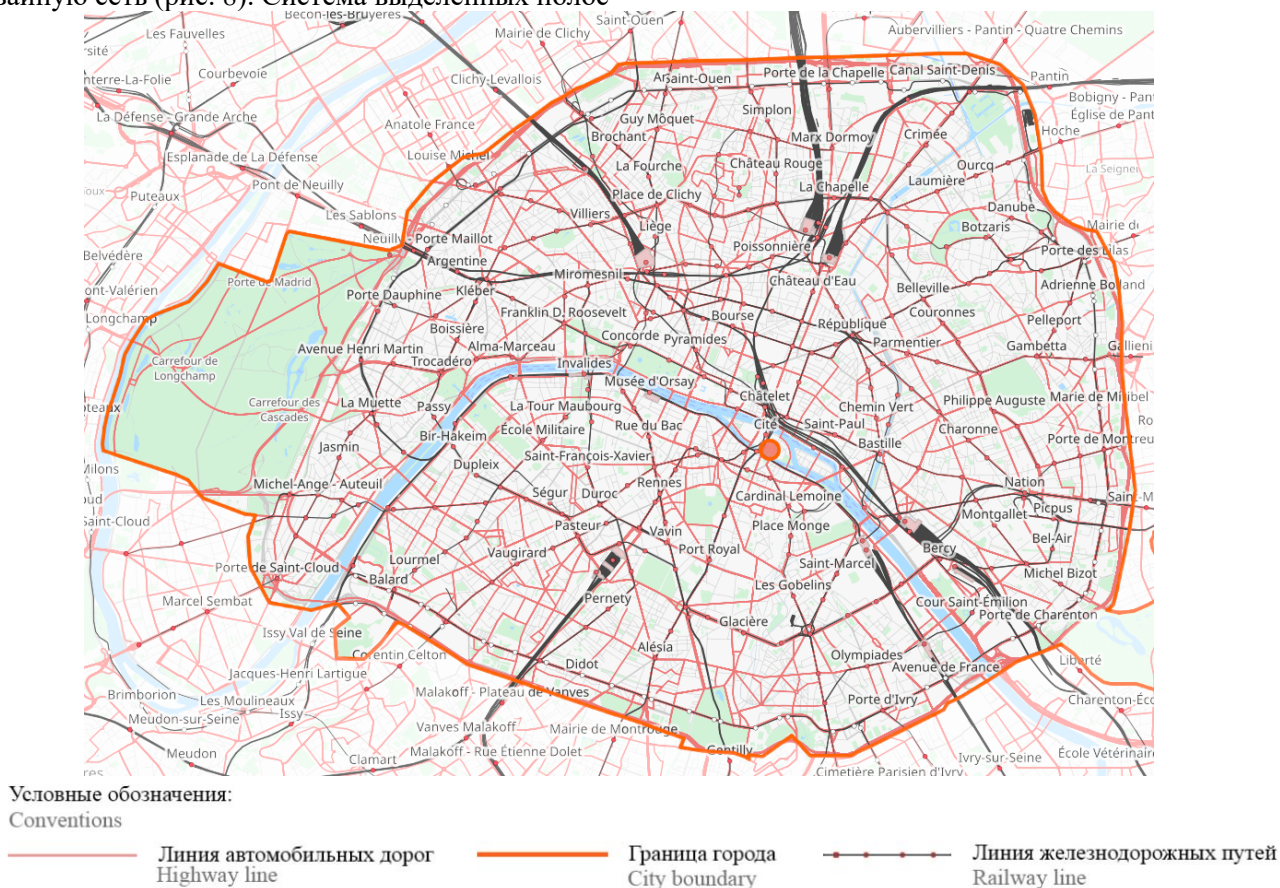


Рис. 8. Карта-схема транспортной сети Парижа. [https://clck.ru/392vkU]

Схема общественных средств передвижения Пекина (Китай) представляет собой комплекс автодорог для городских и междугородних автобусов, железнодорожных путей и велосипедных маршрутов (рис. 9).

Продолжают активно расширяться альтернативные маршруты водного, воздушного транспорта, совершенствуется метрополитен.

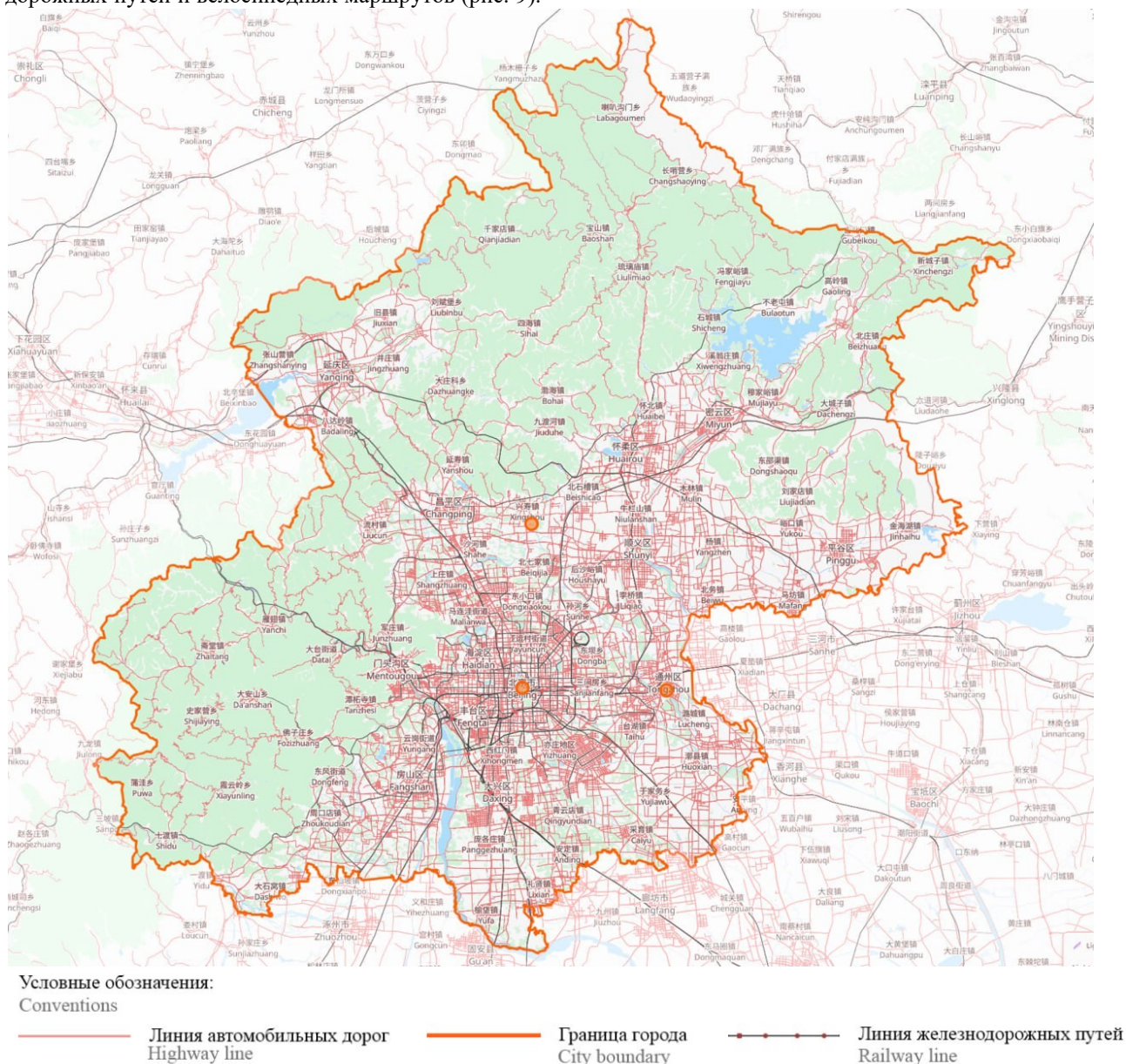


Рис. 9. Карта-схема транспортной сети Пекина. [<https://clck.ru/392vkU>]

В столице введены серьезные ограничения на владение и пользование личным транспортом на законодательном уровне. Въезд иногородних автомобилей в город запрещен. Водители могут использовать личные машины только в определенные числа месяца, а получают право на приобретение номера на движимое имущество исключительно в конкурсном порядке. Транспортная доступность имеет высокие показатели благодаря общественному транспорту. Он характеризуется физической и финансовой доступностью (рис. 2, 11), удобством (рис. 3) и безопасностью использования (рис. 5), высокими показателями спроса (рис. 7) и высокой эффективностью (рис. 10). Лимитированный доступ к личному

транспорту и развитая структура общественного позволили закрепить 30 км/ч, как среднюю скорость движения в мегаполисе.

В Москве (Россия) в результате усовершенствования и распространения муниципальных средств передвижения, спрос на них повысился (рис. 2, 7). Пользователи двух основных способов перемещения, таких как личный и общественный транспорт, не являются двумя разными группами. Люди успешно меняют предпочтения в соответствии с параметрами: скорость, комфорт и цена. Развитая структура метрополитена Москвы (рис. 12), включающая самое большое метрокольцо в мире (БКЛ 70 км) пользуется большим спросом у жителей города и туристов.

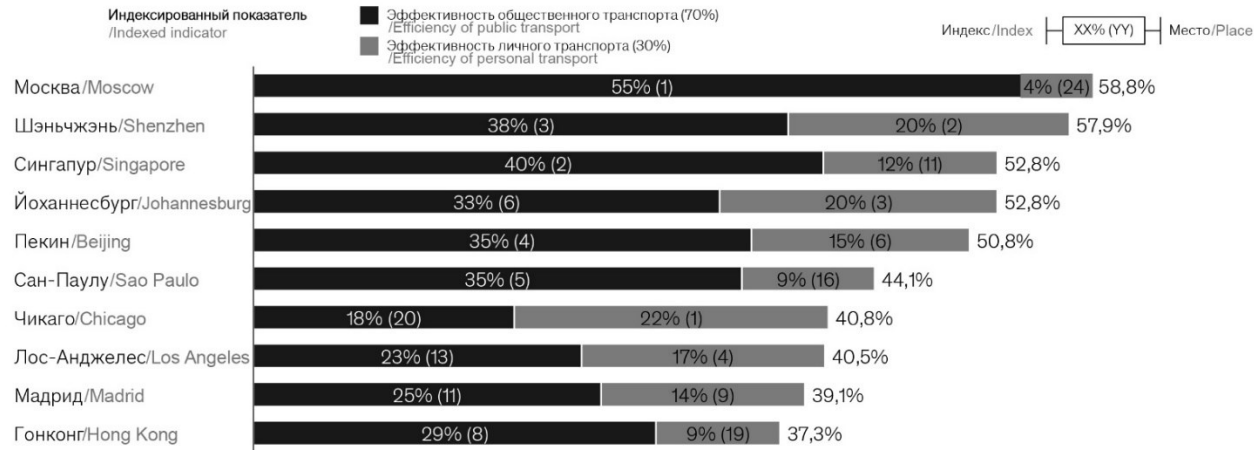


Рис. 10. Рейтинг стран мира по показателям эффективности. [https://clck.ru/34hJea]

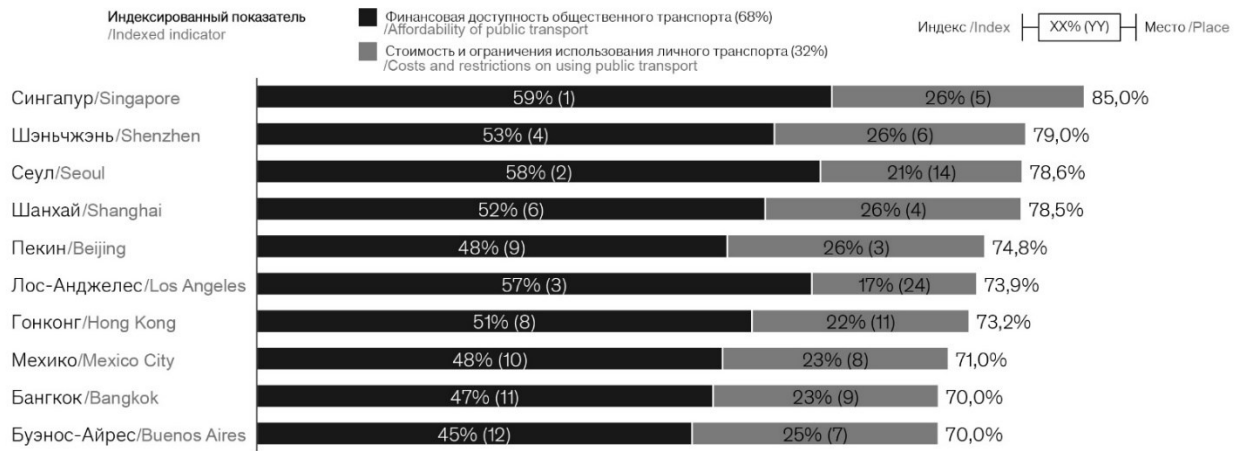


Рис.11. Рейтинг стран мира по показателям финансовой доступности. [https://clck.ru/34hJea]

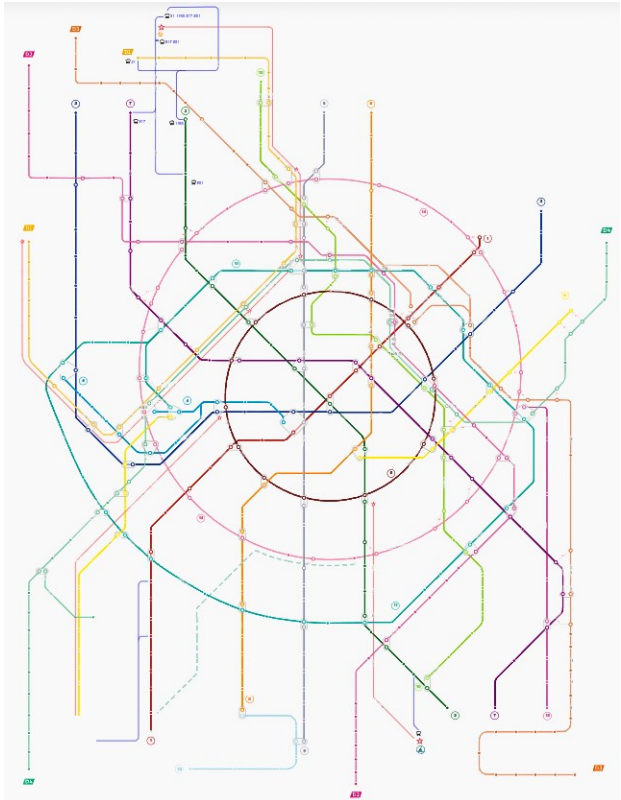


Рис. 12. Схема московского метро

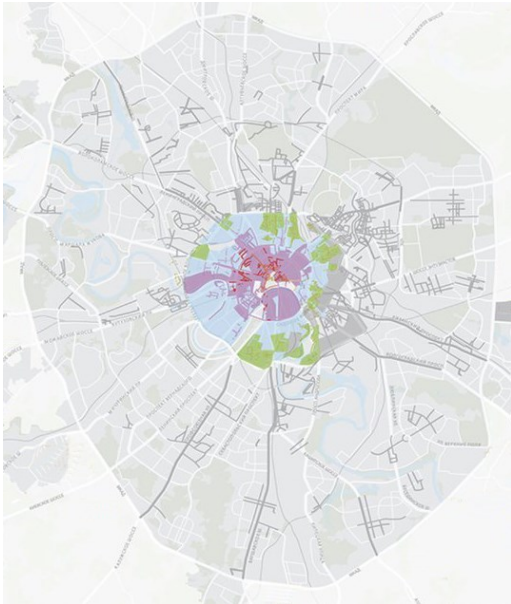


Рис. 13. Расширение зоны платной парковки
Москвы

А значит изменение условий мобильности базируется на улучшении качества общественного транспорта. Жители города используют более эффективный и доступный способ передвижения в сравнении с личными автомобилями (рис. 3, 10). Планировочные методы в разработке транспортной сети повысили пропускную способность улиц [16]. Перехватывающие парковки, стояночные места стали платными (рис. 13), распространился шеринговый транспорт и развилась велоинфраструктура. В настоящее время проводится политика по регулированию движения грузового транспорта, одним из направлений которого является возможность скоростного движения. И к 2025 году планируется завершение формирования сети федеральных скоростных дорог, соединяющих Москву и Московскую область с другими территориями [17]. Сейчас мы наблюдаем значительное улучшение транспортной ситуации: Москва к 2015 году переместилась по длине пробок на пятое место в мире. А в 2017 году мегаполис исключили из топ-10 городов с самыми загруженными дорогами по версии рейтинга Tom Tom [18]. Транспортные реформы, проведенные в рамках грамотной инвестиционно-строительной деятельности [19], предполагают формирование автодорожного радиально-кольцевого каркаса нового качества к 2030 году. Он позволит значительно снизить время поездки как внутри региона, так и на межрегиональных маршрутах.

Основная часть. Современность диктует нам новые условия, но также наделяет возможностью использовать инновационные технологии для решения транспортных проблем. Переосмысление и модернизация мер по борьбе с пробками позволят усилить положительный эффект преобразований. Практика показывает, что помимо мониторинга дорожной ситуации, регулирования и управления движением, продуктивность потока автомобилей зависит от качества сотрудничества между водителями [20]. Современные технологии способны поднять общение на новый уровень, локализовать источник и адресат информации. Инновационное оборудование может предоставить возможность поднять информированность владельца о ситуации на дороге, персонализировать транспорт и адаптировать под индивидуальные запросы.

Умные светофоры могут адаптировать режим работы в реальном времени исходя из текущей интенсивности движения. Алгоритмы нечеткой логики увеличат пропускную способность элементов улично-дорожной сети, снизят экологическую нагрузку и аварийность [21]. Сокращенное время ожидания позволит водителям равномерно двигаться, повысить среднюю скорость

из-за отсутствия заторов. Современные системы управления транспортом нужны, чтобы использовать данные с дорожных камер, датчиков и GPS для мониторинга и управления движением на дорогах. Электронные системы оплаты дорожных сборов могут регулировать спрос на загруженные участки дороги в пиковые часы, изменяя стоимость их использования. Умные парковки помогут водителям быстро находить свободные места, что уменьшит количество машин, которые занимают дорожное полотно во время поиска парковки.

Развитие технологий автоматического вождения улучшит эффективность дорожного движения и предотвратит распространенные причины пробок, такие как несчастные случаи и человеческие ошибки [22]. Исследователи и инженеры решают новые задачи по преодолению инновационных проблем, что позволит обеспечить продуктивное, эффективное и безопасное функционирование многочисленных и сложных автономных устройств. И благодаря непрерывному технологическому прогрессу человечество реализует подобные инновации.

Разработка устойчивых городских планов поспособствует сокращению дорожной нагрузки. Смешанная застройка территорий с упором на компактное и эффективное землепользование сократит разрастание городов и увеличит разнообразие функций внутри квартала, повышая пешую доступность к востребованным пространствам. Градостроительные меры по зонированию полос движения помогут сформировать иерархию транспортных средств, устраняющую заторы и смягчающую экологические и энергетические проблемы. Дорожное полотно должно состоять из свободных полос общественного колесного и рельсового транспорта и сокращенного числа полос для проезда частных автомобилей. Улицы должны быть оснащены безопасными велодорожками с выделенными местами остановки и парковки, пешими тротуарами, изолированными от пыли и шума автомобилей, благоустроенными озелененными зонами отдыха. Устойчивое городское планирование позволит снизить зависимость от пользования личным автомобилем, создать удобную среду для пешеходов и объединить экологические, социальные и экономические интересы.

Популярные навигационные приложения, такие как Google Maps, 2 GIS и Яндекс Карты, уже предоставляют информацию о текущем состоянии дорог и предлагают альтернативные способы передвижения. К сожалению, на данный момент отчет ВСГ «Как решить проблему мобильности в мегаполисах» показал, что 37% ав-

томобилистов в мегаполисах пока не готовы отказываться от личного транспорта в пользу общественного [23], поскольку не видят равнозначной для себя альтернативы. Чтобы качественно распределить поток людей, нужно совершенствовать общественный транспорт, расширять разнообразие маршрутов, создавать высокоскоростные линии, комфортные в использовании и точные в координации.

Проведение кампаний по информированию о методах снижения пробок делает население эрудированным. Люди узнают о новых возможностях и преимуществах нововведений и смогут использовать альтернативные способы передвижения на благо личным и общественным интересам.

Выводы. Анализ советского, российского и зарубежного опыта помог сформулировать основные принципы решения транспортных проблем мегаполисов. Они заключаются в создании надежной и эффективной сети общественных маршрутов, представленных разными взаимосвязанными средствами передвижения, в зонировании полос и создании комфортной среды для людей, не владеющих личным автомобилем.

Мобильность граждан играет важную роль в контексте современных реалий. Комфорт, безопасность и скорость передвижения пассажиров и грузов способны поднять экономический и экологический аспекты городских пространств на новый уровень. Поэтому территории с активным транспортным потоком нуждаются в новом градостроительном мышлении, завязанном на использовании современных технологий. Внедрение информационных устройств, автоматизация процессов управления, регулирование потоков путем усовершенствованных навигации и информирования позволят решить транспортную проблему мегаполисов. Комплексный инновационный подход выступает инструментом для создания умных и эффективных городских пространств, удовлетворяющих потребности современного общества.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рахманов А.Б. Четыре колеса апокалипсиса: причины автомобильных пробок в крупных городах мира // Вестник Томского государственного университета. Философия. Социология. Политология. 2020. №58. С. 170–188. DOI: 10.17223/1998863X/58/16
2. Amin A., Altinoz B., Dogan E. Analyzing the Determinants of Carbon Emissions from Transportation in European Countries: The Role of Renewable Energy and Urbanization // Clean Technologies and Environmental Policy. Vol. 22. No. 8. 2020. Pp. 1725–1734. DOI: 10.1007/s10098-020-01910-2
3. Лашко С.И., Милованов В.Ф. Транспортная проблема: анализ, перспективы и предложения // Научный вестник ЮИМ. 2018. №4(16). С. 24–29. DOI: 10.31775/2305-3100-2018-1-24-29
4. Малышев А.А. Влияние автомобильных пробок на состояние окружающей среды // Наука и образование: будущее и цели устойчивого развития. М.: Московский университет им. С.Ю. Витте. 2020. С. 83–93
5. Владимиров С.Н. Транспортные заторы в условиях мегаполиса // Известия МГТУ. Москва: "МАМИ". 2014. №2(19). С. 77–84
6. Правдин Н.В., Неррей В.Я., Подкопаев В.А. Взаимодействие различных видов транспорта // Москва «Транспорт». 1989. 206 с. URL: <https://elck.ru/393NKM>
7. John C. Sutton. Gridlock: Congested Cities, Contested Policies, Unsustainable Mobility. New York. 2015. 200 p.
8. Малышев А.А., Загородний Н.А. Проблема автомобильных пробок в Российской Федерации // Проблемы научно-практической деятельности. Поиск и выбор инновационных решений. Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "ОМЕГА САЙНС". 2021. С. 31–35
9. TomTom Congestion Index shows that Moscow is the Most Congested City // TomTom, 2013. URL: <https://www.tomtom.com/newsroom/press-releases/general/18331/tomtom-congestion-index-shows-that-moscow-is-the-most-congested-city/>
10. Цыганов В.В., Малыгин И.Г., Еналеев А.К., Савушкин С.А. Большие транспортные системы: теория, методология, разработка и экспертиза. СПб: ИПТ РАН. 2016. 216 с.
11. Newman P.C., Kenworthy J.R. The end of automobile dependence. Washington DC. 2015. 308 p. DOI: 10.5822/978-1-61091-613-4
12. Параскевов А.В. Направления экстенсивного развития транспортной инфраструктуры города // Региональные проблемы преобразования экономики. 2020. №11. С. 42–50. DOI: 10.26726/1812-7096-2020-11-42-50
13. Philippon T. The Great Reversal: How America Gave Up on Free Markets. Belknap Press: An Imprint of Harvard University Press. 2019. 368 p.
14. Бударина Е.В., Кириллова Е.В., Рыкова И.С. Управление транспортным потоком мегаполиса на основе внедрения выделенных полос для общественного транспорта // Экономика. Право. Инновации. 2021. №4. С. 26–34. DOI: 10.17586/2713-1874-2021-4-26-34
15. Савченко-Бельский В.Ю., Мальцева М.В., Маслова А.П. Проблемы и перспективы

развития транспортной системы московской агломерации // Транспортное дело России. 2022. №1. С. 124–127. DOI:10.52375/20728689

16. Jacobs J.I. The Death and Life of Great American Cities. Vintage; Reissue edition. 1992. 458 p.

17. Mishlanova M.Yu. Development trends of the Russian system of national projects // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63. Pp. 1575–1581. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.170

18. TomTom Traffic Index 2017: Mexico City Retains Crown of 'Most Traffic Congested City' in World // TomTom, 2017. URL: <https://www.business-wire.com/news/home/20170220005505/en/TomTom-Traffic-Index-2017-Mexico-City-Retains-Crown-of-%E2%80%98Most-Traffic-Congested-City%E2%80%99-in-World>

19. Лобанов Е.М. Транспортная планировка городов, М.: Транспорт. 1990. 240 с.

20. Daniel Normark Ontologies on collision course: Collaborative mobility v. managerial transport in the contemporary history of intelligent transport systems // The Journal of Transport History. 2022. №43. Pp. 277–295. DOI: 10.1177/00225266221102804

21. Забалуев Е.А., Жукова Н.В. Оптимизация работы светофора как способ устранения автомобильных пробок // Творчество юных. М: Издательство "Знание-М". 2022. С. 35–41

22. Лю Ш., Ли Л., Тан Ц., Ву Ш., Годье Ж.-Л. Разработка беспилотных транспортных средств / науч. ред. В. С. Яценков; пер. с англ. П. М. Бомбаковой. М.: ДМК Пресс. 2021. 242 с.

23. Solving the Mobility Challenge in Megacities // BCG, 2020. URL: <https://www.bcg.com/publications/2020/solving-mobility-challenges-in-megacities>

Информация об авторах

Теслер Кирилл Игоревич, доцент кафедры "Архитектура", кандидат архитектуры. E-mail: tesler.architects@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); Россия, 129337, город Москва, Ярославское ш., д. 26.

Додонова Мария Алексеевна, бакалавр кафедры "Архитектура". E-mail: dodonova02@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); Россия, 129337, город Москва, Ярославское ш., д. 26.

Поступила 18.02.2024 г.

© Теслер К.И., Додонова М.А., 2024

Tesler K.I., *Dodonova M.A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering

**E-mail: dodonova02@mail.ru*

TRENDS IN SOLVING TRANSPORT PROBLEMS IN MEGA CITIES AND THE EVOLUTION OF DESIGN THINKING

Abstract. Congestion in megacities due to extreme population density and insufficient transport infrastructure leads to serious consequences. Traffic jams not only cause inconvenience for passengers, but also have a negative impact on the economy and the environment. In order to stabilize the situation and eliminate the negative impact of inefficient traffic on the life of megacities, it is necessary to review previously used techniques and identify new measures to solve the problem. Research methods include a review and systematization of information sources related to economic, urban planning and social aspects of transport infrastructure. By summarizing and comparing the results of domestic and foreign experience in eliminating traffic congestion, outdated methods were identified and trends in the development of design thinking in the field of construction of road spaces were identified. Current ratings of transport systems make it possible to fix a list of leaders with an effective policy for the development of public transport. Conceptual modeling demonstrates modern features of the placement of road networks within the city. To improve urban mobility, an integrated approach is required: active implementation of innovations in the transport structure, changing urban planning thinking, reviewing management impacts, changing priorities in favor of the needs of pedestrians and informing the public, involving it in the modernization process. These techniques will create modern and smart urban spaces that meet the needs of modern society.

Keywords: transport infrastructure, mobility, urban areas, innovation, metropolis, sustainable urban plans.

REFERENCES

1. Rakhmanov A.B. Four wheels of the apocalypse: the causes of traffic congestion in big cities of the world. [CHetyre kolea apokalipsisa: prichiny avtomobil'nyh probok v krupnyh gorodah mira]. Tomsk State University Journal of History. Philosophy. Sociology. Political science. 2020. No. 58. Pp. 170–188. DOI: 10.17223/1998863X/58/16. (rus)
2. Amin A., Altinoz B., Dogan E. Analyzing the Determinants of Carbon Emissions from Transportation in European Countries: The Role of Renewable Energy and Urbanization. Clean Technologies and Environmental Policy. Vol. 22. No. 8. 2020. Pp. 1725–1734. DOI: 10.1007/s10098-020-01910-2
3. Lashko S.I., Milovanov V.F. Transport problem: analysis, prospects and proposals. [Transportnaya problema: analiz, perspektivy i predlozheniya]. Scientific Bulletin of the Southern Institute of Management. 2018. No. 4(16). Pp. 24–29. DOI: 10.31775/2305-3100-2018-1-24-29. (rus)
4. Malyshev A.A. Impact of traffic jams on the Russian environment. [Vliyanie avtomobil'nyh probok na sostoyanie okruzhayushchej sredy]. Science and education: the future and goals of sustainable development. M.: Moscow University named after S.Yu. Witte. 2020. Pp. 83–93. (rus)
5. Vladimirov S.N. Transport congestion in a megalopolis. [Transportnye zatory v usloviyah megapolisa]. Izvestia MGTU. Moscow: "MAMI". 2014. No. 2(19). Pp. 77–84. (rus)
6. Pravdin N.V., Negrey V.Ya., Podkopaev V.A. Interaction of different modes of transport. Moscow "Transport". 1989. 206 p. URL: <https://clck.ru/393NKM>. (rus)
7. John C. Sutton. Gridlock: Congested Cities, Contested Policies, Unsustainable Mobility. New York. 2015. 200 p.
8. Malyshev A.A., Zagorodniy N.A. The problem of traffic jams in the Russian Federation. [Problema avtomobil'nyh probok v Rossijskoj Federacii]. Problems of scientific and practical activity. Search and selection of innovative solutions. Ufa: Limited Liability Company "OMEGA SCIENCE". 2021. Pp. 31–35. (rus)
9. TomTom Congestion Index shows that Moscow is the Most Congested City. TomTom, 2013. URL: <https://www.tomtom.com/newsroom/press-releases/general/18331/tomtom-congestion-index-shows-that-moscow-is-the-most-congested-city/>
10. Tsyganov V.V., Malygin I.G., Enaleev A.K., Savushkin S.A. Large transport systems: theory, methodology, development and examination. [Bol'shie transportnye sistemy: teoriya, metodologiya, razrabotka i ekspertiza]. St. Petersburg: Institute of Transport Problems named after N.S. Solomenko. Russian Academy of Sciences. 2016. 216 p. (rus)
11. Newman P.C., Kenworthy J.R. The end of automobile dependence. Washington DC. 2015. 308 p. DOI: 10.5822/978-1-61091-613-4. (rus)
12. Paraskevov A.V. Directions of extensive development of the city's transport infrastructure. [Napravleniya ekstensivnogo razvitiya transportnoj infrastruktury goroda]. Regional problems of transforming the economy. 2020. No. 11. Pp. 42–50. DOI: 10.26726/1812-7096-2020-11-42-50. (rus)
13. Philippon T. The Great Reversal: How America Gave Up on Free Markets. Belknap Press: An imprint of Harvard University Press. 2019. 368 p.
14. Budrina E.V., Kirillova E.V., Rykova I.S. Megapolis transport flow management by implementing dedicated bands for public transport. [Upravlenie transportnym potokom megapolisa na osnove vnedreniya vydelennyh polos dlya obshchestvennogo transporta]. Economics. Right. Innovation. 2021. No. 4. Pp. 26–34. DOI: 10.17586/2713-1874-2021-4-26-34. (rus)
15. Savchenko-Belsky V.Yu., Maltseva M.V., Maslova A.P. Problems and prospects of the development of the transport system of the Moscow agglomeration. [Problemy i perspektivy razvitiya transportnoj sistemy moskovskoj aglomeracii]. Transport business of Russia. 2022. No. 1. Pp. 124–127. DOI: 10.52375/20728689. (rus)
16. Jacobs J.I. The Death and Life of Great American Cities. Vintage; Reissue edition. 1992. 458 p.
17. Mishlanova M.Yu. Development trends of the Russian system of national projects. Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63. Pp. 1575–1581. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.170
18. TomTom Traffic Index 2017: Mexico City Retains Crown of 'Most Traffic Congested City' in the World. TomTom, 2017. URL: <https://www.business-wire.com/news/home/20170220005505/en/TomTom-Traffic-Index-2017-Mexico-City-Retains-Crown-of-%E2%80%98Most-Traffic-Congested-City%E2%80%99-in-World>
19. Lobanov E.M. Transport planning of cities. [Transportnaya planirovka gorodov]. M.: Transport. 1990. 240 p. (rus)
20. Daniel Normark Ontologies on collision course: Collaborative mobility v. managerial transport in the contemporary history of intelligent transport systems. The Journal of Transport History. 2022. No. 43. Pp. 277–295. DOI: 10.1177/00225266221102804
21. Zabaluev E.A., Zhukova N.V. Optimization of traffic lights as a way to eliminate traffic jams. [Optimizaciya raboty svetofora kak sposob ustraneniya avtomobil'nyh probok]. Creativity of the Young. M: Publishing house "Knowledge-M". 2022. Pp. 35–41. (rus)

22. Liu S., Li L., Tang J., Wu S., Gaudiot J.-L. Creating Autonomous Vehicle Systems, Second Edition. Springer Nature Switzerland. 2020. 221 p. DOI: 10.1007/978-3-031-01805-3

23. Solving the Mobility Challenge in Megacities. BCG, 2020. URL: <https://www.bcg.com/publications/2020/solving-mobility-challenges-in-megacities>.

Information about the authors

Tesler, Kirill I. PhD, Assistant professor. E-mail: tesler.architects@mail.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU). 129337, Moscow, Yaroslavskoe sh., no. 26.

Dodonova, Maria A. Bachelor student. E-mail: dodonova02@mail.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye sh., 26

Received 18.02.2024

Для цитирования:

Теслер К.И., Додонова М.А. Тенденции решения транспортных проблем в мегаполисах и эволюция проектного мышления // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №4. С. 45–57. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-45-57

For citation:

Tesler K.I., Dodonova M.A. Trends in solving transport problems in mega cities and the evolution of design thinking. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 4. Pp. 45–57. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-45-57

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-58-66

Боброва Е.Г., Малышева С.А.Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет***E-mail: elen-bobrova@mail.ru*

СОЦИАЛЬНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ В ПРЕДПРОЕКТНЫХ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ В КУРСОВОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Аннотация. Формирование современных жилых структур, проектирование новых жилых районов должно учитывать последние результаты социологических исследований, необходимо решать актуальные задачи организации социальных процессов в сложившейся и проектируемой жилой среде. Рассмотрены сформировавшиеся направления и последние публикации по теме социальных исследований в градостроительстве и возможности их внедрения в подготовке студентов архитекторов и градостроителей. Подробнее изучена методика социально-пространственных исследований в рамках когнитивного подхода к урбанистике. Проанализировано возможное развитие методики по основным аспектам социокультурных изменений в обществе и их влиянию на градостроительное проектирование.

Обосновывается необходимость овладения студентами различными методами социально-пространственного анализа, получение навыков оценки социально-пространственной структуры сформировавшихся жилых районов и проектных градостроительных решений. Рассмотрены основные направления изучения студентами-градостроителями методов социально-пространственного анализа.

Представлен пример социально-пространственного анализа жилого района в городе Сыктывкар, проведенного в рамках курса «Предпроектные градостроительные исследования». Социально-пространственный анализ рассматриваемого жилого района помог выявить проблемы данной территории и определить возможные пути их решения. Приведены примеры возможного применения социально-пространственного анализа в курсовом проектировании, в выпускных квалификационных работах бакалавров и магистрантов.

Предложены основные направления применения методики социально-пространственных исследований в обучении студентов градостроителей.

Ключевые слова: предпроектные градостроительные исследования, социально-пространственный анализ, социально-пространственная структура жилых районов, оптимизация планировочной структуры, курсовое проектирование.

Введение. Целью выполнения студентами социально-пространственного анализа в составе предпроектных исследований является ознакомительное изучение методов социально-пространственного анализа, приобретение навыков оценки градостроительных проектных решений по условиям организации социальных процессов, формирование в курсовых проектах планировочных решений жилой застройки и общественных центров с учетом изученных социальных аспектов.

При проектировании городской среды градостроителей интересует прежде всего пространственная организация социальных процессов. Социально-пространственные закономерности определяют, как пространственную организацию городской среды, так и поведение людей. Принципы формирования современных жилых структур и формы их пространственной организации также интересно рассмотреть с точки зрения социологических исследований, проводимых в этой области.

Опираясь на определение, что «устойчивость – это удовлетворение потребностей современности без ущерба для будущих поколений удовлетворять свои потребности» [1], при рассмотрении факторов, влияющих на современное развитие городов, одними из первых должны рассматриваться именно социальные факторы. В научный оборот введено понятие архитектурных социальных наук, в отличие от социальных наук об архитектуре. «Архитектура создается для удовлетворения потребностей людей, эта простая истина, которая открывает гораздо более широкий исследовательский вопрос: как мы можем узнать больше о том, как люди на самом деле взаимодействуют со зданиями?» [2]. Классические методы опроса людей не являются в этом случае наиболее действенными, а, наоборот, имеют много погрешностей и часто только создают целый ряд проблем. Архитектурные социальные науки предлагают широкий спектр методологий, которые позволяют узнать больше о реальном использовании пространства и его важности в повседневной жизни.

Само понятие «идентичности» часто формируется средой, в которой живут люди. В архитектурных социальных науках максимально учитывается сложный набор социальных отношений, рассматривая такие направления как городская антропология, география человека и социология.

Концепция современного урбанизма предполагает в первую очередь формирование комфортных условий для организации всех социальных запросов человека. В научных исследованиях рассматриваются концепции трансекторного планирования и смешанного функционального использования, которые предполагают значительные изменения в существующем зонировании, а, следовательно, и более детальное изучение социального фактора на всех стадиях исследований и проектирования городской среды [3].

В исследованиях, опубликованных в международных журналах [4–6], изучается несколько основных направлений по определению комфортности жизни на урбанизированных территориях. Одно из этих направлений – это создание социально комфортных зеленых зон и общественных пространств, а также формирование в целом безопасной и способствующей развитию социального взаимодействия городской среды. Другое направление ориентировано на формирование тех же качеств в архитектурно-пространственных решениях самой застройки, создание благоприятных условий для информационно насыщенных и безопасных досуга, общения и других форм социального взаимодействия [7].

«Для реформирования и реконструирования сложившейся ситуации важно обратить внимание на международный опыт реанимационной деятельности в рамках общественных городских пространств, которые базируется, прежде всего, на понимании необходимости применения комплексного и системного подходов, благодаря которым формируется не разрозненная, а целостная комплексная сеть общественных городских пространств с развитой инфраструктурой» [8].

В социологических исследованиях описываются свойственные современным жителям мегаполисов такие явления, как: «апатия наблюдающих», «групповое игнорирование», «затруднение идентификации», возникновение которых основано на противоречии между реально существующими социально-территориальными связями и проектируемыми пространственными структурами [9]. Комфортные связи, определяющие пространственные характеристики планировки и застройки, основаны на соблюдении параметров геометрии социальных связей, изучаемых специальной областью социальных исследований – «проксемикой» [10]. Графоаналитиче-

ские исследования жилых структур [11] в исторических, естественно сформировавшихся структурах и в среде, искусственно спроектированной, показали соответствие пространственных характеристик сложившимся социально-территориальным связям в первом случае и противоречие между ними во втором. На уровне жилого района, микрорайона, квартала социальное содержание градостроительного проекта определяется характером условий проживания, обслуживания, отдыха [12].

Современные социологические исследования выявили несоответствие между проектной организацией жилой застройки и реально существующими социально-территориальными связями. Дифференциация социально-пространственных комплексов и социально-территориальных связей может быть учтена не только в методике анализа сложившейся территории, но и в проектном решении зон социальной активности.

Значимость теоретического и практического овладения студентами методиками социальных исследований в градостроительном проектировании подчеркивается в статье Е.А. Ахмедовой, где поднимаются проблемы и преподавания, и исследования происходящих изменений современных инновационных стратегий в архитектурно-градостроительном комплексе в магистерской подготовке архитекторов и градостроителей. «Постановка задачи заключается в том, что в совместных научных исследованиях студентов и преподавателей осуществляется проектирование и исследование проблемных ситуаций на основе новых методологических подходов к комплексным исследованиям региональной градостроительной среды и концепции ее устойчивого развития.» [13].

Основная часть. Одно из последних по времени значимых исследований в области социальных исследований в урбанистике – монография А.В. Крашенинникова «Когнитивные модели городской среды: учебное пособие», которая уже получила высокую оценку в публикациях [14], как целостное и методологически выверенное исследование, необходимое как для ученых и проектировщиков в их предпроектном моделировании, так и для педагогов как рекомендуемое к использованию учебное пособие. В учебном процессе в рамках предпроектных исследований в обучении студентов архитекторов и градостроителей предлагается детально разработанная методика, позволяющая упорядочить изложение материала о городской среде и воспользоваться предложенной автором матрицей для выстраивания соответствующих исследований в учебном процессе.

«Становление урбанистики как самостоятельной дисциплины продолжается, о чём свидетельствует, в частности, рождение новых её версий с соответствующими производными наименованиями. «Когнитивная урбанистика» – одно из них» [14]. Когнитивный подход в урбанистике объясняется как формирование городской среды на основе восприятия, поведения, узнавания и запоминания людьми. Город описывается как городское, архитектурное, физическое и социальное, географическое пространство, его базовыми элементами выступают «средовые комплексы» – «условно выделенные участки территории, в которых локализируются определённые сценарии социальной жизни» [15]. Упоминаются сто семь участков городской среды в России и в зарубежных странах, исследование которых «позволило утвердиться в межкультурном значении и универсальности базовых и производных моделей мезопространств и обосновывает необходимость итогового выхода на формирование «локальных градостроительных рекомендаций» (схем пешеходных пространств, габаритных схем кварталов, схем комплексной оценки качества среды в градопроектах)» [15].

В рамках курса «Предпроектные градостроительные исследования» социально-пространственный анализ проводился студентами-бакалаврами по методике А.В. Крашенинникова [15-18]. Социально-пространственный анализ жилой застройки включает три стадии: выявление источников социального контроля на территории, дифференциация территории на социально-пространственные комплексы, предложения по оптимизации жилой среды.

Границы территории исследования, обеспечивающие целостный характер исследования, устанавливались студентами на предварительной стадии проведения работ с определением необходимой и достаточной для целей исследования территории рассмотрения. Натурное обследование и фотофиксация проводились в границах рассматриваемой территории. При натурном обследовании производилась фиксация тех элементов социально-пространственной структуры, которые были определены как наиболее значимые. В результате натурного обследования была уточнена и нанесена на топографический план граница рассматриваемой территории. Фотофиксации подлежат основные элементы социально-пространственной структуры по типологическим признакам. Объем и характер работ в каждом случае определялся в зависимости от конкретной градостроительной ситуации. Точки фотосъемки наносились на топографический план, результат оформлялся в виде схемы фотофиксации.

По итогам проведенного исследования и уточнения по материалам натурного обследования и фотофиксации студентом в рамках учебной работы выполнялась «Схема оптимизации жилой среды по результатам социально-пространственного анализа».

Расчет коэффициентов освоенности, содержательности и комфортности жилой среды не является обязательным и выполнялся студентом по желанию.

Рассмотрим пример анализа социально-пространственного каркаса в курсовом проектировании по дисциплине «Предпроектные градостроительные исследования», проведенного студенткой 3 курса кафедры градостроительства архитектурного факультета.

Для анализа была выбрана территория в центральном районе города Сыктывкар, Республика Коми [19, 20]. Участок относится к «спальному» району города с уже сформировавшейся разновременной и неоднородной средой. Последние десять лет территория активно преобразовывалась, происходила точечная интеграция современной многоэтажной застройки в сложившийся малозэтажный жилой район советского периода.

Социально-пространственный анализ рассматриваемого жилого района помог выявить проблемы данной территории и определить возможные пути их решения. В первую очередь были выявлены все объекты социальной инфраструктуры, основные точки притяжения (парки, скверы), ориентация подъездов жилых домов с зонами их влияния, определены основные пешеходные маршруты. На данном этапе был сделан вывод, что многие транзитные пешеходные направления проходят через дворовые территории, что приводит к появлению проходных дворов.

Далее территория дифференцировалась на мезопространства по условиям зрительного восприятия отдельных фрагментов городской среды (рис. 1). Каждое из мезопространств имеет ядро, определенную функцию и размеры. Количество и разнообразие функций мезопространств напрямую указывают на содержательность и комфортность среды.

Этот этап анализа позволил выявить как достаточно эффективное использование территории вокруг жилых домов, высокую степень благоустройства основных пешеходных маршрутов, так и значительное несоответствие заявленной функции мезопространства и реально сложившегося использования. Пересечение зон влияния основных источников разных типов социального контроля приводит к образованию конфликтных

участков. В основном, такие участки образовались рядом с жилыми домами и объектами социальной инфраструктуры квартала.

Завершающим этапом анализа являлась оценка качества среды с предложением проекта реновации территории. Оценка качества среды проводилась по результатам выявления ключевых, конфликтных и пустующих участков. Был

сделан вывод о недостаточно удачном формировании территории. Ключевые участки, находящиеся на узлах пешеходных маршрутов, сформированы и благоустроены только на уличных территориях, на дворовых территориях ключевые участки остаются не сформированы.

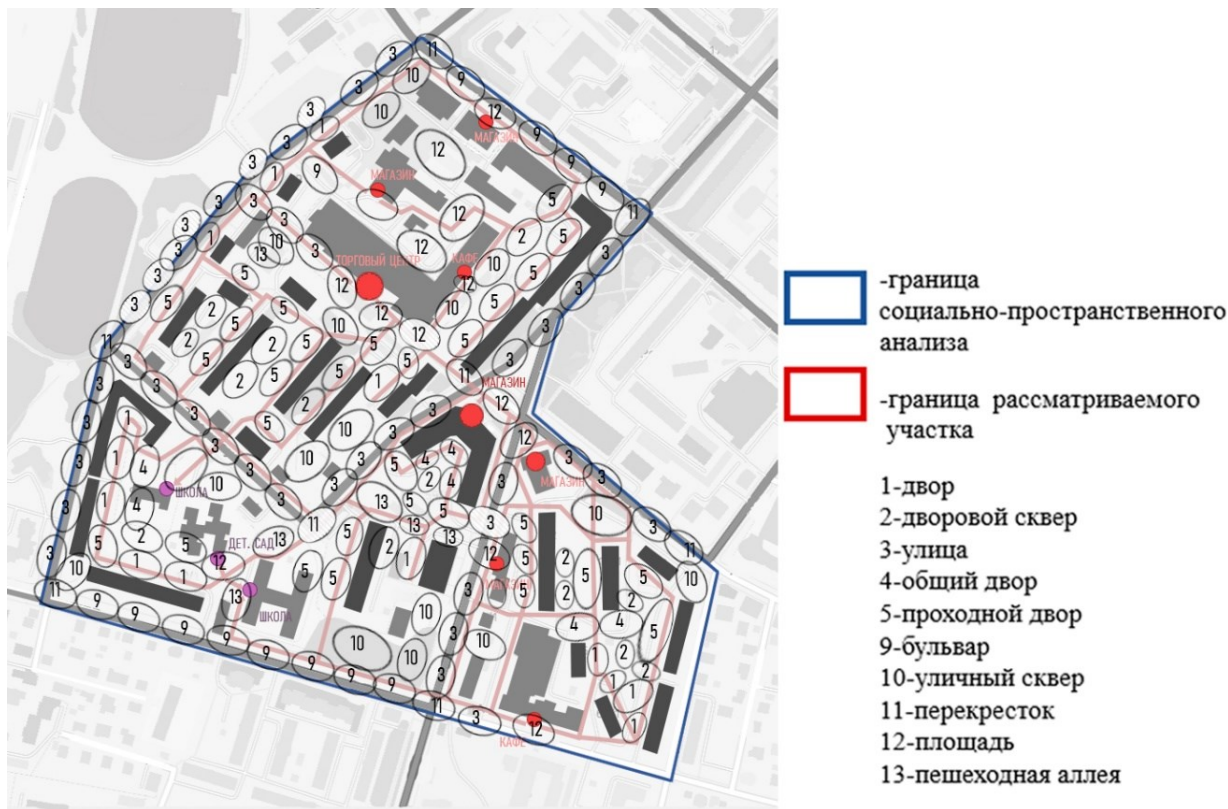


Рис. 1. Схема социально-пространственного анализа: дифференциация территории на мезопространства

Выявлено преобладание конфликтных участков, которое обусловлено большим количеством проходных дворов. Пустующие участки — неэффективно используемые или совсем неиспользуемые — были выявлены на территории дворов застройки советского периода.

По результатам проведенного анализа была предложена схема оптимизации жилой среды (рис. 2). Основными инструментами решения проблем социально-пространственной организации рассматриваемой территории стали: изменение трасс пешеходного движения и их благоустройство, предложение по строительству малоэтажных пристроенных зданий, организация новых зеленых зон, а также создание дворов, закрытых от улиц и транзитных пешеходных путей. Зоны влияния объектов социальной инфраструктуры, таким образом, становятся изолированными от зон жилых дворов. Благоустроенные трассы пешеходного движения проходят вдоль жилых дворов, не пересекая их. Уменьшается количество конфликтных и пустующих участков.

Большинство из них предложено включить в систему дворовых территорий.

Подобная реорганизация планировочной структуры жилого района позволит повысить уровень комфортности проживания на его территории, создаст возможность для развития функционального наполнения социальной инфраструктуры района, поможет успешнее интегрировать новую жилую застройку в уже сложившуюся среду.

Полученные навыки выполнения социально-пространственного анализа были успешно использованы студенткой при выполнении курсовой работы — в проекте жилого квартала. В проводимых предпроектных исследованиях для рассматриваемого участка проектирования в городе Выборг вместе с обязательными и обычно выполняемыми исследованиями (нормативно-правовой, историко-культурный, ландшафтно-композиционный анализы) ею был проведен социально-пространственный анализ существующей

планировки и застройки, который позволил уточнить задачи проектной организации территории.

Кроме того, студентами-градостроителями 5 курса на стадии эскизного проекта жилого района также проводился анализ формируемой социально-пространственной структуры предложенных ими градостроительных решений. Эта предварительная оценка своих планировочных пред-

ложений по организации социальной инфраструктуры, формированию изолированных дворовых пространств и сценарному решению пешеходных транзитных направлений позволила выявить отдельные негативные стороны проектных решений и учесть все необходимые изменения в окончательном проекте жилого района в выпускной квалификационной работе.

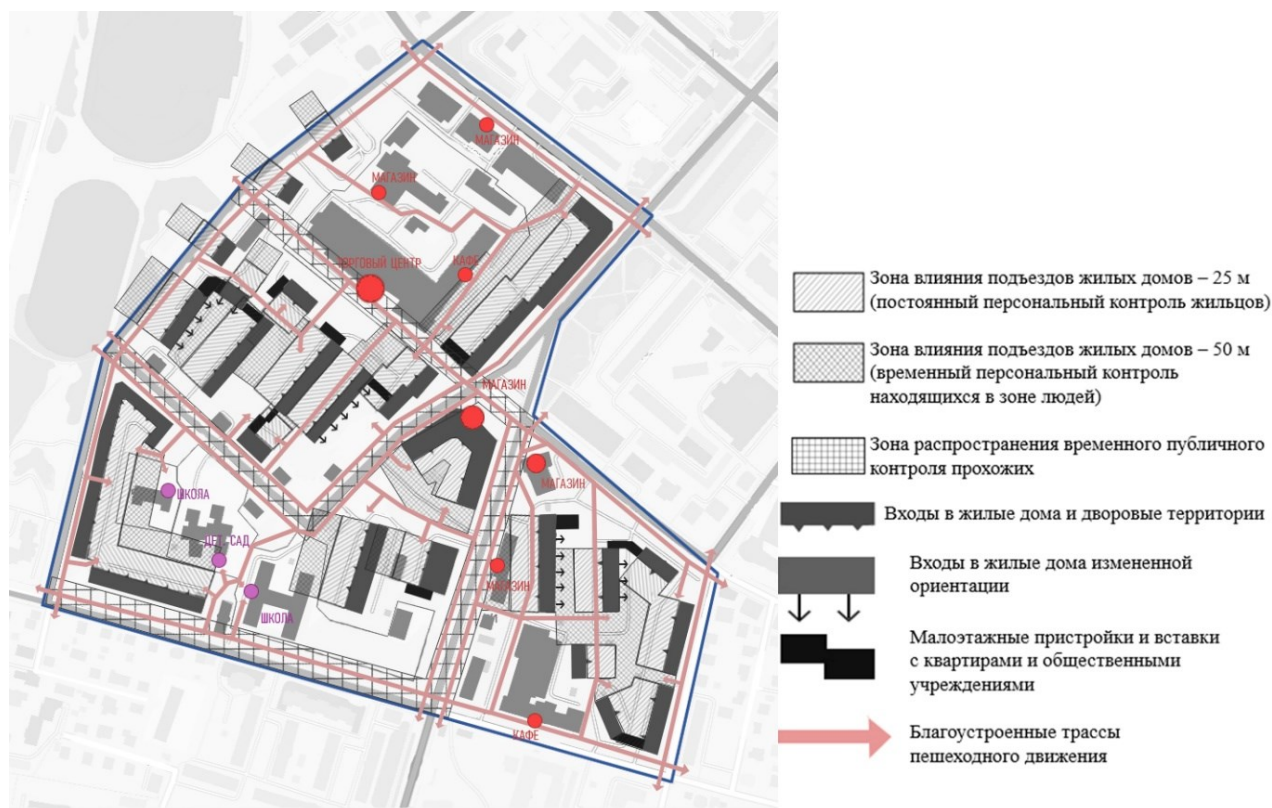


Рис. 2. Схема оценки качества среды и предложений по реновации территории

Для студентов, обучающихся по программе магистратуры, базовая методика проведения социально-пространственного анализа [15–18] дополняется по двум основным направлениям.

На стадии предварительной подготовки к проведению предпроектного анализа им ставится задача самостоятельного изучения других современных направлений социальных исследований в градостроительстве, а также поиск и выбор исследований, наиболее значимых для выбранных ими территорий проектирования и тематических направлений выпускных квалификационных работ. Предлагается провести одновременное комплексное рассмотрение по двум-трем типам градостроительного анализа. Например, интересным и неоднозначным оказалось сопоставление результатов социально-пространственного анализа и таких направлений предпроектных исследований как анализ градостроительных мотиваций или анализ градостроительных конфликтов.

Второе направление, предлагаемое студентам-магистрантам – это изучение возможностей

проведения социально-пространственного анализа с привлечением ГИС-технологий. В рамках предпроектных градостроительных исследований студенты успешно применяют наиболее подходящие для их территорий и тем исследования программы и показывают перспективность их дальнейшего применения как в учебном процессе, так и в своей будущей проектной деятельности.

Направление дальнейшего развития методики социально-пространственного анализа в предпроектных исследованиях определяют значительные изменения в самих социальных процессах в современном обществе. Например, это такие изменения в социальном поведении как рост значимости досуга, погружение в онлайн коммуникации и изменение характера потребления. Исследователями отмечается [21] важность рассмотрения проекции этих ценностных сдвигов на формирование городских пространств: при выборе места жительства предпочтение отдается удобству его расположения относительно

мест развлечений, а не мест работы; формирование локальных сообществ не привязано к привычному понятию «соседства»; приоритет ценностей пользования вместо ценностей владения значительно переформирует среду проживания и приводит к реконфигурации социальных пространств. Все эти направления могут и должны стать предметом изучения и прогнозного проектирования в студенческих бакалаврских и магистрантских курсовых работах.

Выводы.

Современная высокая оценка безусловного влияния социальных процессов на градостроительное проектирование в целом, а также на формирование жилой среды и общественных центров позволяет определить значимость получения студентами соответствующих компетенций. Изучение предложенной методики исследования когнитивных моделей городской среды обеспечивает преподавателя высшей школы необходимым инструментом обучения студентов методам исследования социальных процессов и дальнейшего прогнозирования их влияния на формирование городской среды.

Рассмотренные примеры проведения социально-пространственного анализа в реальном курсовом проектировании показывают возможность использования методик как на стадии анализа исследуемых сформировавшихся городских районов, так и на стадии разработки проектных моделей в курсовом проектировании. Кроме того, в предпроектных исследованиях в выпускных квалификационных работах студентам предлагается использовать полученные навыки по различным видам градостроительного анализа комплексно, с выявлением потенциально дополняющих направлений развития территории и конфликтных аспектов, требующих поиска компромиссных проектных решений, а также продолжать научные разработки в области прикладных социальных исследований и апробировать их результаты в своих проектных работах.

Практическая значимость проведенных исследований состоит в возможности, опираясь на их результаты, формировать и развивать учебную дисциплину «Проектирование и исследование в градостроительстве», решать проблемы подготовки студентов архитекторов и градостроителей в области получения навыков исследования происходящих изменений в современных социальных процессах и их влияния на формирование городской среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sustainable Development in the 21st century (SD21). Режим доступа: URL: Sustainable Development in the 21st century (SD21): Sustainable Development Knowledge Platform (un.org) (дата обращения 02.02.2024)
2. Groat L.N., Wang D. Architectural Research Methods. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. 480 p.
3. Сейтхамзина Г.Ж., Бекенова Л.М., Ахатова Э.Х. Принципы и концепции современного урбанизма // Статистика, учет и аудит. 2021. №3(82). С. 72–78. DOI: 10.51579/1563-2415.2021-3.06
4. Mouratidis K. Urban planning and quality of life: A review of pathways linking the built environment to subjective well-being // Cities. 2021. Vol. 115. Pp. 103–229. DOI:10.1016/j.cities.2021.103229
5. Pineo H. Towards healthy urbanism: inclusive, equitable and sustainable (THRIVES) – an urban design and planning framework from theory to praxis // Cities & Health. 2020. DOI:10.1080/23748834.2020.1769527.
6. Pfeiffer D., Cloutier S. Planning for Happy Neighborhoods // Journal of the American Planning Association. 2016. Pp. 267–279. DOI: 10.1080/01944363.2016.1166347.
7. Громилина Э.А. Аспекты преемственного развития архитектурно-планировочной структуры города // Урбанистика и архитектура. 2021. Т. 11. №3 (44). С. 117–123. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.03.16
8. Адышкина К.В., Корягина А.И. Общественные пространства в дальневосточных приморских регионах: проблемы и перспективы развития // Оригинальные исследования. 2022. Т.12. №6. С. 68–74.
9. Аракелян Р.Г. Выявление требований к гуманной жилой среде. Режим доступа: URL: <https://marhi.ru/AMIT/2011/2kvart11/arakelyan/arakelyan.pdf> (дата обращения 10.02.2024)
10. Крейдлин Г.Е. Невербальная семиотика: Язык тела и естественный язык. М.: Новое лит. обозрение, 2002. 457 с.
11. Сосновский В.А., Русакова Н.С. Прикладные методы градостроительных исследований // Учеб. пособие. М.: «Архитектура-С», 2006. 112 с.
12. Яргина З.Н., Хачатрянц К.К. Социальные основы архитектурного проектирования: учеб. для архитектур. Вузов. М.: Стройиздат, 1990. 343 с.
13. Ахмедова Е.А. Инновационные стратегии в архитектурно-градостроительном комплексе // Традиции и инновации в архитектуре. Архитектура и градостроительство. 2021. С. 172–182.
14. Кияненко К.В. Рецензия на монографию Крашенинникова Алексея Валентиновича «Когнитивная урбанистика: архетипы и прототипы городской среды» // Архитектура и современные

информационные технологии. 2021. №1(54). С. 15–20. DOI: 10.24412/1998-4839-2021-1-15-20 (1)

15. Крашенинников А.В. Когнитивные модели городской среды: учебное пособие. Москва: Курс, 2020. 210 с.

16. Крашенинников А.В. Жилые кварталы: учеб. пособие // под общ. ред. Н.Н. Миловидова, Б.Я. Орловского, А.Н. Белкина. М.: Высшая школа, 1988. 87 с.

17. Крашенинников А.В., Перькова М.В. Градостроительные перспективы // Архитектура и строительство России. 2022. № 3(243). С. 4–7.

18. Крашенинников А.В. Социально-пространственный аспект формирования жилой

среды города. Москва: Моск. Арх. Институт, 1985. 24 с.

19. Обедков А.П., Федосов Л.С. Градостроительство, архитектура и зодчие Сыктывкара. Сыктывкар. 1999. 54 с.

20. Обедков А.П. Сыктывкар от центра до окраин. Социально-экономический атлас. Сыктывкар: Изд-во «Пролог», 1996. 128 с.

21. Вендина О. Городское планирование и городская самоорганизация: трансформация пространственных ориентиров развития Москвы // Городские исследования и практики. 2022. Т.7, №4. С. 29–53. DOI: 10.17323/usp74202229-53

Информация об авторах

Боброва Елена Геннадьевна, доцент кафедры градостроительства. E-mail: elen-bobrova@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4.

Малышева Софья Алексеевна, бакалавр кафедры градостроительства. E-mail: sophiemalysheva00@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4.

Поступила 17.02.2024 г.

© Боброва Е.Г., Малышева С.А., 2024

***Bobrova E.G., Malysheva S.A.**

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: elen-bobrova@mail.ru

SOCIO-SPATIAL ANALYSIS IN PRE-DESIGN URBAN PLANNING RESEARCH IN COURSE DESIGN

Abstract. *The formation of modern residential structures and the design of new residential areas must take into account the latest results of sociological research; it is necessary to solve current issues of organizing social processes in the existing and designed residential environment. The developed directions and latest publications on the subject of social research in urban planning and the possibilities of their implementation in the training of students of architects and urban planners are considered. The methodology of socio-spatial research within the framework of the cognitive approach to urbanism has been studied in more detail. The possible development of the methodology is analyzed on the main aspects of sociocultural changes in society and their impact on urban planning. The need for students to master various methods of socio-spatial analysis, to obtain skills in assessing the socio-spatial structure of established residential areas and urban planning solutions is substantiated. The main directions of studying methods of socio-spatial analysis by urban planning students are considered. An example of a socio-spatial analysis of a residential area in the city of Syktyvkar, carried out as part of the course “Pre-design urban planning research”, is presented. A socio-spatial analysis of the residential area under consideration helped to identify the problems of this territory and identify possible ways to solve them. Examples are given of the possible use of socio-spatial analysis in course design, in final qualifying works of bachelors and masters. The main directions for applying the methodology of socio-spatial research in teaching urban planning students are proposed.*

Keywords: *pre-project urban planning studies, socio-spatial analysis, socio-spatial structure of residential areas, optimization of planning structure, course design.*

REFERENCES

1. Sustainable Development in the 21st century (SD21). Access mode: URL: Sustainable Develop-

ment in the 21st century (SD21). Sustainable Development Knowledge Platform (un.org) (date of treatment: 02.02.2024).

2. Groat L.N., Wang D. Architectural Research Methods. John Wiley & Sons. New Jersey, 2013. 480 p.

3. Seithamzina G.Zh., Bekenova L.M., Akhatova E.Kh., Principles and concepts of modern urbanism [Principy i koncepcii sovremennogo urbanizma]. Statistika, uchet i audit. 2021. No. 3(82). Pp. 72–78. DOI: 10.51579/1563-2415.2021-3.06 (rus)
4. Mouratidis K. Urban planning and quality of life: A review of pathways linking the built environment to subjective well-being. Cities. 2021. Vol. 115. Pp. 103–229. DOI:10.1016/j.cities.2021.103229
5. Pineo H. Towards healthy urbanism: inclusive, equitable and sustainable (THRIVES) – an urban design and planning framework from theory to praxis. Cities & Health. 2020. DOI: 10.1080/23748834.2020.1769527.
6. Pfeiffer D., Cloutier S. Planning for Happy Neighborhoods. Journal of the American Planning Association. 2016. Pp. 267–279. DOI: 10.1080/01944363.2016.1166347.
7. Gromilina E.A. Aspects of the successive development of the architectural and planning structure of the city [Aspekty preemstvennogo razvitiya arhitekturno-planirovochnoj struktury goroda]. Urbanistika i arhitektura. 2021. Vol.11. No. 3(44). Pp. 117–123. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.03.16. (rus)
8. Adyshkina K.V., Koryagina A.I. Public spaces in the Far Eastern coastal regions: problems and development prospects [Obshchestvennye prostranstva v dal'nevostochnyh primorskih regionah: problemy i perspektivy razvitiya]. Original'nye issledovaniya. 2022. Vol. 12. No. 6. Pp. 68–74. (rus)
9. Arakelyan R.G. Identifying requirements for a humane living environment [Vyyavlenie trebovanij k gumannoj zhiloi srede]. Access mode: URL: <https://marhi.ru/AMIT/2011/2kvart11/arakelyan/arakelyan.pdf> (date of treatment: 10.02.2024). (rus)
10. Kreidlin G.E. Nonverbal semiotics: Body language and natural language [Neverbal'naya semiotika: Yazyk tela i estestvennyj yazyk]. Moscow: New lit. review, 2002. 457 p. (rus)
11. Sosnovsky V.A., Rusakova N.S. Applied methods of urban planning research [Prikladnye metody gradostroitel'nyh issledovanij]. Textbook allowance. Moscow: "Architecture-S", 2006. 112 p. (rus)
12. Yargina Z.N., Khachatryants K.K. Social foundations of architectural design, textbook for architectures Universities. [Social'nye osnovy arhitekturnogo proektirovaniya: uchebnik dlya arhitekturnyh Vuzov]. Moscow: Stroyizdat, 1990. 343 p. (rus)
13. Akhmedova E.A. Innovative strategies in the architectural and urban planning complex [Innovacionnye strategii v arhitekturno-gradostroitel'nom komplekse]. Tradicii i innovacii v arhitekture. Arhitektura i gradostroitel'stvo. 2021. Pp. 172–182. (rus)
14. Kiyanenko K.V. Review of the monograph by Alexey Valentinovich Krasheninnikov "Cognitive urbanism: archetypes and prototypes of the urban environment" [Recenziya na monografiyu Krasheninnikova Alekseya Valentinovicha «Kognitivnaya urbanistika: arhetipy i prototipy gorodskoj sredy»]. Arhitektura i sovremennye informacionnye tekhnologii. 2021. No. 1(54). Pp. 15–20. DOI: 10.24412/1998-4839-2021-1-15-20 (1) (rus)
15. Krasheninnikov A.V. Cognitive models of the urban environment: a textbook. [Kognitivnye modeli gorodskoj sredy: uchebnoe posobie]. Moscow: Course, 2020. 210 p. (rus)
16. Krasheninnikov A.V. Residential areas: textbook. [Zhilye kvartaly: ucheb. posobie]. Under general ed. N.N. Milovidova, B.Ya. Orlovsky, A.N. Belkina. Moscow: Higher School, 1988. 87 p. (rus)
17. Krasheninnikov A.V., Perkova M.V. Urban planning prospects [Gradostroitel'nye perspektivy]. Arhitektura i stroitel'stvo Rossii. 2022. No. 3(243). Pp. 4–7. (rus)
18. Krasheninnikov A.V. Socio-spatial aspect of the formation of the city's residential environment. [Social'no-prostranstvennyj aspekt formirovaniya zhiloi sredy goroda]. Moscow: Moscow Architecture Institute, 1985. 24 p. (rus)
19. Obedkov A.P., Fedosov L.S. Urban planning, architecture and architects of Syktyvkar. [Gradostroitel'stvo, arhitektura i zodchie Syktyvkara]. Syktyvkar, 1999. 54 p. (rus)
20. Obedkov A.P. Syktyvkar from the center to the outskirts. Socio-economic atlas. [Syktyvkar ot centra do okrain. Social'no-ekonomicheskij atlas]. Syktyvkar: Prolog Publishing House, 1996. 128 p. (rus)
21. Vendina O. Urban planning and urban self-organization: transformation of spatial guidelines for the development of Moscow [Gorodskoe planirovanie i gorodskaya samoorganizaciya: transformaciya prostranstvennyh orientirov razvitiya Moskvy]. Gorodskie issledovaniya i praktiki. 2022. Vol. 4. Pp. 29–53. DOI: 10.17323/usp74202229-53. (rus)

Information about the author

Bobrova, Elena G., PhD, Assistant professor. E-mail: elen-bobrova@mail.ru. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 4.

Malysheva, Sofya A., Bachelor student. E-mail: sphiemalysheva00@mail.ru. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 4.

Received 17.02.2024

Для цитирования:

Боброва Е.Г., Малышева С.А. Социально-пространственный анализ в предпроектных градостроительных исследованиях в курсовом проектировании // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №4. С. 58–66. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-58-66

For citation:

Bobrova E.G., Malysheva S.A. Socio-spatial analysis in pre-design urban planning research in course design. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 4. Pp. 58–66. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-58-66

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-67-78

Ладик Е.И., Син Ж.Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого***E-mail: krushelnitskaya1@rambler.ru*

ОРГАНИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРНОЙ СРЕДЫ ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО РЕЛЬЕФА (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ЧУНЦИН, КИТАЙ)

Аннотация. Сложный рельеф отличает расположение городских маршрутов, функционально-пространственную структуру и планировку общественных зон от проектирования городской среды на равнинной местности. В данном исследовании рассмотрены вопросы рационального использования городских территорий в условиях сложного рельефа на примере территории крупнейшего города Чунцин, расположенного в центральной части Китая. Исследование основывается на комплексном подходе, методах градостроительного анализа и функционально-пространственного моделирования. Проанализированы различные аспекты трансформации сложных природных ландшафтов для расширения общественных городских пространств и формирования их идентичности на примере общественных пространств в структуре высокоплотной жилой застройки г. Чунцин. В ходе исследования выделены характерные проблемы планировочной организации общественных зон на сложном рельефе (недостаточная инсоляция, дефицит зеленых зон, ненормативное расположение транспортной инфраструктуры, нерациональная организация пешеходного движения, отсутствие доступа населения к общественным зонам, замкнутость и несвязность общественных пространств между собой и др.). Предложены функционально-планировочные модели организации общественных рекреационных пространств, перспективные для применения как в районах сложившейся высокоплотной застройки, так и для освоения незастроенных территорий в горных районах Китая. Определены перспективные направления развития общественных пространств жилого квартала Байсянцзюй в г. Чунцин.

Ключевые слова: горный ландшафт, сложный рельеф, общественные пространства, городская рекреация, ландшафтная архитектура.

Введение. При формировании городского общественного пространства основным потребителем является городское население. На сложность и разнообразие общественных пространств влияют потребности населения и особенности природного каркаса территории. Освоение территорий со значительными горизонтальными и вертикальными членениями, крутыми склонами приводит к увеличению затрат на строительство и эксплуатацию. В таких ситуациях использование методов пространственного планирования без учета региональных особенностей ландшафта местности не может обеспечить формирование комфортной городской среды, а также приводит к необоснованному увеличению экономических затрат и ухудшению городского облика. Однако, горные районы, имеющие сложный рельеф с большими перепадами высот, помимо трудностей освоения, интересны и своим высоким эстетическим пейзажным потенциалом [1]. В условиях строительства, ограниченных высокоплотной застройкой и природными планировочными ограничениями, необходимо рационально использовать вертикальное пространственное зонирование, создаваемое естественным ландшафтом. Решение актуальных вопросов обустройства общественных пространств в горных районах требует от специалистов в сфере архитектуры и

градостроительства разработки эффективных методов вертикального развития городской инфраструктуры с использованием рациональных функционально-планировочных моделей.

Вопросы развития урбанизированных территорий в условиях сложного рельефа рассматривали в своих исследованиях В.Р. Крогиус [2], В.С. Теодоронский, А.П. Вергунов В.А. Горохов, С.Х. Баймуратова [3], Е.И. Ладик. Связи градостроительной и эстетической основы с образом естественного ландшафта отражены в работах А.П. Верегунова, В.А. Нефедова, Н.Я. Крижановкой, И.О. Боговой, Л.М. Фурсовой, Е.А. Лапшиной. Вопросы формирования общественных пространств и их идентичности раскрыты в работах зарубежных ученых К. Линча [4] и Я. Гейла [5]. Формирование городских общественных пространств на сложном рельефе изучено в работах китайских исследователей Хань Цзина, Чжу Вэнья и раскрывает морфологические характеристики китайских городов.

Зарубежных исследований, касающихся планировки элементов общественных пространств в горных городах немного. В настоящее время теоретические исследования, касающиеся формирования общественных пространств развиваются и совершенствуются, а их области охватывают различные сферы знаний, такие как

социология, экология, градостроительство и ландшафтный дизайн. Однако вопросы перспектив развития общественных пространств крупных городов относительно горных ландшафтов в настоящее время остаются малоизученными. В то же время в Китае основные направления исследований сосредоточены на решении вопросов организации транспортно-пешеходной инфраструктуры на территориях с большим перепадом высот, а социальному взаимодействию населения и общественного городского пространства уделяется недостаточно внимания. Таким образом поиск рациональных моделей социализации неиспользуемых деградирующих городских территорий и формирование комфортной городской среды в условиях сложного рельефа является одним из наиболее перспективных направлений архитектурно-градостроительных исследований для горных городов Китая.

В этой связи целью данного исследования является разработка функционально-планировочных моделей организации общественных пространств в условиях сложного рельефа на примере г. Чунцин.

Задачи исследования:

- выявление региональных особенностей влияния природного ландшафта на развитие планировочной структуры городских общественных пространств;
- выявление проблем развития общественных пространств в условиях сложного рельефа г. Чунцин;
- разработка функционально-планировочных моделей организации общественных пространств в условиях сложного рельефа на примере г. Чунцин.

Материалы и методы исследования. Исследование опирается на методы комплексного анализа. В ходе исследования были проанализированы литературные источники, проектный опыт и нормативная документация Китая, планировочная структура и экологический каркас территорий г. Чунцин, проводились натурные обследования местности и фотофиксация, использовались методы сравнительного анализа. Применялись методы проблемного анализа, функционально-пространственного моделирования в контексте сложного рельефа горных городов, посредством исследования моделей общественных пространств в Чунцине.

Основная часть. В настоящее время, когда темпы урбанизации продолжают ускоряться на первый план выходят вопросы рационального использования городских территорий. Особенную актуальность эффективное использование территорий приобретает для крупных и крупнейших

городов Юго-Восточной Азии. Для перспективного развития в структуре высокоплотной городской застройки рассматриваются территории, прежде определявшиеся как «неудобные». К «неудобным» относятся, в частности, территории со сложным рельефом, горные и овражно-балочные ландшафты. Изучение развития общественных пространств в горных городах со сложным рельефом является проблемой, которую нельзя игнорировать в процессе урбанизации. В отличие от равнинных городов, городские пространства в структуре горных ландшафтов создают сложные и изменчивые планировочные структуры, что делает их визуально богаче, но также сопровождается проявлением характерных проблем использования городского пространства. Городское пространство в горных районах сложное, замкнутое, прерывистое и непроницаемое. В частности, при строительстве горных городов из-за ряда факторов, таких как ландшафтные ограничения, небольшая площадь земель, пригодных для застройки, большой спрос на строительство и применение неадаптированных к региональным условиям методов развития общественных пространств, комфортность общественных и рекреационных территорий весьма ограничена [1,2].

Рассмотрим проблемы формирования архитектурной среды общественных пространств на сложном рельефе на примере локальной территории жилой застройки в центральной части г. Чунцин. Город Чунцин (Chóngqìng) находится в прямом подчинении центрального правительства Китая, расположен в юго-западной части страны, имеет обширную территорию, более половины которой занимает горный ландшафт. Чунцин – город со сложным рельефом, располагается в Сычуаньской впадине и горах Улиншань и окружён тремя горными массивами: Дабашань – на севере, Ушань – на востоке и Далушань – на юге. Чунцин так же называют «горным городом» (Шаньчэн) (рис. 1). Чунцин является крупнейшей по площади из четырёх китайских административных единиц этой категории и включает в себя городскую агломерацию с прилегающими к ней территориями, здесь проживает более 32,05 млн. человек. Ввиду высокой плотности населения города, застройка в основном представлена многоэтажными и высотными зданиями [6].

Главной проблемой городского планирования в Чунцине является окружающая горная местность, вкуче с высотными зданиями и значительными перепадами высот развивается проблема связи между общественными пространствами, формируются замкнутые непроницаемые пространства, что негативно влияет на комфортность городской среды и их доступность для населения.

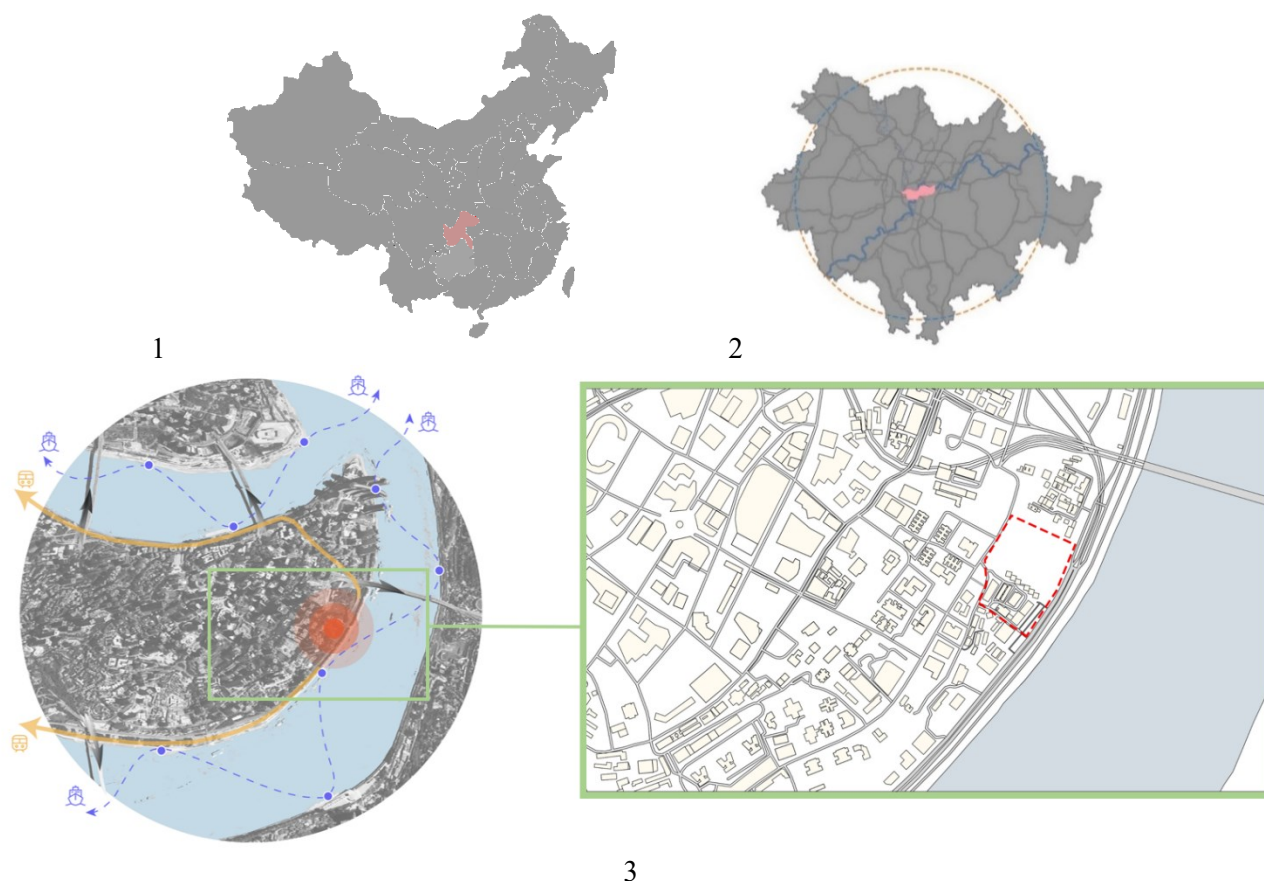


Рис. 1. Расположение анализируемой территории:

1. Расположение г. Чунцин в Китае; 2 – Расположение центрального района в г. Чунцин;
3 – расположение анализируемой жилой зоны в центральной части г. Чунцин

Проанализируем градостроительные проблемы формирования общественных пространств на примере территорий жилой застройки в центральной части города Чунцин. Центральная часть города представлена преимущественно высотной застройкой. Рельеф понижается с севера на юг. Малоэтажная застройка в основном распространена в низменных уровнях вблизи реки Янцзы. Общее распределение высот зданий имеет тенденцию к увеличению с востока на запад.

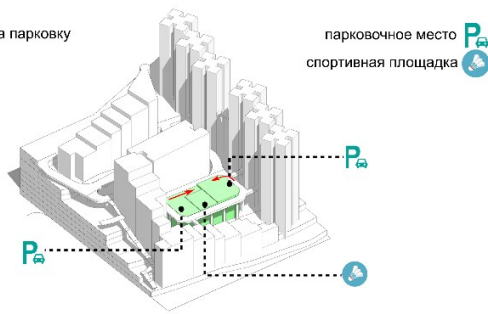
Анализируемый жилой квартал Байсянцзюй расположен на южной стороне полуострова Юйчжун, обращенной к реке Янцзы (рис.1). Рельеф имеет высокие отметки на севере и понижается на юге [7]. Жилой квартал Байсянцзюй был построен в 1990-х гг. и сформирован многоэтажными зданиями высотой от 20 до 24 этажей, в части из них отсутствует лифт. В жилом квартале существует четыре входа и выхода, два из которых расположены на улице Байсян на севере для въезда и выезда транспортных средств. Южный вход расположен на Биньцзян-роуд и доступен только для пешеходов. В дворовом пространстве жилой группы расположено здание автопаркинга, доступ в которое обеспечивается через эстакаду,

расположенную по периметру здания. Исходя из анализа сложившейся ситуации возможно выделить несколько основных групп планировочных проблем: 1) проблемы транспортно-пешеходной инфраструктуры; 2) проблемы недостаточности инсоляции и аэрации территории; 3) проблемы доступности общественных рекреационных пространств; 4) проблемы недостаточной площади озеленения и рекреационных зон для населения. Рассмотрим выявленные группы проблем более подробно.

Транспортные проблемы включают в себя недопустимо близкое расположение проезжей части к фасадам жилых зданий, отсутствие шумозащиты и буферной зеленой зоны приводят к загазованности и шумовому загрязнению [8]. Здание автопаркинга занимает практически все дворовое пространство, однако удовлетворяет потребности не всех групп населения проживающих на территории. На кровле автопаркинга отсутствует озеленение, что приводит к дефициту зеленых пространств и перегреву в жаркое время года. На территории отсутствуют детские и спортивные площадки, неорганизованно пешеходное и велодвижение (рис. 2, рис. 3).

Парковка:

→ Въезд на парковку



Отсутствие озеленения и благоустройства в дворовом пространстве.

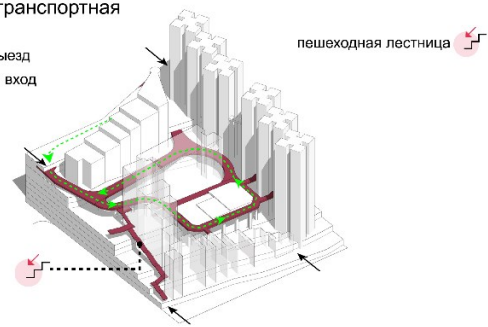
Отсутствие детских игровых площадок и спортивных зон.

Практически все пространство занимает парковка.

Рис. 2. Проблемы организации парковочных мест в структуре жилого квартала Байсянцзюй

Кольцевая транспортная развязка:

→ Въезд-выезд
→ Главный вход



Отсутствие разделения пешеходных и транспортных потоков.

Нарушено допустимое расстояние между проездом и фасадами жилых зданий.

Отсутствует защита от шума и буферная зона между проездом и фасадом здания.

Рис. 3. Проблемы транспортно-пешеходной инфраструктуры в структуре жилого квартала Байсянцзюй

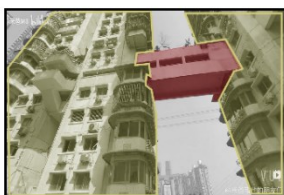
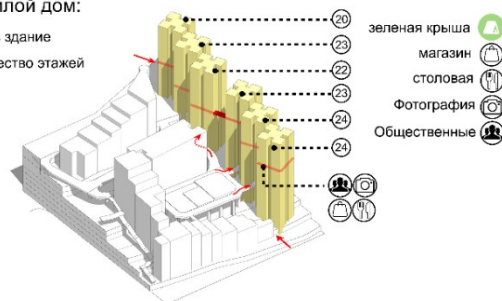
Повышенная этажность зданий и их близкое

расположение препятствуют инсоляции и аэрации территории (рис. 4, рис. 5).

Первый жилой дом:

→ Вход в здание

②① Количество этажей



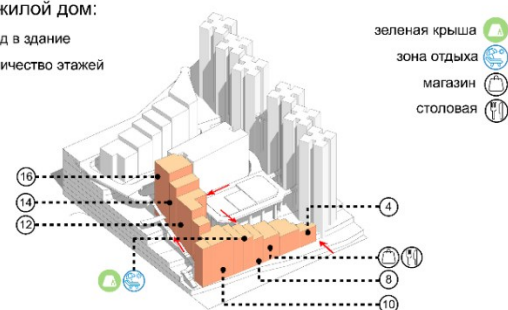
Затенение территории создается в виду повышенной этажности и близкого расположения зданий. Существующий высотный переход между зданиями создает дополнительное затенение.

Рис. 4. Проблемы инсоляции территорий в структуре жилого квартала Байсянцзюй

Второй жилой дом:

→ Вход в здание

②① Количество этажей

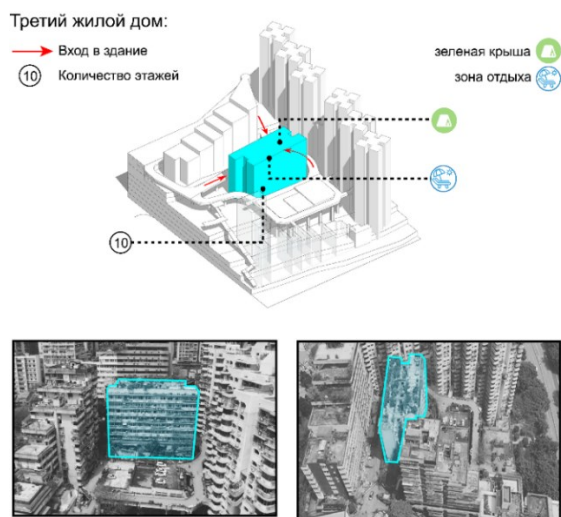


Повышенная этажность здания препятствует аэрации территории.

Рис. 5. Проблемы аэрации территорий в структуре жилого квартала Байсянцзюй

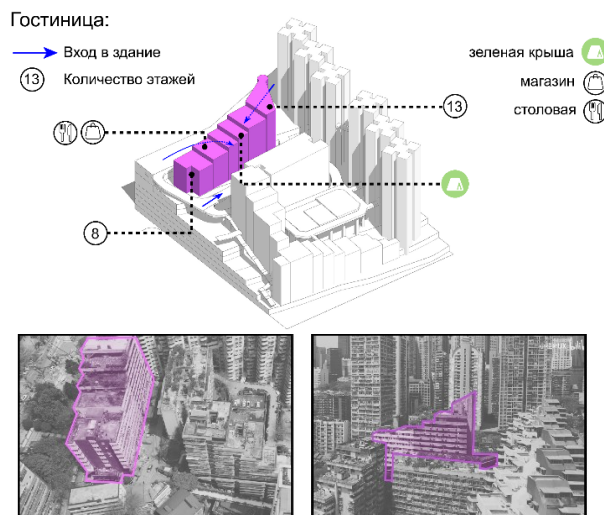
Рассмотрим существующие в структуре застройки зеленые зоны и открытые пространства. Наблюдается отсутствие прямых выходов в центральное пространство. Места общественного от-

дыха на крышах жилых блоков расположены хаотично, площадь озеленения недостаточна, не все жители имеют доступ к зеленым зонам, элементы благоустройства устарели (рис. 6, рис. 7).



Отсутствие доступа ко входу в рекреационные и дворовые пространства.

Рис. 6. Проблемы доступности общественных пространств в структуре жилого квартала Байсянцзюй



Существующей площади озеленения кровель недостаточно. Зеленые зоны плохо оборудованы.

Рис. 7. Проблема недостаточности площади зеленых зон в структуре жилого квартала Байсянцзюй

Исходя из выявленных проблем на примере территорий жилой застройки в центральной части г. Чунцин предложены перспективные направления ее реконструкции и развития. Перспективным направлением является освоение незастроенной территории на востоке Байсянцзюй в качестве рекреационной зоны для населения квартала и гостей города, а также эко-реконструкция сложившейся высотной застройки. Предлагается создать пейзажный парк на сложном рельефе с пешеходными мостами, один из которых пересекает магистральную дорогу и ведет к набережной реки Янцзы. Рекреационная зона формируется как multifunctional и включает в себя детские зоны, спортивные и зрелищные зоны, а также места тихого отдыха. В ходе исследования предложены функционально-планировочные модели, применимые как к условиям сложившейся плотной городской застройки на сложном рельефе, так и к незастроенным территориям горного ландшафта, предназначенным для рекреационного освоения.

Модель 1. Ландшафтный пешеходный мост. Ландшафтный пешеходный мост используется для пешеходного движения, организации зеленых зон и мест для сидения (рис.8). Являясь звеном пешеходной системы, он значительно сокращает расстояние при передвижении между двумя точками в зависимости от сложного рельефа и экономит время в пути. С точки зрения ис-

пользования городского пространства проектирование ландшафтных пешеходных мостов усиливает пространственную связь между различными функциональными зонами застройки, обогащает пространственный уровень улиц города и расширяет их до нескольких уровней, служит дополнительной возможностью для создания локальных озелененных участков, что улучшает качество среды [9]. Пешеходные мосты различных материалов и форм создают пространственную атмосферу и играют чрезвычайно важную роль в формировании зрительных впечатлений от восприятия городской среды. Такие объекты формируют уникальность городского ландшафта [10]. Горные города имеют сложные геоморфологические условия, низкую плотность дорожного покрытия, высокую интенсивность движения, при этом безопасность и эффективность транспортно-пешеходного движения обеспечивается распределением пешеходных и транспортных потоков в различных пространственных уровнях. Использование надземного пространства отражает гуманистический подход. Применение пешеходных мостов зачастую вызывает дискуссии, поскольку усложняется обслуживание и управление такими объектами. Однако в китайском Чунцине, городе со сложным рельефом и высокой плотностью населения, применение модели ландшафтного пешеходного моста на сложном рельефе является эффективным решением проблем транспортировки и пространственной связи.



Рис. 8. Модель «Ландшафтный пешеходный мост»

Модель 2. Зеленая лестница. Пешеходное лестничное пространство в горных городах изначально строилось для адаптации к природным условиям. Однако с повышением уровня социально-культурной жизни населения пешеходные лестницы постепенно включают в себя новые функции, что делает их важным городским общественным пространством для передвижения, отдыха, встреч, общения. Естественные условия рельефа горных городов создают предпосылки для формирования многоуровневых пространственных характеристик [11]. Являясь городской пешеходной системой, лестница гибко сочетает в себе видовые площадки природных сцен и создает экологичную среду за счет озеленения. Различные формы лестниц могут адаптироваться к ландшафту [12, 13]. Лестницы с горизонтальными ступенями значительно сокращают расстояние перемещения и зачастую безопаснее, чем наклонные пандусы. Они имеют более тесную связь с природными элементами ландшафта, такими как деревья и падающая вода. Это не только метод обработки перепада высот, но и один из важных элементов городского ландшафта.

Расположение лестничных маршей различается в зависимости от уклона местности: уклон 3-10% возможно отнести к пологому типу, лестницы на таких территориях имеют большую ширину и меньшую высоту ступеней; лестницы на территориях с уклоном 10–25% сочетают ступени и площадки для отдыха; для лестницы с уклоном 25-50% характеристики аналогичны характеристикам лестниц средних уклонов, которые также представляют собой комбинацию сту-

пеней и площадок для отдыха, но количество ступеней на лестнице увеличено; уклон от 50% является крутым уклоном, в такой местности лестницы чаще всего располагаются зигзагообразно (рис. 9). Ступеньки являются частью городского ландшафта, они могут формировать визуальное восприятие пейзажа [14]. Ландшафтные композиции и видовые кадры возможно комбинировать, чтобы создать богатый трехмерный ландшафт [15]. При проектировании лестничного марша следует использовать его поворотную площадку, которую можно соответствующим образом расширить, для горной местности Китая на таких площадках могут быть организованы места для традиционных видов досуга, игры в шахматы и чайной церемонии. Кроме того, оптимизация ландшафтных лестниц может быть достигнута путем простой и гибкой оптимизации ступеней и добавления устройств для сидения на ступеньках, чтобы ограничить пространство и повысить функциональность. Лестница перестает быть просто проходом, а становится пространством, в котором люди хотят находиться.

Модель 3. Озелененный пешеходный пандус. Сложный рельеф в горных городах занимает большую долю строительных площадей, в этой связи многие основные автомобильные и пешеходные пути имеют определенный уклон [16]. Когда уклон поверхности составляет от 1 до 4%, во время ходьбы он практически воспринимается как горизонтальная плоскость; уклон 4–10% возможно четко ощутить. Пандусы заменяются лестничными маршами только тогда, когда уклон достигает более 8%. Во многих случаях улицы

г. Чунцин имеют явные колебания уклона. Пандусы, занимающие большую площадь, часто используются в общественных пространствах, для соединения различных общественных зон. Использование пешеходных пандусов учитывает и их безбарьерные свойства. Городское общественное пространство должно учитывать потребно-

сти людей с ограниченной подвижностью. Конструкция пандуса может обеспечить доступность среды, а дизайн безбарьерного пространства направлен на повышение психологического комфорта. Пандус благоприятен для пеших прогулок, подходит для велосипедов и инвалидных колясок и отвечает требованиям безбарьерного дизайна (рис. 10).

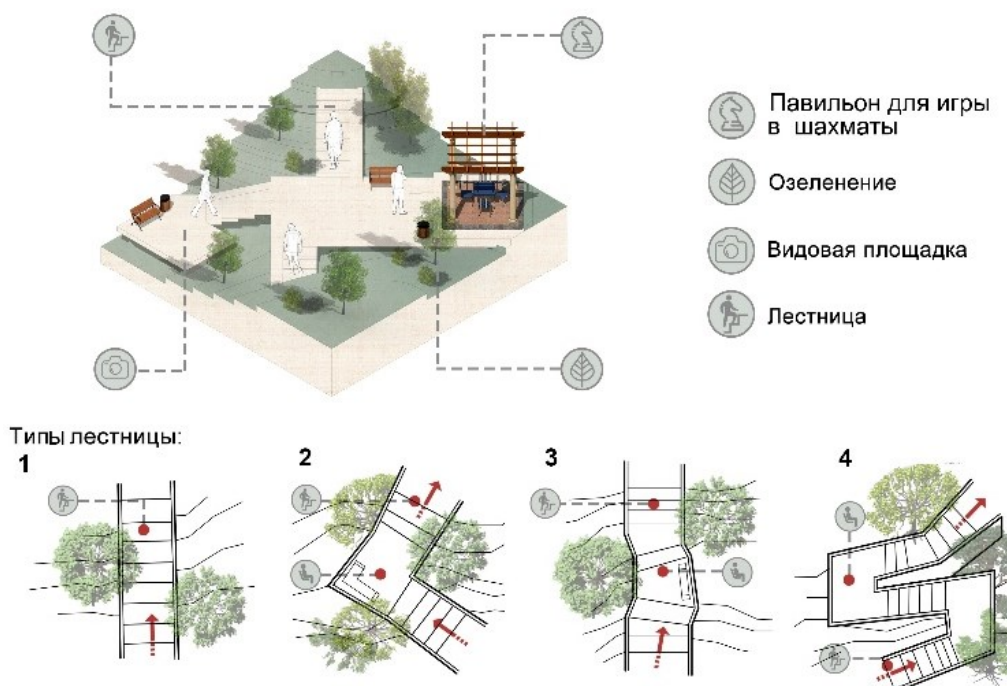


Рис. 9. Модель «Зеленая лестница»

1 – пологая лестница; 2 – поворотная лестница со средним уклоном; 3 – лестница сложной формы со средним уклоном; 4 – зигзагообразная лестница с крутым уклоном



Рис. 10. Модель «Озелененный пешеходный пандус»

1 – отдельный пандус; 2 – смешанный пандус; 3 – зигзагообразный пандус

Модель 4. Зеленый амфитеатр на рельефе.

Амфитеатр должен представлять собой многофункциональное общественное пространство, функционирующее всесезонно. Пространство зеленого амфитеатра используется как зрительские места во время проведения общественных мероприятий и как дополнительное рекреационное пространство. Форма амфитеатра может быть любой: прямоугольной, круглой, изогнутой, но наибольшее распространение получили амфитеатры с широкими прямыми рядами. Ряды амфитеатра также используются как проходы. Наиболее рациональным для уличного амфитеатра в условиях горного ландшафта является расположение на рельефе местности (рис.11). С целью максимальной интеграции амфитеатра в ландшафт используется внедрение в его структуру элементов озеленения (чаще используются амфитеатры, ряды которых засажены газонной травой) [17].

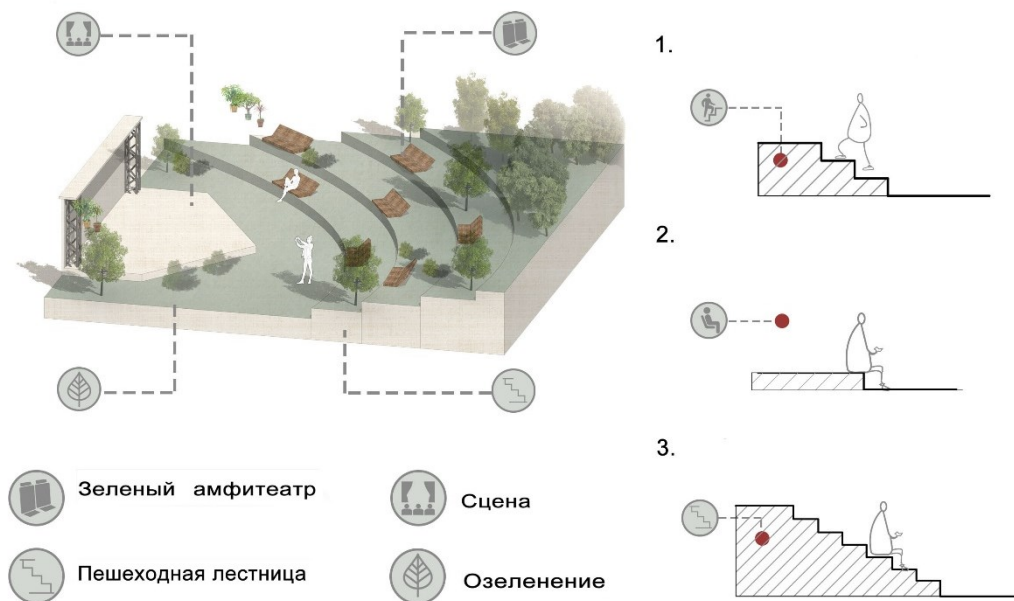


Рис. 11. Модель «Зеленый амфитеатр на рельефе»

1 – проход между рядами амфитеатра; 2 – отдельное сиденье; 3 – амфитеатр

Модель 5. Зеленые многофункциональные крыши. Применение зданий с зелеными крышами демонстрирует эффект повышения комфортности городской среды и улучшения экологических показателей, а также способствуют интеграции природных компонентов и урбанизированного ландшафта. Интеграция зданий и природных компонентов с применением зеленых кровель может быть осуществлена различными способами: интегрирование в рельеф местности (здание/сооружение находятся полностью либо частично в структуре ландшафта), подчинение силуэта застройки формам рельефа; применение террасированной застройки; акцентирования форм рельефа элементами застройки [18]; смешанный тип интеграции (рис. 12). С точки зрения рациональной организации общественных пространств в условиях высокоплотной застройки зеленые крыши формируют многофункциональные общественные зоны для различных групп потребителей [19]. Зеленые крыши могут создавать плоские, просторные, открытые регулярные пространства, которые в горных го-

родах являются редкими формами. Таким образом, с точки зрения функциональности площади зеленые крыши играют важную роль в формировании комфортной среды. Для того, чтобы сохранять региональную идентичность городской среды, предлагается внедрять, кроме прочих традиционные для Китая виды досуга в функциональную структуру зеленых крыш (зоны общественного питания с местами для чайной церемонии, беседки, места для игры в шахматы и занятий традиционными видами боевых искусств и пр.).

Модель 6. Открытое общественное пространство с доступом через лифт. Лифт, расположенный в горной местности или на сложном рельефе, представляет собой новый тип ландшафтного сооружения, используемого для облегчения доступа в горных районах, которое обладает характеристиками высокой эффективности.

Пешие прогулки в горных городах ограничены перепадом высот местности, и передвигаться по ним сложно. Сочетание модели "общественное пространство + лифт" решает трудно-

сти жителей при большом перепаде высот и дополняет традиционную схему передвижения по сложному рельефу, соединяет общественный транспорт и общественные ресурсы на склонах,

максимизируя интеграцию ресурсов, значительно повышая эффективность городских поездок и стимулируя жизнеспособность города (рис. 13).



Рис. 12. Модель «Многофункциональная зеленая крыша»

1 – подчинение силуэта застройки формам рельефа местности; 2 – применение террасированной застройки; 3 – интегрирование зданий в рельеф местности



Рис. 13. Модель «Открытое общественное пространство с доступом через лифт»

Выводы. Сложность природной основы горных городов создает градостроительные проблемы в формировании общественных пространств. Исходя из результатов анализа общественных пространств, сформированных в условиях горного ландшафта, на примере территорий центральной части г. Чунцин выделяются такие проблемы как: несвязность и непроницаемость общественных пространств; узость и закрытость пространств; недостаточная инсоляция и аэрация;

недостаточное озеленение.

В этой связи были выявлены функционально-планировочные модели общественных пространств, применимые как в условиях сложившейся городской застройки на сложном рельефе, так и при освоении незастроенных участков горного ландшафта. Наиболее применимыми являются пространственные модели озелененных пешеходных лестниц и пандусов. Тип лестницы формируется в зависимости от уклона местности,

основным недостатком данной модели является ее недоступность для маломобильных групп населения, поэтому модели лестницы и пандусов возможно использовать совместно.

В районах с большими перепадами высот, труднопроходимых, где существуют проблемы дифференциации пешеходного и транспортного движения, рациональным является выбор модели ландшафтного пешеходного моста.

В горных городах меньше земель, пригодных для застройки, и более высокая плотность городского населения, что способствует перекрытию линий панорамного обзора между городскими пространствами и приводит к образованию закрытых и прерывистых пространств. Высокая плотность застройки создает «затесненность» пространств. Такие пространства могут оказывать негативное влияние на физическое и психическое здоровье населения. В этой связи предлагается использовать модель зеленой крыши для создания общественных пространств и площадей.

Необходимо использовать соответствующие модели организации общественного пространства и их уникальные характеристики для координации и решения нежелательных градостроительных проблем, с учетом удовлетворения повседневных потребностей различных категорий потребителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лапшина Е.А., Коваль М.О. Особенности цветосветовой организации пешеходных пространств в условиях сложного рельефа // Вестник ИШ ДВФУ. 2018. №3 (36). С. 159–170. DOI: 10.5281/zenodo.1408250
2. Крогиус В.Р. Градостроительство на склонах. М.: Стройиздат, 1988. С. 59–97.
3. Баймуратова С.Х. Динамика освоения неудобных территорий в структуре крупного города (на примере города Уфы): автореф. дисс. ... кандидата архитектуры: 18.00.04. М.: Московский архитектурный институт (Государственная Академия), 2005. 26 с.
4. Lynch K. The image of city. The M.I.T. Press Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts, and London, England. 1960. Pp. 46–62.
5. Jan G. Life Between Buildings: Using Public Space.: Island Press; Sixth Edition. 2011. 216 p.
6. Liu J. Analysis of the spatial structure of the main city of Chongqing. 2003. URL: <https://www.docin.com/p-2875037706.html> (дата обращения 18.02.2024) (chinese)
7. Liu Jia. Research on the continuity and development of Binjiang public space in the main urban area of Chongqing. 2003. Chongqing University. URL: <https://www.docin.com/p-1500568056.html> (дата обращения 01.03.2023) (chinese)
8. Син Ж. Проблемы формирования общественных пространств в условиях сложного рельефа на примере города Чунцин, Китай. В сборнике: Образование. Наука. Производство. Сборник докладов XIV Международного молодежного форума. Белгород, 2022. С. 217–222.
9. Li Chuntao. On Connection Design of Pedestrian Overpass and Pavement in Mountainous City. Journal: Cities and architecture. 2014. №1. Pp. 6–8. (chin.)
10. Коваль М.О., Лапшина Е.А. Формирование стратегии вертикального развития пешеходных пространств с использованием сложного рельефа // Сборник XXXI Международной научной конференции «Наука в современном мире». С. 5–15.
11. Лисина О.А. Исторические предпосылки формирования многоуровневых пешеходных пространств // Академический вестник УралНИИПроект. 2016. № 2(29). С. 20–25.
12. Теодоронский В.С., Сабо Е.Д., Фролов В.А. Строительство и эксплуатация объектов ландшафтной архитектуры. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 352 с.
13. Боговая И.О., Фурсова Л.М. Ландшафтное искусство. М.: Агропромиздат, 1988. 223 с.
14. Ren Shushan. The Stairway Space Design of Mountainous City Based on Section Thought. Journal: Chongqing University. 2016. URL: <https://d.wanfangdata.com.cn/thesis/D01013929> (дата обращения 01.03.2023) (chinese)
15. Gu Hao. Research on Mountainous Cities Stairway Space and Behavior: A Case Study on the Thousands-step-ladder in Xiangkou, the New City of Badong in Hubei Province Journal: Urban Planning Gardens Landscape. Pp. 90–93. (chin.)
16. Jiang Zheng. Study on Barrier-free Design of Public Pedestrian Space in Mountain City. Journal: Chongqing University. 2011. URL: <https://www.docin.com/p-887003148.html> (дата обращения 01.03.2023) (chin.)
17. Палей Е.С. Амфитеатр на территории европейских университетских кампусов // Architecture and Modern Information Technologies. 2018. №3(44). С. 201–212.
18. Мохова Е.А. Ландшафтно-интегрированная архитектура, общественное пространство, взаимодействие, городская среда, ландшафт. Сборник статей III Международного научно-исследовательского конкурса. Петрозаводск, 2020. С. 314–322.
19. Крижановская Н.Я., Смирнова О.В. Генезис формирования инновационных зданий и

сооружений в городской среде. Харьков. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А. Н. Бекетова: 2016. 189 с.

Информация об авторах

Ладик Елена Игоревна, кандидат архитектуры, доцент Высшей школы архитектуры и дизайна. E-mail: krushelnitskaya1@rambler.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Син Жэньцзе, магистрант. E-mail: sin2.zh@edu.spbstu.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Поступила 26.02.2024 г.

© Ладик Е.И., Син Ж., 2024

***Ladik E.I., Xing Renjie**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

**E-mail: krushelnitskaya1@rambler.ru*

**ORGANIZATION OF THE ARCHITECTURAL ENVIRONMENT OF PUBLIC SPACES
IN A MOUNTAIN LANDSCAPE
(USING THE EXAMPLE OF CHONGQING, CHINA)**

Abstract. *The mountain landscape distinguishes the location of urban routes, the functional-spatial structure and layout of public areas from the design of an urban environment on flat terrain. This study examines the issues of rational use of urban areas in conditions of complex terrain using the example of the territory of the largest city of Chongqing, located in the central part of China. The research is based on an integrated approach, methods of urban planning analysis and functional-spatial modeling. Various aspects of the transformation of complex natural landscapes to expand public urban spaces and form their identity are analyzed using the example of public spaces in the structure of high-density residential development in Chongqing. The study identified the characteristic problems of the planning organization of public areas on difficult terrain (insufficient insolation, lack of green areas, non-standard location of transport infrastructure, irrational organization of pedestrian traffic, lack of public access to public areas, isolation and incoherence of public spaces, etc.). Functional planning models for the organization of public recreational spaces are proposed, which are promising for use both in areas of existing high-density development and for the development of undeveloped territories in the mountainous regions of China. Prospective directions for the development of public spaces in the Baixiangju residential area in Chongqing have been identified.*

Keywords: *mountain landscape, complex terrain, public spaces, urban recreation, landscape architecture.*

REFERENCES

1. Lapshina E.A. Koval' M.O. Features of color and light organization of pedestrian spaces in difficult terrain conditions [Osobennosti cvetosvetovoj organizacii peshekhodnyh prostranstv v usloviyah slozhnogo rel'efa]. Bulletin of the Far Eastern Federal University. 2018. No. 3 (36). Pp. 159–170. DOI.org/10.5281/zenodo.1408250 (rus)
2. Krogus V.R. Urban planning on the slopes [Gradostroitel'stvo na sklonah]. M.: Stroyizdat, 1988. Pp. 59–97. (rus)
3. Baymuratova S.Kh. Dynamics of the development of inconvenient territories in the structure of a large city: On the example of the city of Ufa. [Dinamika osvoeniya neudobnyh territorij v strukture krupnogo goroda: Na primere goroda Ufy]. MAI. 2005. 26 p. (rus)
4. Lynch K. The image of city. The M.I.T. Press Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts, and London, England. 1960. Pp. 46–62.
5. Jan G. Life Between Buildings: Using Public Space.: Island Press; Sixth Edition. 2011, 216 p.
6. Liu Jia. Analysis of the spatial structure of the main city of Chongqing. 2003. URL: <https://www.docin.com/p-2875037706.html> (date of treatment: 18.02.2024) (chin.)
7. Liu Jia. Research on the continuity and development of Binjiang public space in the main urban area of Chongqing. 2003. Chongqing University. URL: <https://www.docin.com/p-1500568056.html> (date of treatment: 01.03.2023) (chin.)
8. Xing Renjie. Problems of formation of public spaces in difficult terrain conditions on the example of Chongqing city, China [Problemy formirovaniya obshchestvennyh prostranstv v usloviyah slozhnogo rel'efa na primere goroda Chuncin, Kitaj]. In the collection: Education. The science. Production. Collection of reports of the XIV International Youth Forum. Belgorod, 2022. Pp. 217–222. (rus)

9. Li Chuntao. On Connection Design of Pedestrian Overpass and Pavement in Mountainous City. Journal: Cities and architecture. 2014. No. 1. Pp. 6–8. (chinese)
10. Koval M.O., Lapshina E.A. Formation of a strategy for the vertical development of pedestrian spaces using complex terrain [Formirovanie strategii vertikal'nogo razvitiya peshekhodnykh prostranstv s ispol'zovaniem slozhnogo rel'efa]. Collection of the XXXI International Scientific Conference "Science in the modern world". Pp. 5–15. (rus)
11. Lisina O.A. Historical background for the formation of multi-level pedestrian spaces [Istoricheskie predposylki formirovaniya mnogourovnevnykh peshekhodnykh prostranstv]. Academic Bulletin UralNIIProekt. 2016. No. 2 (29). Pp. 20–25. (rus)
12. Teodoronskij V.S., Sabo E.D., Frolov V.A. Construction and operation of landscape architecture objects [Stroitel'stvo i jekspluatatsiya obektov landshaftnoj arhitektury]. M. Publishing center "Academy". 2008. 352 p. (rus)
13. Bogovaja I.O., Fursova L.M. Landscape art [Landshaftnoe iskusstvo]. M.: Agropromizdat, 1988. 223 p. (rus)
14. Ren Shushan. The Stairway Space Design of Mountainous City Based on Section Thought. Journal: Chongqing University. 2016. URL: <https://d.wanfangdata.com.cn/thesis/D01013929> (date of treatment: 01.03.2023) (chin.)
15. Gu Hao. Research on Mountainous Cities Stairway Space and Behavior: A Case Study on the Thousands-step-ladder in Xiangkou, the New City of Badong in Hubei Province Journal: Urban Planning Gardens Landscape. No.30 (03). Pp. 90–93. (chin.)
16. Jiang Zheng. (2011) Study on Barrier-free Design of Public Pedestrian Space in Mountain City. Journal: Chongqing University. URL: <https://www.docin.com/p-887003148.html> (date of treatment: 01.03.2023) (chinese)
17. Palej E.S. Amphitheater on the territory of European university campuses of multi-level pedestrian spaces [Amfiteatr na territorii evropejskikh universitetskikh kampusovmnogourovnevnykh peshekhodnykh prostranstv]. Architecture and Modern Information Technologies. 2018. No. 3 (44). Pp. 201–212. (rus)
18. Mohova E.A. Landscape-integrated architecture, public space, interaction, urban environment, landscape [Landshaftno-integrirovannaya arhitektura, obshchestvennoe prostranstvo, vzaimodejstvie, gorodskaya sreda, landshaft]. Collection of articles of the III International Research Competition. Petrozavodsk, 2020. Pp. 314–322 (rus)
19. Krizhanovskaya N.Ya., Smirnova O.V. The genesis of the formation of innovative buildings and structures in the urban environment [Genezis formirovaniya innovacionnykh zdaniy i sooruzhenij v gorodskoj srede]: monograph. Kharkiv. national university of mountains households named after A. N. Beketova. 2016. 189 p. (rus)

Information about the authors

Ladik, Elena I. PhD, assistant professor. E-mail: krushelnitskaya1@rambler.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, st. Politekhnikeskaya, St. Petersburg, 195251, Russia.

Xing Renjie, graduate student E-mail: sin2.zh@edu.spbstu.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, st. Politekhnikeskaya, St. Petersburg, 195251, Russia.

Received 26.02.2024

Для цитирования:

Ладик Е.И., Син Ж. Организация архитектурной среды общественных пространств в условиях сложного рельефа (на примере города Чунцин, Китай) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №4. С. 67–78. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-67-78

For citation:

Ladik E.I., Xing Renjie. Organization of the architectural environment of public spaces in a mountain landscape (using the example of Chongqing, China). Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 4. Pp. 67–78. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-67-78

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-79-90

Качаев А.Е.

Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета

E-mail: doctor_cement@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ДЕЗИНТЕГРАТОРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Аннотация. На современном уровне автоматизации технологических процессов важную роль играют математические модели и результаты их численного расчета. Разработка математических моделей для определения конструктивно-технологических или энергосиловых параметров работы помольного оборудования позволяет получать численную информацию о рациональных режимах его работы. В настоящем исследовании получены численные результаты расчета математической модели вихревого движения двухфазного потока для второй стадии измельчения в зависимости от свойств измельчаемого материала (ρ_p) и текущего радиуса R_k помольной камеры агрегата. Представлена методика численного определения скоростных характеристик режимов работы агрегата для материалов с различными физико-механическими свойствами. В работе с помощью анализа графиков искомым функций математической модели вихревого движения двухфазного потока представлены поля скоростей в виде эюр радиальной, окружной (тангенциальной) и осевой компонент скорости, которая характеризует напряженность динамики потока внутри оригинальной конструкции помольной камеры мельницы. В процессе математического моделирования установлено, что радиальная и окружная (тангенциальная) составляющие скоростей двухфазного потока на текущих радиусах в диапазоне $R_k = 0,1-0,2$ м достигают своих максимальных значений, как для твердых частиц измельчаемого материала, так и для энергоносителя (несущей фазы) – воздуха. Определено, что для окружной составляющей скорости двухфазного потока в вихре при $R_k = 0,3$ м наблюдается ее максимум как для твердых частиц, так и для несущей фазы – $u_p = u_0 = 112,1$ м/с.

Ключевые слова: дезинтегратор, двухфазный поток, частица, радиальная скорость, окружная скорость, динамика потока.

Введение. Наиболее энергоемким технологическим процессом при производстве широкого спектра строительных материалов (сухие строительные смеси, сухие огнезащитные краски, цемент, порошкообразные поверхностно-активные вещества и др.) является измельчение. Именно измельчение сырьевых компонентов, твердых полуфабрикатов и техногенных отходов различных отраслей промышленности является неотъемлемой частью многих технологических процессов [1].

Для повышения эффективности технологии измельчения материалов в существующем помольном оборудовании на предприятиях страны необходимо использовать оптимальные режимы его работы. Это может быть реализовано не только с помощью экспериментальных исследований конструктивно-технологических и энергосиловых параметров оборудования, но и за счет формирования математических моделей технологических процессов, которые позволяют наиболее полно и эффективно управлять агрегатами подобного рода [2, 3]. Причем математические модели могут носить как комплексный, так и дискретный характер.

Разнообразие современных исследований в области оборудования для помола позволяет

сравнивать их характеристики в зависимости от конструктивных и технологических параметров, оценивать их металлоемкость и энергоэффективность. Только после этого представляется возможным делать выбор в пользу того или иного вида измельчителя при его максимально возможной производительности по готовому продукту. Научные исследования [4–6] помогают математически описывать все технологические процессы внутри различных конструкций мельниц, способствуют максимальному использованию возможностей этих помольных агрегатов при измельчении различных материалов.

Конструктивные особенности мельниц роторно-центробежного типа на основе подхода к моделированию движения двухфазных потоков внутри них создают новые комплексные технологические приемы, которые позволяют получать дисперсные порошкообразные материалы с высокой удельной поверхностью [4]. В поле центробежных сил с помощью комбинирования различных видов механического воздействия на измельчаемый материал разработчики современного помольного оборудования совершенствуют конструкции измельчителей, предлагают научные основы их расчета и проектирования, пред-

ставляют результаты поисковых и промышленных испытаний помольных агрегатов [5, 6].

Дезинтеграторные технологии постоянно совершенствуются [7]. На смену морально и физически устаревшему оборудованию приходят мельницы с комплексным воздействием на измельчаемый материал [8]. Сочетание внутри помольной камеры агрегата нескольких способов механического разрушения (например, удара и истиранием, удара со сдвигом) измельчаемого сырья позволяет достигать высоких удельных поверхностей при производстве дисперсных порошкообразных материалов [9]. В конструкциях таких агрегатов получают дисперсные материалы с заданным гранулометрическим составом, при этом технологические возможности самих измельчителей могут быть весьма универсальными и широкими [10].

Многими учеными [11–14] разработаны математические модели движения двухфазных потоков внутри помольных камер различных конструкций центробежных мельниц и дезинтеграторов. Для разработки математических описаний динамики воздушно-материального потока используются уравнения Навье-Стокса [15], выражения из динамики вихревых потоков [16], метод Лагранжа для одиночных частиц в потоке энергоносителя [17] и др. [18, 19]. Многообразие этих подходов носит дискретный характер и позволяет дифференцировать всю сложность технологических процессов внутри помольной камеры агрегатов центробежного типа.

Классическим подходом описания динамики двухфазного потока внутри дезинтегратора устанавливается характер его движения от центра к периферии помольной камеры [20]. Здесь, как правило, решается плоская задача, позволяющая отыскать радиальную и окружную скорости двухфазного потока, как твердой фазы, так и энергоносителя – воздуха. Однако, стоит заметить, что в оригинальных конструкциях измельчителей, например, [21, 22], помимо скоростей в горизонтальной плоскости следует оценивать и влияние гравитации, особенно, если на первой стадии измельчения двухфазный поток внутри помольной камеры сначала движется от центра к периферии, а на второй в обратном направлении – от периферии к центру.

В оригинальной конструкции дезинтеграторной мельницы [21] предусмотрено несколько технологических схем измельчения материалов. Благодаря специальной конструкции помольной камеры агрегата технологически реализуется схема центробежного и центростремительного вихревого движения двухфазного потока. Причем для более эффективного управления процес-

сом измельчения в дезинтеграторе наиболее важным представляется характер движения воздушно-материальной смеси на второй стадии измельчения сырья.

Здесь твердые частицы материала в потоке воздуха передвигаются от периферии помольной камеры к центральному разгрузочному отверстию внешнего ротора мельницы. При этом двухфазный поток испытывает аэродинамические и ударно-истирающие сопротивления различной природы. Математическое описание трехмерного вихревого движения внутри помольной камеры мельницы дезинтеграторного типа является сложной и весьма актуальной задачей. Решение этой задачи позволит численно определить скорости двухфазного потока в зависимости от физико-механических свойств измельчаемого сырья и конструктивно-технологических характеристик мельницы.

Целью настоящего исследования является формирование трехмерной математической модели движения двухфазного потока в вихре на второй стадии измельчения сырья в мельнице [21], которая позволит численно оценить величины скоростных параметров, необходимых для рациональной работы агрегата при измельчении различных материалов. Для достижения данной цели необходимо учесть зависимость скоростных параметров вихревого движения двухфазного потока от конструктивных и технологических параметров агрегата, а также физико-механических свойств измельчаемого сырья.

Методы и оборудование. Процесс математического моделирования динамики двухфазного вихревого потока внутри помольной камеры на второй стадии измельчения производился для дезинтегратора [21], устройство и принцип действия которого показано на рис. 1а. На рис. 1б представлен двухстадийный процесс измельчения внутри помольной камеры дезинтегратора с внутренней циркуляцией измельчаемого материала.

Измельчитель [21] работает, как сложный помольный агрегат. Сырье для измельчения через загрузочную воронку 2, установленную на кожухе 1 дезинтегратора, поступает в помольную камеру оригинальной конструкции. Последняя, в свою очередь, состоит из внешнего 3 и центрального 4 роторов. За счет постоянных энергонагруженных ударов от рабочих элементов 5, установленных на роторах 3 и 4, и вращающихся в противоположные стороны, сырье активно диспергируется.

В верхнем объеме помольной камеры – на первой стадии измельчения (рис. 1б, поз. 1) – сырье подвергается центробежному ударно-истирающему диспергированию. После чего воздушно-

материальный поток перемещается в нижнюю область помольной камеры мельницы (рис. 1б, поз. 2). Здесь на пути от периферии помольной камеры к центральным разгрузочным отверстиям

внешнего ротора 3 также происходит ударно-истирающее измельчение сырья. Так осуществляется вторая стадия диспергирования материала (рис. 1б, поз. 3).

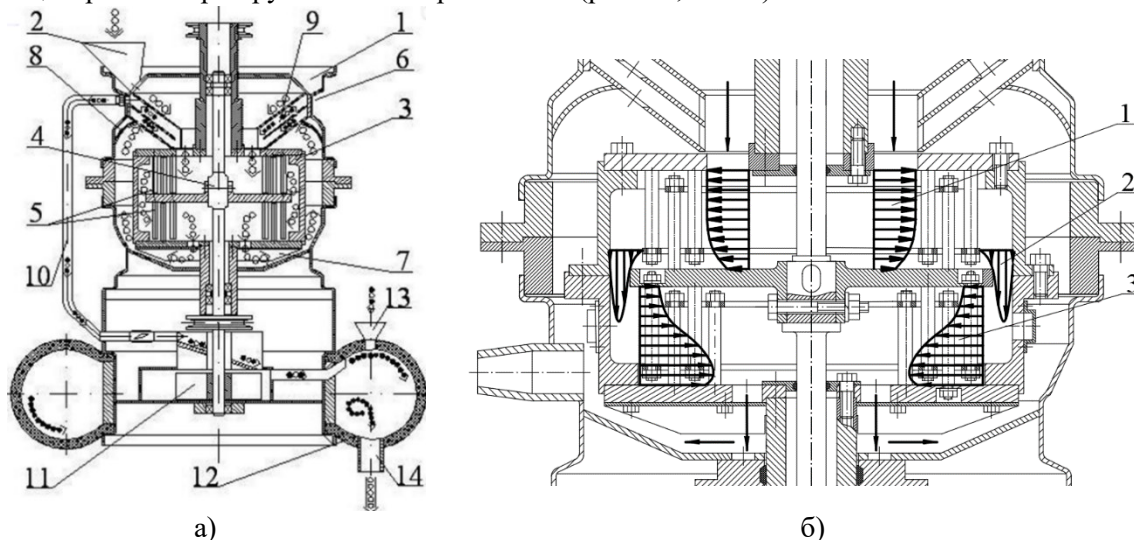


Рис. 1 Дезинтегратор: а) – устройство (к описанию принципа действия);

1 – кожух; 2 – загрузочная воронка; 3 – внешний ротор; 4 – центральный ротор; 5 – рабочие элементы; 6 – специальный патрубок готового продукта; 7 – внешний вентилятор; 8 – сферический направляющий патрубок; 9 – классификатор; 10 – соединительный трубопровод; 11 – вентилятор; 12 – смесительная камера; 13 – воронка загрузочная для добавок; 14 – специальное устройство; б) – стадийность измельчения материалов внутри помольной камеры дезинтегратора с формирующимися характерными скоростями движения двухфазного потока: 1 – эпюра скоростей двухфазного потока в вертикальной плоскости на первой стадии измельчения; 2 – эпюра скоростей двухфазного потока в вертикальной плоскости при его перемещении из верхнего объема в нижний помольной камеры для второй стадии измельчения; 3 – эпюра скоростей двухфазного потока в вертикальной плоскости на второй стадии измельчения

Здесь важно отметить, что центростремительное (всасывающее) давление на второй стадии ударно-истирающего измельчения в дезинтеграторе складывается из центробежного давления работы самого агрегата, как вентилятора, и всасывающего разрежения, которое создается внешним вентилятором 7, установленным на нижнем диске внешнего ротора 3. Именно так происходит процесс двухстадийного диспергирования материала в дезинтеграторной мельнице.

После измельчения диспергированный материал в виде двухфазного потока попадает в закамерное пространство между кожухом 1 мельницы и ее помольной камерой. Далее двухфазный поток через сферический направляющий патрубок 8 поступает в классификатор 9. В классификаторе под действием гравитации материал делится на крупку, которая возвращается на домол в помольную камеру, и готовый продукт, выводимый из агрегата с помощью специального патрубка готового продукта 6 в батарею циклонов или рукавных фильтров (на рис. 1а не показаны).

Наряду с вышеуказанной схемой работы агрегата существует технологическая возможность

вывода готового продукта через специальный патрубок готового продукта 6, соединенный с трубопроводом 10, посредством разрежения, достигаемого за счет оригинальности конструкции дезинтегратора. Разность давлений в этом случае создается вентилятором 11, соединенным со смесительной камерой 12. В смесительную камеру 12, где, в качестве примера, осуществляется гомогенизация сухих дисперсных красок с дисперсным клеевым компонентом, через загрузочное устройство 13 добавляются специальные химические компоненты, например, поверхностно-активные вещества. После этого конечный хорошо перемешанный продукт разгружается и обеспыливается через специальное устройство 14.

Математическое моделирование технологического процесса движения двухфазного потока внутри помольной камеры дезинтегратора осуществлялось методом крупных частиц [17]. Математическое описание динамики центробежного двухфазного потока в помольной камере дезинтегратора на первой стадии измельчения представлено в работе [23]. В настоящем исследовании для мельницы устанавливаются значения параметров радиальной, окружной (тангенциальной) и осевой скоростей движения двухфазного потока в поле центростремительных сил

во время второй стадии измельчения материала в помольной камере агрегата. В этой работе моделируются динамические параметры несущей фазы и твердых частиц сырья.

Основная часть. Рассмотрим вторую стадию измельчения материала в дезинтеграторе [21]. Здесь движение частиц от большего радиуса помольной камеры (периферии) к центральному разгрузочному отверстию, расположенному на меньшем текущем радиусе, осуществляется за счет симметричных противоположно вращающихся вихрей, которые создаются роторами агрегата. Именно роторы дезинтегратора при вращении свыше 6000 мин⁻¹ создают два противоположно вращающихся вихря, энергии которых взаимодействуют друг с другом.

Из-за наложения линий тока противоположно вращающихся вихрей, вызванных характером движения роторов мельницы, и их разности движение частиц сырьевого материала на второй стадии диспергирования описывают собой сложные спиральные траектории. Направление таких траекторий имеет порядок от периферии помольной камеры к центральному разгрузочному отверстию, расположенному на нижней части внешнего ротора. Технологически и конструктивно это стало возможным при особом спиралевидном расположении четных рядов рабочих элементов, которые способствуют продвижению материала от периферии помольной камеры к центральному разгрузочному отверстию после второй стадии измельчения (рис. 16).

В динамичном двухфазном потоке на твердую частицу действуют множество сил. Для нашей модели учтем наиболее значимые из них: гравитация – отметим ее как силу тяготения – F_g ; аэродинамическая сила сопротивления энергоносителя (воздуха) – F_a ; сила, характеризующая специфику изменения давления среды по поверхности измельчаемой частицы – F_p ; сила несимметричного бокового сопротивления при обтекании вращающейся в вихревом потоке частицы измельчаемого материала – F_ω .

Предположим, что аэродинамическая сила сопротивления энергоносителя, представленного основой в вихревом движении частицы измельчаемого материала, находится для автомобильной области $10^3 < Re < 3 \cdot 10^5$. Тогда с учетом квадратичного закона и на основании сформулированной [16] получим, что:

$$F_a = -\frac{\pi \cdot \rho_0 \cdot d_p^2}{20} \cdot v_r'^2 \frac{\vec{v}_r'}{|\vec{v}_r'|}, \quad (1)$$

где ρ_0 – плотность энергоносителя (воздуха), кг/м³; d_p – средневзвешенный диаметр частицы измельчаемого материала, м; v_r' – относительная скорость частицы измельчаемого материала, м/с,

$\vec{v}_r' = \vec{v}_0 - \vec{v}_p$; $\vec{v}_0$ – вектор скорости потока энергоносителя (воздуха), м/с; $\vec{v}_p$ – вектор скорости частицы измельчаемого материала в потоке энергоносителя, м/с; Re – критерий Рейнольдса, находится численно по формуле [18]:

$$Re = \frac{(v_0 - v_p) \cdot d_p}{\nu}, \quad (2)$$

здесь ν – кинематическая вязкость воздушно-материального потока, м/с².

Средневзвешенный диаметр частицы измельчаемого материала d_p связан с объемом сферической частицы V_p и определяется из известного выражения [17]:

$$d_p = \sqrt[3]{\frac{6V_p}{\pi}}. \quad (3)$$

При рассмотрении в моделировании общего случая для частицы измельчаемого материала несферической (произвольной) формы численно рассчитать аэродинамическую силу сопротивления невозможно. Такой вывод получен по причине того, что форма частиц сырьевых компонентов, подвергающихся измельчению и движущихся в двухфазном потоке, зависит не только от ее геометрической топологии, свойств вновь образованной поверхности, величины скорости, но и от положения твердой частицы относительно вектора скорости, которую частица измельчаемого материала имеет после неоднократного ударного взаимодействия с подобными частицами и рабочими элементами роторов дезинтегратора. Следовательно, полагаясь на результаты исследования ряда ученых [15, 16, 18], моделирование будем осуществлять в классическом понимании формы частицы, учитывая ее при математическом моделировании сферической.

Сила, характеризующая специфику изменения давления среды по поверхности измельчаемой частицы F_p , будет определяться на основании ранее сделанных исследований [24]. В относительном измерении малых размеров частиц измельчаемого материала данная характеристика дискретно определится изменением перепада давления по объему частицы измельчаемого материала V_p и представится в форме [24]:

$$F_p = -V_p \cdot grad(p), \quad (4)$$

где $grad(p)$ – перепад давления среды, взятый в точке с центром тяжести объема частицы измельчаемого материала, Па.

Помимо силы тяжести F_g и аэродинамической силы сопротивления среды энергоносителя (воздуха) F_a на динамику частицы в помольной камере дезинтегратора в вихревом двухфазном потоке существенное влияние оказывает сила F_ω .

Ее природа связана с несимметричностью обтекания вращающейся частицы измельчаемого материала. Тогда с учетом формулы Жуковского, которая представлена в работе [24], будем иметь выражение для определения F_ω :

$$F_\omega = -2\rho_p \cdot V_p \cdot v_{r\omega} \cdot \omega_p, \quad (5)$$

где $v_{r\omega}$ – ортогональная ω проекция относительной скорости частицы v_r измельчаемого материала, м/с; ρ_p – плотность частицы измельчаемого материала, кг/м³; ω_p – угловая характеристика скорости вращения частицы измельчаемого материала, рад/с⁻¹.

Конструктив агрегата и технология измельчения материалов в нем определяет характер взаимодействия реальных частиц измельчаемого материала друг с другом и рабочими поверхностями роторов мельницы. Это в частности связано не только с микроструктурой течения вокруг твердой частицы, ее самостоятельной динамикой, специфическими характеристиками ее поверхности, но и с динамическими характеристиками потока энергоносителя (воздуха) и частицы, соударением частиц друг с другом. На ряду с этим в математической модели динамики частицы несферической формы в вихревом потоке воздушно-материальной среды необходимо полагаться только на те силовые характеристики, которые явно определяются из конкретных физических явлений, в случае, когда иные силовые воздействия отсутствуют.

Просуммировав F_g , F_a , F_p и F_ω друг с другом, получаем уравнение равновесия сил с учетом (1), (4 - 5), действующих на частицу в динамичном

двухфазном потоке. Представив выражение через фактор скорости, как наиболее важную динамическую характеристику, получим:

$$\frac{dU_p}{dt} = \frac{(U_0 - U_p)}{\tau} - \text{grad}(p) + g + 2U_p \frac{dU_p}{dr_1}, \quad (6)$$

где U_0, U_p – характеристика абсолютной скорости фазы энергоносителя – воздуха и частицы в двухфазном потоке, соответственно, м/с. Абсолютные скоростные характеристики для твердой и воздушной фаз определяются из выражения:

$$U_0(U_p) = \sqrt{[v(v_p)]^2 + [w(w_p)]^2 + [u(u_p)]^2}. \quad (7)$$

здесь p – давление энергоносителя – воздуха на твердую частицу материала в двухфазном потоке, Па. Для оригинальной конструкции мельницы [21] при конкретных геометрических параметрах ее помольной камеры рассчитываем давление p энергоносителя из выражения [25]:

$$p = p_k + \frac{\rho_0 \cdot U_0}{2} \left[1 - \left(\frac{R_m^2}{z_m \cdot r_3^2} + \dots + \frac{R_{m+1}^2}{z_{m+1} \cdot r_3^2} \right) \right], \quad (8)$$

где p_k – создаваемое крыльчаткой помольной камеры всасывающее разрежение (давление), Па; R_m – текущее расстояние m -ного ряда рабочих элементов от оси ротора, м; z_m – количество рабочих элементов в m -ном ряду, шт.

С учетом вышеизложенных представлений об особенностях динамики вихревого двухфазного потока внутри помольной камеры агрегата концептуально представим пространственную модель движения частиц в вихревом потоке энергоносителя в виде расчетной схемы, как показано на рис. 2.

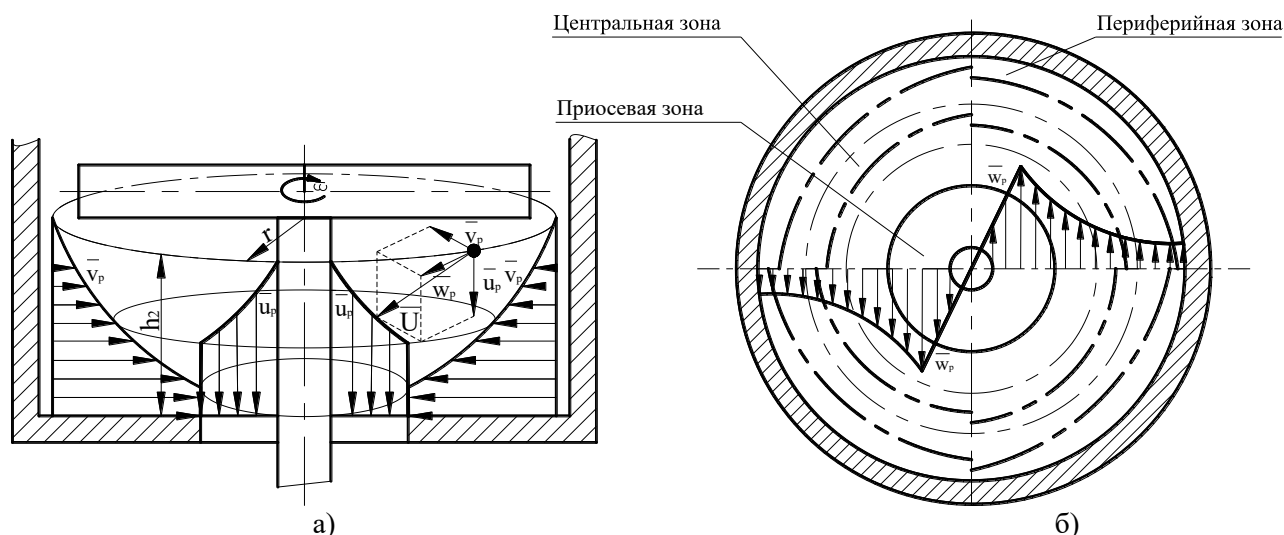


Рис. 2. Расчетная схема движения частиц в вихревом потоке энергоносителя внутри помольной камеры дезинтегратора: а) – эпюры радиальной и осевой составляющих скорости; б) – эпюра окружной (тангенциальной) скорости

В процессе математического моделирования поля скоростей движения частицы в вихревом потоке энергоносителя (воздуха) пренебрежем

силовой характеристикой, учитывающей её вращение. Данная величина бесконечно мала [26, 27, 28].

Предположим, что радиальная, окружная (тангенциальная) и осевая скорости движения воздуха и частицы измельчаемого материала определяются только текущим радиусом R_k от центра вращения двухфазного потока, а также относительными временными интервалами без соударений с рабочими элементами и поверхностями роторов мельницы.

В качестве основания для аналитических исследований динамики твердой частицы в вихревом потоке центростремительного поля воспользуемся следующей системой дифференциальных уравнений относительно различных составляющих абсолютной скорости двухфазного потока:

$$\begin{cases} \frac{dv_0}{dt} = \frac{(v_0 - v_p)}{\tau} - \frac{1}{\rho_p} \cdot \frac{\partial p}{\partial r_1} + \frac{w_p^2}{r_1} \\ \frac{dw_0}{dt} = \frac{(w_0 - w_p)}{\tau} + \frac{v_p w_p}{r_1}, \\ \frac{du_0}{dt} = \frac{(u_0 - u_p)}{\tau} - \frac{1}{\rho_p} \cdot \frac{\partial p}{\partial h_2} + g. \end{cases} \quad (9)$$

где v_p, w_p, u_p - радиальная, окружная (тангенциальная) и осевая скорости частицы в вихревом двухфазном потоке, м/с; v_0, w_0, u_0 - радиальная, окружная (тангенциальная) и осевая скорости энергоносителя (воздуха), м/с; h_2 - относительная осевая координата положения твердой частицы в вихревом потоке двухфазной среды на второй стадии измельчения материала, м (показана на рис. 2а).

Воспользуемся осреднением скоростных характеристик динамики твердых частиц в потоке энергоносителя - воздуха и представим систему в следующих безразмерных величинах:

$$\begin{cases} \bar{t} = \tau \frac{V_1}{R_k}; \quad \bar{\rho} = \frac{\rho_p}{\rho_0}; Fr = \frac{g R_k}{V_1^2}; \\ \bar{p} = \frac{p_0}{\rho_0 V_1^2}; \quad \bar{\lambda} = g \frac{\mu}{d_p^2 \rho_p} \cdot \frac{R_k}{V_1^2}. \end{cases} \quad (10)$$

где $\bar{t}$ - осредненное моделируемое время релаксации измельчаемой частицы; τ - расчетное время релаксации измельчаемой частицы, с; V_1 - абсолютная скорость частицы, м/с; R_k - текущий радиус помольной камеры мельницы, м; $\bar{\rho}$ - средняя плотность двухфазного потока; Fr - число Фруда; $\bar{p}$ - среднее давление на двухфазный поток внутри помольной камеры; $\bar{\lambda}$ - средний энергетический коэффициент напряженности вихря; μ - динамическая вязкость двухфазного потока.

С учетом системы (10) уравнения системы (9) окончательно представятся как:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{v}}{d\bar{t}} = \frac{\bar{w}_p^2}{\bar{r}} + \bar{\lambda} \cdot |(\bar{v}_0 - \bar{v}_p)| - \frac{1}{\bar{\rho}_p} \cdot \frac{\partial \bar{p}_0}{\partial \bar{r}_1}, \\ \frac{d\bar{w}}{d\bar{t}} = \bar{\lambda} \cdot |(\bar{w}_0 - \bar{w}_p)| + \frac{\bar{v}_p \bar{w}_p}{\bar{r}}, \\ \frac{d\bar{u}}{d\bar{t}} = \bar{\lambda} \cdot |(\bar{u}_0 - \bar{u}_p)| - \frac{1}{\bar{\rho}_p} \cdot \frac{\partial \bar{p}_0}{\partial \bar{h}_2} + Fr, \\ \frac{d\bar{r}}{d\bar{t}} = \bar{v}_p; \quad \bar{w}_p = \frac{\bar{r} d\varphi}{d\bar{t}}; \quad \bar{u}_p = \frac{d\bar{h}_2}{d\bar{t}}. \end{cases} \quad (11)$$

Для численного решения системы (11) начальные условия будут выглядеть следующим образом:

$$\{t = 0; \quad r = 1; \quad \varphi = 0; \quad h_2 = 0; \quad v_p = 1; \quad w_p = 1; \quad u_p = 0\}.$$

Формируя представления об уравнениях для численного моделирования динамики частицы измельчаемого материала в вихревом потоке энергоносителя (воздуха) в поле центробежных сил, для самого энергоносителя из (11) получим:

- радиальная составляющая скорости будет определять так:

$$\bar{v}_0 = \frac{t[\rho_p(\bar{w}_p^2 - \bar{\lambda} \bar{v}_p \cdot \bar{r})]}{\bar{r} \cdot \rho_p(1 - \bar{\lambda} t)}, \quad (12)$$

- окружная (тангенциальная) составляющая скорости будет определять из выражения:

$$\bar{w}_0 = \frac{\bar{w}_p t[(\bar{v}_p - \bar{\lambda} \bar{r})]}{\bar{r}(1 - \bar{\lambda} t)}; \quad (13)$$

- осевая составляющая скорости будет определять по уравнению:

$$\bar{u}_0 = \frac{t[(\bar{v}_p \cdot \bar{\lambda} + \frac{p_0}{\rho_p h_2} \cdot \bar{r})]}{(1 - \bar{\lambda} t)}. \quad (14)$$

По уравнениям (12 - 13) также определялись в исследовании значения скоростей частиц в вихревом двухфазном потоке при фиксировании начальных характеристик энергоносителя - воздуха. По результатам численного моделирования системы (11) были получены следующие графические зависимости скоростей (эпюры) от текущего радиуса помольной камеры мельницы (рис. 3).

Анализируя выражения (12-13), можно заключить, что значение $\bar{r}$, представляющее собой величину текущего радиуса (R_k) помольной камеры, находясь и в числителе, и в знаменателе, по разному влияет на формирование профиля эпюры скоростей для различных точек объема помольной камеры. Именно поэтому профили скоростей не симметричны. Здесь же еще следует отметить, что в выражении для вычисления осевой скорости несущей фазы в центростремительном потоке значение текущего радиуса $\bar{r}$ (R_k) в знаменателе отсутствует. Это связано с тем, что

при самом максимальном радиусе помольной камеры $R_k = 0,3$ м подпор материала при переходе с первой стадии измельчения на вторую оказывает существенное давление для перемещения

материала и воздушной среды в вертикальном направлении по высоте h_2 (последнее равенство в системе (11)).

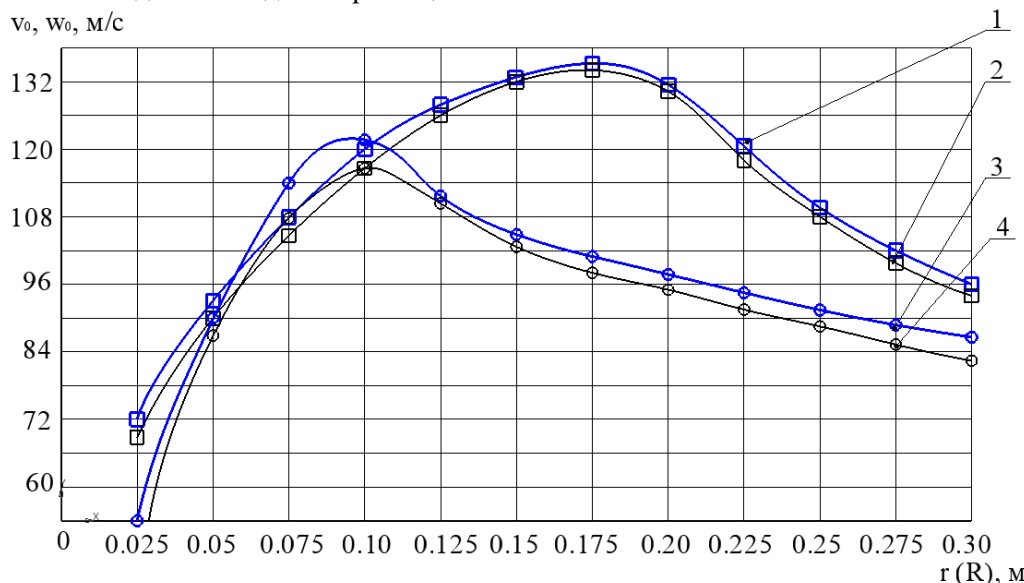


Рис. 3. График (эпюры) скоростей вихревого двухфазного потока в зависимости от текущего радиуса помольной камеры: 1 – радиальная скорость энергоносителя – воздуха; 2 – радиальная скорость частицы в вихревом потоке несущей фазы; 3 – окружная (тангенциальная) несущей фазы – воздуха; 4 – окружная (тангенциальная) скорость частицы в вихревом потоке

Значения скоростей несущей фазы и частиц измельчаемого материала внутри помольной камеры дезинтегратора оригинальной конструкции позволяют управлять технологией измельчения различных материалов, оптимизировать энергозатраты на помол, повышать качество готового продукта и отслеживать эксплуатационную надежность агрегата. Математическое моделирование технологического процесса измельчения для агрегатов с комплексным воздействием на измельчаемый материал помогает понять всю сложность такого процесса и дать рекомендации по его более точному описанию и совершенствованию.

Согласно графической зависимости на рис. 3, полученной по результатам обработки математической модели, заключаем, что максимальные радиальные скорости и частицы, и несущей фазы находятся в середине помольной камере на текущем радиусе $R_k = 0,15–0,2$ м. При этом радиусе их значения составляют $v_p = 132–130$ м/с, соответственно, $v_0 = 133,9–131,3$ м/с, соответственно.

Здесь же отмечаем, что при $R_k = 0,1$ м максимальные значения окружных (тангенциальных) скоростей частицы и воздуха равны: $w_p = 116,7$ м/с и $w_0 = 123,2$ м/с, соответственно. В этом анализе графика радиальной и окружной (тангенциальной) скоростей отметим, что при $R_k = 0,3$ м значения обоих составляющих падают, относительно своих достигнутых максимальных значе-

ниях на $R_k < 0,3$ м. Это связано с тем, что на второй стадии измельчения материала происходит обратный эффект, и двухфазный поток в этом объеме помольной камеры разгоняется от периферии к центру и достигает своих максимальных показателей к средним значениям текущего радиуса R_k .

Не менее специфической выглядит графическая зависимость осевой скорости частицы и несущей фазы в помольной камере дезинтегратора оригинальной конструкции (рис. 4). Данная составляющая скорости позволяет управлять процессом перехода воздушно-материального потока от первой стадии измельчения ко второй в объеме оригинальной конструкции помольной камеры.

График на рис. 4 показывает следующую динамику двухфазного потока на второй стадии измельчения в помольной камере. Здесь отметим, что максимальное значение u_0 численно близко совпадает с u_p и равно $112,1$ м/с при $R_k = 0,3$ м. В диапазоне $R_k = 0,1–0,2$ м значения u_0 и u_p достигают минимальных показателей (снижение до $u_0 = 82,4$ м/с, $u_p = 80,8$ м/с при $R_k = 0,1$ м). Это свидетельствует о том, что к центру помольной камеры движение вихревого двухфазного потока становится более постоянным, чем на периферии. В зоне разгрузки материала (выхода двухфазного потока из помольной камеры) при $R_k = 0,025–0,075$ м наблюдается увеличение осевой компоненты скорости до значений: $u_0 = 87,4$ м/с,

$u_p = 86,1$ м/с. Такой незначительный рост осевой компоненты скоростного потока связано с ростом давления всасывающей, которое создается

крыльчаткой на нижней части внешнего ротора мельницы.

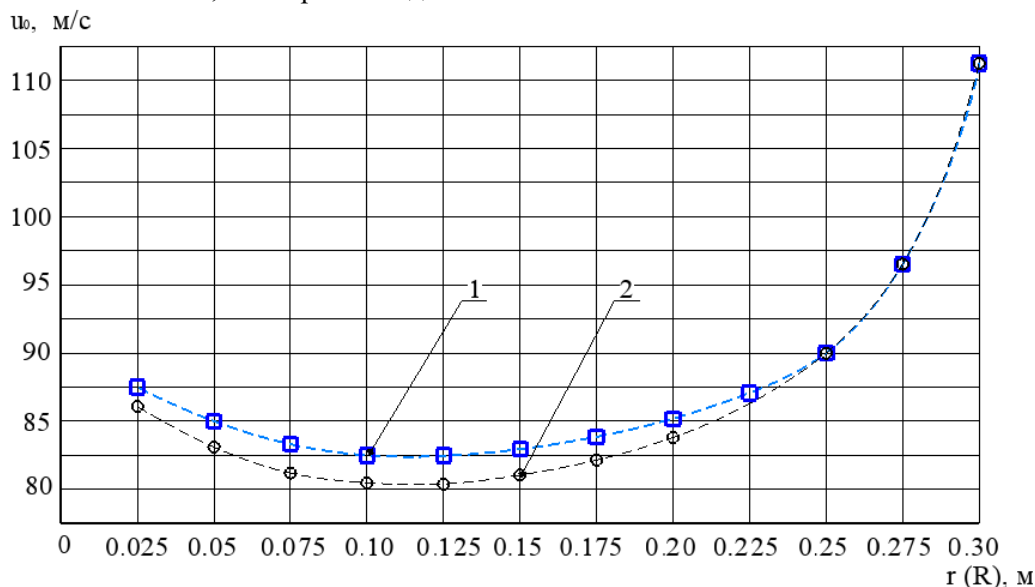


Рис. 4. График (эпюры) осевой скорости вихревого двухфазного потока в зависимости от текущего радиуса помольной камеры: 1 – осевая скорость несущей фазы – воздуха; 2 – осевая скорость частицы в вихревом потоке несущей фазы

Выводы. Представлено последовательно сформулированная математическая модель вихревой динамики двухфазного потока для второй стадии измельчения сырья внутри помольной камеры дезинтегратора, которое позволяет численно определить скоростные характеристики режимов работы агрегата для материалов с различными физико-механическими свойствами.

С помощью графической интерпретации математической модели вихревого движения двухфазного потока для второй стадии измельчения материалов получены эпюры радиальной, окружной (тангенциальной) и осевой компонент скорости, которая характеризует напряженность динамики потока внутри оригинальной конструкции помольной камеры мельницы.

Установлено, что радиальная и окружная (тангенциальная) составляющие скоростей двухфазного потока на текущих радиусах в диапазоне $R_k = 0,1\text{--}0,2$ м достигают своих максимальных значений, как для твердых частиц измельчаемого материала, так и для несущей фазы – воздуха.

Определено, что для осевой составляющей скорости двухфазного потока в вихре при $R_k = 0,3$ м наблюдается ее максимум как для твердых частиц, так и для несущей фазы – $u_p = u_0 = 112,1$ м/с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жиров Д.М. Физические процессы разрушения многокомпонентных структурно-неодно-

родных материалов и сравнительный анализ технических характеристик мельниц для их измельчения // Вестник Удмуртского университета. Серия 4. Физика и химия. 2013. № 3. С. 7–12.

2. Хамидов Б.Т., Акабиров Л.Х., Досумов Ш.Р. Исследование процесса измельчения материалов на основе математической модели // Universum: Технические науки: электрон. научн. журн. 2019. № 10(67). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/7953>

3. Советов Б.Я. Моделирование систем. М.: Высшая школа. 2001. 343 с.

4. Семикопенко И.А., Воронов В.П., Смирнов Д.В. Расчет мощности, затрачиваемой на движение двухфазной среды в патрубке рецикла дезинтегратора // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 1. С. 119–123. DOI: 10.12737/article_5c506246246cf7.72565493

5. Богданов В.С., Семикопенко И.А., Воронов В.П. Дезинтеграторы. Конструкции. Теория. Эксперимент. Монография. Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. 235 с.

6. Данилов Р.Г. Гипотеза механизма тонкого измельчения в роторных мельницах с зубчатоподобным зацеплением // Промышленность строительных материалов и стройиндустрия. Энерго – и ресурсосбережение в условиях рыночных отношений: Сб. докл. Междунар. конф. Ч.4. Белгород, 1997. С. 164–168.

7. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю. Системный анализ процессов химической

технологии: измельчение и смешение: монография. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Издательство Юрайт. 2023. 440 с.

8. Севостьянов В.С., Качаев А.Е., Бойчук И.П., Кузнецова И.А. Теоретические исследования процессов в роторной мельнице с комбинированным воздействием на измельчаемый материал // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 9. С. 122–129. DOI: 10.12737/article_59a93b0aa409c9.96285097

9. Бойчук И.П., Перелыгин Д.Н. Комплексные исследования акустического воздействия на газопылевой поток в вихре-акустическом диспергаторе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 1. С. 155–161.

10. Севостьянов В.С., Перелыгин Д.Н., Уральский В.И., Горлов А.С., Глаголев Е.С., Бабаевский А.Н. Разработка и исследование энерго-сберегающего помольного оборудования для высокодисперсного измельчения материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №3. С. 76–80.

11. Богородский А.В., Блиничев В.Н., Лапшин В.Б. Интенсификация процесса измельчения в мельнице дезинтеграторного типа // Известия ВУЗов СССР. Химия и хим. технология. №5. 1980. С. 643–645.

12. Семикопенко И.А., Воронов В.П., Пензев П.П. Теоретические исследования скорости движения частиц материала вдоль поверхности ударного элемента мельницы дезинтеграторного типа // Известия ВУЗов. Строительство. 2008. № 11. С. 93–96.

13. Баранов Д.А., Блиничев В.Н., Вязьмин А.В., Жихарев А.С., Катылов А.В., Макаров Ю.И., Мизонов В.Е., Орлов В.А., Соколов В.И., Ушаков С.Г., Фролов В.Ф., Чепура И.В. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование. Учебное пособие. Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. Том №2. 2001. 600 с.

14. Вайтехович П.Е., Боровский Д.Н. Разрушающее воздействие мелющих тел в горизонтальной планетарной мельнице при различных способах обкатки помольных барабанов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2019. № 2. С. 3–6.

15. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз. 1959. 700 с.

16. Смульский И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. Новосибирск: ВО "Наука". 1992. 301 с.

17. Канаков О.И., Мотова М.И. Методы Лагранжа и Гамильтона в исследовании колебательных систем: Учебно-методическое пособие.

Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет. 2016. 39 с.

18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. М.: Наука. Т.1: Механика. 1988. 216 с.

19. Арнольд В.И. Математические методы классической механики. М.: Наука, 1974. 472 с.

20. Хинт И.А. Основы производства силикатных изделий. Л.: Госстрой. 1962. 601 с.

21. Пат. № 2377070. МПК7 В 02 С 13/22. Дезинтегратор / Гридчин А.М., Севостьянов В.С., Глаголев Е.С., Качаев А.Е. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», ООО «ТК-РЕЦИКЛ». №2008118079/03. Заявл. 06.05. 2008; опубл. 27.12.2009.

22. Пат. № 2444407. МПК7 В02С 18/08. Роторная мельница / Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Гридчин А.М., Лесовик В.С., Королев И.Г., Качаев А.Е., Шенцева М.Е., Орехова Т.Н. Заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова". № 2010138884/13. Заявл. 21.09.2010; опубл. 10.03.2012.

23. Качаев А.Е., Севостьянов В.С., Чемеричко Г.И., Орехова Т.Н. Математическое описание динамики центробежного двухфазного потока в помольной камере дезинтегратора // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №2. С. 70–79. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-2-70-79

24. Краснов Н.Ф. Аэродинамика. Ч.1. Основы теории. Аэродинамика профиля и крыла. Учебник для ВТУЗов. Изд. 2-е перераб и доп. М.: Высшая школа. 1976. 384 с.

25. Смульский И.И. Взвешенный слой частиц в цилиндрической вихревой камере // Журнал прикладной химии. 1983. №8. С. 1782–1789.

26. Bagnold R.A. Experiments on a gravity Free Dispersion of large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear // Proc. Roy Soc. London, 1954. Vol.225. Pp. 49–63.

27. Kolobov M.Yu., Chagin O.V., Blinichev V.N. Increase of Longevity of Working Organs of Centrifugal-Shock Grinding Down // Russian Journal of General Chemistry. 2021. Vol. 91(6). Pp. 1205–1208.

28. Сиваченко Л.А., Титов Д.В., Сиваченко Т.Л. Дезинтеграторные технологии, их техническая обеспеченность и перспективы развития // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвузовский сборник статей. Белгород: БГТУ, 2009. С. 228–233.

29. Ревнивцев В.И. Селективное разрушение материалов. М.: Недра. 1988. 386 с.

30. Крупин С.В., Трофимова Ф.А. Коллоидно-химические основы создания глинистых суспензий для нефтепромыслового дела. Казан-

ский государственный технологический университет, Центральный научно-исследовательский институт геологии нерудных полезных ископаемых. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ). 2010. 411 с.

Информация об авторах

Качаев Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительного производства. E-mail: doctor_cement@mail.ru. Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета. Россия, 140402, Московская область, г. Коломна, ул. Октябрьской революции, дом 408

Поступила 13.02.2024 г.

© Качаев А.Е., 2024

Kachaev A.E.

Kolomna Institute (branch) of Moscow Polytechnic University,

E-mail: doctor_cement@mail.ru

MATHEMATICAL MODEL OF VORTEX MOTION OF TWO-PHASE FLOW IN A DISINTEGRATOR MILL

Abstract. Mathematical models and the results of their numerical calculations play an important role at the modern level of automation of technological processes. The development of mathematical models to determine the design-technological or energy-power parameters of the operation of grinding equipment allows to obtain numerical information about the rational modes of its operation. In this study, numerical results were obtained from calculating a mathematical model of the vortex motion of a two-phase flow for the second stage of grinding depending on the physical and mechanical characteristics of the material being ground (ρ_p) and the current radius R_k of the grinding chamber of the unit. A method for numerically determining the speed characteristics of unit operating modes for materials with different physical and mechanical properties is presented. In the work, using the analysis of graphs of the sought functions of the mathematical model of the vortex motion of a two-phase flow, the velocity fields are presented in the form of diagrams of the radial, circumferential (tangential) and axial velocity components, which characterize the intensity of the flow dynamics inside the original design of the grinding chamber of the mill. In the process of mathematical modeling, it was established that the radial and circumferential (tangential) components of the two-phase flow velocities at current radii in the range $R_k = 0.1\text{--}0.2$ m reach their maximum values, both for solid particles of the crushed material and for the carrier phase – air. It has been determined that for the circumferential component of the velocity of a two-phase flow in a vortex at $R_k = 0.3$ m, its maximum is observed for both solid particles and the carrier phase – $u_p = u_o = 112.1$ m/s.

Keywords: disintegrator, two-phase flow, particle, radial velocity, peripheral velocity, flow dynamics.

REFERENCES

1. Zhirov D.M. Physical processes of destruction of multicomponent structurally inhomogeneous materials and comparative analysis of the technical characteristics of mills for their grinding [Fizicheskiye protsessy razrusheniya mnogokomponentnykh strukturno-neodnorodnykh materialov i sravnitel'nyy analiz tekhnicheskikh kharakteristik mel'nits dlya ikh izmel'cheniya]. Bulletin of the Udmurt University. Series 4. Physics and chemistry. 2013. No. 3. Pp. 7–12. (rus)

2. Khamidov B.T., Akabirova L.Kh., Dosumov Sh.R. Study of the process of grinding materials based on a mathematical model [Issledovaniye protsessa izmel'cheniya materialov na osnove matematicheskoy modeli]. Universum: Technical Sciences: electron. scientific magazine.

2019. No. 10(67). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/7953> (rus)

3. Sovetov B.Ya. Systems modeling [Modelirovaniye sistem]. M.: Higher school. 2001. 343 p. (rus)

4. Semikopenko I.A., Voronov V.P., Smirnov D.V. Calculation of the power spent on the movement of a two-phase medium in the recycle pipe of the disintegrator [Raschet moshchnosti, zatrachivayemoy na dvizheniye dvukhfaznoy sredy v patrubke retsikla dezintegratora]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 1. Pp. 119–123. DOI:10.12737/article_5c506246246cf7.72565493 (rus)

5. Bogdanov V.S., Semikopenko I.A., Voronov V.P. Disintegrators. Constructions. Theory. Experi-

ment. Monograph [Dezintegratory. Konstruktsii. Teoriya. Eksperiment. Monografiya]. Belgorod. BSTU named after. V.G. Shukhova. 2016. 235 p. (rus)

6. Danilov R.G. Hypothesis of the mechanism of fine grinding in rotary mills with gear-like gearing [Gipoteza mekhanizma tonkogo izmel'cheniya v rotnykh mel'nitsakh s zubchatopodobnym zatsepleniym]. Industry of building materials and construction industry. Energy and resource saving in market conditions: Sat. report Intl. conf. Part 4. Belgorod. 1997. Pp. 164–168. (rus)

7. Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Arutyunov S.Yu. System analysis of chemical technology processes: grinding and mixing: monograph [Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii: izmel'cheniye i smesheniye: monografiya]. 2nd ed., revised. and additional Moscow: Yurayt Publishing House. 2023. 440 p. (rus)

8. Sevostyanov V.S., Kachaev A.E., Boychuk I.P., Kuznetsova I.A. Theoretical studies of processes in a rotary mill with a combined effect on the crushed material [Teoreticheskiye issledovaniya protsessov v rotnoy mel'nitse s kombinirovannym vozdeystviyem na izmel'chayemyy material]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 9. Pp. 122–129. DOI: 10.12737/article_59a93b0aa409c9.96285097 (rus)

9. Boychuk I.P., Perelygin D.N. Comprehensive studies of the acoustic effect on gas and dust flow in a vortex-acoustic disperser [Kompleksnyye issledovaniya akusticheskogo vozdeystviya na gazopylevoy potok v vikhre-akusticheskom dispergatore]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 1. Pp. 155–161. DOI: 10.12737/23478. (rus)

10. Sevostyanov V.S., Perelygin D.N., Uralsky V.I., Gorlov A.S., Glagolev E.S., Babaevsky A.N. Development and research of energy-saving grinding equipment for highly dispersed grinding of materials [Razrabotka i issledovaniye energosberegayushchego pomol'nogo oborudovaniya dlya vysokodispersnogo izmel'cheniya materialov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2014. No. 3. Pp.76–80. (rus)

11. Bogorodsky A.V., Blinichev V.N., Lapshin V.B. Intensification of the grinding process in a disintegrator type mill [Intensifikatsiya protsessa izmel'cheniya v mel'nitse dezintegratornogo tipa]. Proceedings of the USSR Universities. Chemistry and chem. technology. 1980. No. 5. Pp. 643–645. (rus)

12. Semikopenko I.A., Voronov V.P., Penzev P.P. Theoretical studies of the speed of movement of material particles along the surface of the impact element of a disintegrator-type mill [Teoreticheskiye issledovaniya skorosti dvizheniya chastits materiala vdol' poverkhnosti udarnogo elementa mel'nitsy dezintegratornogo tipa]. Izvestia VUZov. Construction. 2008. No. 11. Pp. 93–96. (rus)

13. Baranov D.A., Blinichev V.N., Vyazmin A.V., Zhikharev A.S., Katalymov A.V., Makarov Yu.I., Mizonov V.E.I., Orlov V.A., Sokolov V.I., Ushakov S.G., Frolov V.F., Chepura I.V. Processes and apparatus of chemical technology. Transfer phenomena, macrokinetics, similarity, modeling, design. Tutorial [Protssy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. Yavleniya perenosa, makrokinetika, podobiye, modelirovaniye, proyektirovaniye. Uchebnoye posobiye]. Ivanovo State Energy University named after. im V. I. Lenin. 2001. Vol. 2. 600 p. (rus)

14. Vaitekhovich P.E., Borovsky D.N. Destructive effects of grinding media in a horizontal planetary mill with various methods of running in grinding drums [Razrushayushcheye vozdeystviye melyushchikh tel v gorizont'al'noy planetarnoy mel'nitse pri razlichnykh sposobakh obkatki pomol'nykh barabanov]. Chemical and oil and gas engineering. 2019. No. 2. Pp. 3–6. (rus)

15. Levich V.G. Physico-chemical hydrodynamics [Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika]. M.: Fizmatgiz. 1959. 700 p. (rus)

16. Smulsky I.I. Aerodynamics and processes in vortex chambers [Aerodinamika i protssy v vikhrevykh kamerakh]. Novosibirsk: VO "Science". 1992. 301 p. (rus)

17. Kanakov O.I., Motova M.I. Lagrange and Hamiltonian methods in the study of oscillatory systems: Educational and methodological manual [Metody lagranzha i gamil'tona v issledovanii kolebatel'nykh sistem: Uchebno-metodicheskoye posobiye]. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University. 2016. 39 p. (rus)

18. Landau L.D., Lifshits E.M. Theoretical physics [Teoreticheskaya fizika]. M.: Science. Vol.1. Mechanics.1988. 216 p. (rus)

19. Arnold V.I. Mathematical methods of classical mechanics [Matematicheskiye metody klassicheskoy mekhaniki]. M.: Nauka. 1974. 472 p. (rus)

20. Hint I.A. Basics of production of silicalcite products [Osnovy proizvodstva silikal'citnykh izdelij]. M.: Gosstrojizdat. 1962. 601 p. (rus)

21. Gridchin A.M., Sevostyanov V.S., Glagolev E.S., Kachaev A.E. Disintegrator. Patent RF, no. 2377070, 2009. (rus)

22. Glagolev S.N., Sevostyanov V.S., Gridchin A.M., Lesovik V.S., Korolev I.G., Kachaev A.E., Shentseva M.E., Orekhova T.N. Rotary mill. Patent RF, no. 2444407, 2012. (rus)

23. Kachaev A.E., Sevostyanov V.S., Chemerichko G.I., Orekhova T.N. Mathematical description of the dynamics of centrifugal two-phase flow in the grinding chamber of a disintegrator [Matematicheskoye opisaniye dinamiki tsentrobezhnogo dvukhfaznogo potoka v pomol'noy kamere dezintegratora]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.

2024. No. 2. Pp. 70–79. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-2-70-79 (rus)

24. Krasnov N.F. Aerodynamics. Part 1. Basics of the theory. Aerodynamics of the profile and wing. Textbook for technical colleges [Aerodinamika. Ch.1. Osnovy teorii. Aerodinamika profilya i kryla. Uchebnik dlya VTUZov]. Ed. 2nd revision and additional M.: Higher school. 1976. 384 p. (rus)

25. Smulsky I.I. Suspended layer of particles in a cylindrical vortex chamber [Vzveshennyy sloj chastits v tsilindricheskoy vikhrevoy kamere]. Journal of Applied Chemistry. 1983. No. 8. Pp. 1782–1789. (rus)

26. Bagnold R.A. Experiments on a gravity Free Dispersion of large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear. Proc. Roy Soc. London. 1954. Vol. 225. Pp. 49–63.

27. Kolobov M.Yu., Chagin O.V., Blinichev V.N. Increase of Longevity of Working Organs of Centrifugal-Shock Grinding Down. Russian Journal of General Chemistry. 2021. Vol. 91(6). Pp. 1205–1208.

28. Sivachenko L.A., Titov D.V., Sivachenko T.L. Disintegrator technologies, their technical availability and development prospects [Dezintegratornyye tekhnologii, ikh tekhnicheskaya obespechennost' i perspektivy razvitiya]. Energy-saving technological complexes and equipment for the production of building materials: interuniversity collection of articles. Belgorod: BSTU, 2009. Pp. 228–233. (rus)

29. Revnivitsev V.I. Selective destruction of materials [Selektivnoye razrusheniye materialov]. M.: Nedra. 1988. 386 p. (rus)

30. Krupin S.V., Trofimova F.A. Colloidal chemical foundations for creating clay suspensions for oilfield business [Kolloidno-khimicheskiye osnovy sozdaniya glinistyx suspenziy dlya neftepromyslovogo dela]. Kazan State Technological University, Central Research Institute of Geology of Nonmetallic Minerals. Kazan: Kazan National Research Technological University (KNRTU). 2010. 411 p. (rus)

Information about the author

Kachaev, Aleksandr E. PhD, Head of the Department of Construction Production. E-mail: doctor_cement@mail.ru. Kolomna Institute (branch) of Moscow Polytechnic University. Russia, 140402, Moscow region, Kolomna, st. October Revolution, building 408.

Received 13.02.2024

Для цитирования:

Качаев А.Е. Математическая модель вихревого движения двухфазного потока в дезинтеграторной мельнице // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №4. С. 79–90. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-79-90

For citation:

Kachaev A.E. Mathematical model of vortex motion of two-phase flow in a disintegrator mill. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 4. Pp. 79–90. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-79-90

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-91-99

Корчагин О.А.

ООО НПФ «Политех»

E-mail: koroleg@inbox.ru

КОНСТРУКТИВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ОБМОТКАМИ СТАТОРА И ЗУБЧАТЫМ БЕЗОБМОТОЧНЫМ РОТОРОМ

Аннотация. Рассмотрены вопросы обоснования и выбора базовых конструктивных соотношений индукционных машин с однозубцовыми обмотками, которые могут входить в состав вновь разрабатываемых мехатронных систем.

Обоснованные в данной работе соотношения могут быть применены при разработке новых мехатронных систем, особенно при часто встречающейся на практике задаче разработки мехатронных модулей под заданные габариты, что требует разработки как двигателей, так и новых датчиков угла и скорости. Кроме того, еще более актуальной такая задача становится при задании жестких условий эксплуатации, таких как низкие и высокие температуры, удары, вибрации, работа в погружных сервоприводах, заполненных маслом. Все это делает затруднительным или невозможным использование ряда других, неэлектромеханических датчиков, таких, например, как оптические, дискретные датчики Холла, что дополнительно сужает номенклатуру покупных изделий для встраивания в заданные габариты модуля.

Рассмотренные соотношения позволяют реализовывать датчики не только под разные габариты изделий, но и учитывать назначение, требования по точности, проектировать измерители с разной электрической редукицией, с разным числом фаз. Дополнительным преимуществом разработки датчиков по указанным соотношениям является технологичность, простота и скорость разработки и возможность быстрого запуска в производство.

Кроме того, выведенные соотношения позволяют проектировать не только датчики угла, но и датчики скорости, а также электродвигатели и генераторы, что может быть востребовано в ряде специальных случаев, например, при необходимости минимизации момента инерции ротора двигателя, и для построения высокоскоростных машин.

Ключевые слова: электромашины с сосредоточенными обмотками, индукторные электромашины, соотношения между зубцами статора и ротора индукторных электрических машин, редуктоины, электромашины с пассивным ротором.

Введение. Далее в данной статье рассматриваются электромашины с первичной и вторичной обмоткой на статоре с зубчатым безобмоточным ротором. Существуют различная терминология при их описании. В [1, 2] данные электромашины классифицируются как «субсинхронные», далее в рамках данного класса рассматриваются различные типы электродвигателей с различным числом пар полюсов первичных и вторичных обмоток статора. Отметим, что также широко используются другие обозначения для данного класса двигателей, в [3] используется термин «индукторные двигатели», а в [4] используется термин электрические машины с «электромагнитной редукицией». Традиционно данные электромашины рассматриваются с общим случае с распределенной обмоткой, и как частный случай с сосредоточенной. В [1, 2] приведены соотношения между зубцами статора и ротора таких электромашин с учетом пар полюсов первичной и вторичной обмотки. Заметим, что само название двигателя с «электромагнитной редукицией», указывает их назначение, такая электромашина

позволяет значительно понизить частоту вращения ротора по сравнению с частотой сети, что важно в неуправляемом электроприводе, так как позволяет исключить редуктор.

В данной статье построение данных электромашин рассматривается в приложении к использованию в мехатронных системах. Важность вопроса разработки новых изделий такого типа в составе мехатронного модуля вытекает из того, что актуальной задачей является разработка мехатронных модулей, встраиваемых в систему, что приводит к необходимости разработки всех элементов, как исполнительных, так и информационных, также под заданные габариты.

В настоящее время возможность электромагнитной редукиции частоты питания электродвигателя не является определяющей. Действительно, предположим требуется построить тихоходный мехатронный модуль. Распространенное в настоящее время использование инвертора с промежуточным электронным преобразованием частоты питания в звено постоянного тока позво-

ляет запитывать обмотки двигателя теми частотами, которые требуются по условиям его функционирования. При этом проблемы обеспечения качественных низких и сверхнизких скоростей в этом случае уходят в область проблем реализации схемы управления мехатронной системы и использования датчиков. Таким образом, для исполнительного двигателя мехатронного управляемого модуля важна не степень редукции частоты вращения, а энергетические характеристики, такие как развиваемые момент, мощность, к.п.д. и т.д., что определяет требуемые габариты. Отметим, что в энергетических характеристиках данный класс электромашин с пассивным зубчатым ротором скорее проиграет электродвигателям с возбуждением на постоянных магнитах. Тем не менее вопрос рассмотрения указанных электромашин актуален.

Отметим востребованность компоновки мехатронного модуля информационными электромашинами, даже при широком распространении различных бездатчиковых алгоритмов управления. Так в случае работы в широком диапазоне скоростей, при предъявлении требований при нулевой скорости, а также при необходимости разработки позиционных сервоприводов, необходимо в конструкции мехатронного модуля предусматривать датчики положения, а иногда, и датчики скорости.

При этом в случае необходимости использования мехатронного модуля в жестких условиях эксплуатации целесообразно применение электромеханических датчиков, которые позволяют работать не только при самых низких или высоких температурах, при сильных вибрациях и ударах, но и работать в погружных мехатронных модулях, заполненных маслом под давлением. Кроме того, электромеханические датчики при применении во вновь разрабатываемых изделиях имеют дополнительные преимущества, так как технологичны и просты в производстве, требуют минимум компонентов, могут быть достаточно быстро разработаны и запущены в производство.

Среди различных типов электромеханических датчиков выделим датчики редуктосины. Данные датчики имеют ряд преимуществ: минимальный момент инерции, малые габариты, пассивный ротор, что позволяет работать при любых углах поворота, отсутствие скользящих контактов, и как следствие надежность. Отметим, что СКВТ с возбуждением на роторе с использованием трансформатора также не имеют скользящих контактов, при этом имеют значительно большие осевые размеры, преимуществом редуктосина в этом случае является малый осевой раз-

мер датчика, что также упрощает его встраиваемость в конструкцию мехатронного модуля, а также повышает жесткость конструкции ротора.

Указанные характеристики датчиков редуктосинов делают их востребованным компонентом мехатронных модулей, и при их разработке могут быть использованы теоретические выкладки, разработанные для двигателей с электромагнитной редукцией, так как данные машины соответствуют друг другу по сути физического функционирования. Отметим, что и для редуктосина-датчика так же важна не степень редукции частоты вращения по отношению к частоте питающей сети, а важна степень редукции электрических сигналов в обмотке управления относительно механической частоты вращения ротора, которая зависит от числа зубцов ротора, так как эта характеристика напрямую влияет на точность датчика. В [1] на основе выведенных соотношений для субсинхронных двигателей рассматриваются соотношения между числом зубцов статора и ротора для синусно-косинусных индукционных редуктосинов. Примером работы, использующей данные соотношения субсинхронных электрических машин для рассмотрения датчиков-редуктосинов является [5]. В редуктосинах важными параметрами помимо числа зубцов ротора является число повторяющихся частей, что сильно сказывается при наличии эксцентриситета, кроме того необходимо учитывать число фаз, и другие характеристики, влияющие на форму выходного сигнала датчика, и его точность, что показано, например, в [6,7]. В данных работах рассматриваются вопросы построения датчиков, и приводятся наиболее рациональные и рекомендуемые для практики соотношения чисел зубцов статора и ротора, с дальнейшим анализом влияния числа повторяющихся частей или электрической редукции на точность. Отметим, что точность датчиков определяется, не только конструктивными соотношениями, но и алгоритмами обработки, а также режимами работы индукторных датчиков. Например, [8] рассмотрены редукционные фазовращатели, в том числе и редуктосины.

Заметим, что в данный класс электромашин помимо двигателей и редуктосинов входят и датчики скорости (тахогенераторы), которые также применяются в составе мехатронных модулей, что может быть востребовано при требованиях высокого качества регулирования как на низких скоростях вращения (позиционирование), так и при высоких скоростях, на которых уже невозможно получить качественный сигнал скорости, с индукторного датчика угла. Режимы работы индукторных датчиков приведены в [9].

Много работ и изобретений в данной области сосредоточено либо на повышении точности

за счет применения различных конструктивных мер датчиков с выбранными тем или иным образом соотношениями между зубцами статора и ротора [10–14]. Заметим, что вопрос повышения точности при разработке индукционного датчика для новой мехатронной системы не является единственным, на первый план при разработке новой системы могут выходить вопросы встраиваемости в новую систему, обеспечения требуемой электрической редукции, минимизации момента инерции, а, следовательно, разработчик мехатронной системы может выходить за рамки рекомендованных соотношений, соответствующих максимальной точности. Это возможно, так как на практике мехатронные модули крайне разнообразны по назначению, и реализация максимальной точности перемещения, на которую ориентированы многие работы, посвященные датчикам, на практике не является единственным критерием.

Действительно в случае построения позиционного сервопривода характеристика точности позиционирования является одной из основных. С другой стороны, в случае построения скоростных мехатронных модулей, например, привод насоса, позиционный режим вообще не требуется, но при этом может требоваться развитие максимального момента с нулевых скоростей при запрете движения в неправильную сторону. При такой постановке вопроса, не требуется высокоточный датчик главной обратной связи, но требуется датчик положения вала двигателя, для обеспечения максимального момента на любых скоростях (в том числе при запуске), так как реализация бездатчикового управления при таких требованиях становится проблемной.

В данной статье при сохранении общего со статьей [15] подхода рассмотрено обоснование общих конструктивных соотношений статора и ротора в индукторных электрических машинах с пассивным ротором, радиальным возбуждением и сосредоточенными обмотками, что расширяет возможности разработчика по проектированию встроенных в конструкцию мехатронных компонентов. Обоснованные в статье соотношения могут являться базой проектирования для последующих этапов расчета, особенно с учетом широкого распространения сеточных пакетов проектирования, в которых могут быть детально учтены требования назначения изделия, и промоделированы как электромагнитные параметры, так и достижимая точность.

Анализ соотношений между статором и ротором индукторных машин

При анализе соотношений для статора и ротора в данном классе машин будем исходить из следующих исходных положений:

1) электромашина имеет сосредоточенные обмотки на статоре;

2) ротор имеет зубцы, и не содержит источников намагничивающей силы, таких как магниты и обмотки возбуждения

3) статор имеет два типа обмоток: возбуждение и съема или управления (в зависимости от назначения машины датчик или двигатель соответственно);

4) возбуждение машины – радиальное.

Последний пункт требует дополнительного уточнения. Далее примем, что для рассматриваемых в данной статье электрических машин с сосредоточенной обмоткой при радиальном возбуждении машины каждый зубец статора формирует полюс системы возбуждения со знаком «+» или «-», что может быть обеспечено либо при использовании катушек возбуждения, либо магнитами. При этом неравномерное распределение числа витков по полюсам возбуждения не рассматривается, таким образом все полюса возбуждения одинаковы и отличаются только знаком созданного потока. По сути функционирования электромашины минимальная дискретная единица обмотки съема (управления) должна также охватывать как зуб с возбуждением «+», так и «-», то есть также два зубца статора. Далее воспользуемся выведенной в [15] зависимостью:

$$p = \frac{z}{km} (n \pm im) \quad (1),$$

где p – число пар полюсов ротора; z – число зубцов статора; m – число фаз статора; k – число зубцов в фазной группе; i – любое целое число; $\frac{n}{m}$ – является несократимой дробью, при этом n – также целое число;

В электромашине с пассивным ротором число зубцов ротора – это аналог числа пар полюсов формулы (1), обозначим его « Z_p ». Каждую фазу управления (съема) формируют два зубца статора, обозначим « Z_{CT} » – число зубцов статора. Таким образом, единицей m -фазной системы является не число z (число зубцов в электромашине с возбуждением на роторе), а число $\frac{Z_{CT}}{2}$, что в два раза меньше числа z . Следовательно, соотношение (1) для рассматриваемых индукционных машин можно переписать в следующем виде:

$$Z_p = \pm \frac{Z_{CT}}{2mk} \cdot (n \pm im) \quad (2)$$

На рисунке 1 приведена трехфазная электрическая информационная машина – редуктосин с электрической редукцией 4, который построен по

соотношению: $4 = + \frac{6}{2 \cdot 3 \cdot 1} \cdot (1 + 1 \cdot 3)$. Электрический угол между фазными группами равен $\frac{360^\circ}{3} \cdot 4 = 480^\circ$ или 120° электрических градусов, что позволяет образовывать симметричную 3-х фазную систему.

Отметим, что, формула (2) определяет соотношения между двухфазными группами, но для правильного функционирования электромашины необходимо обеспечить расположение одного зубца статора напротив паза ротора, а другого напротив зубца ротора, что обеспечивает сдвиг фаз на зубцах внутри двух-зубцовой группы, равный 180° , и минимизирует высшие гармоники, что выполнено на рисунке 1.

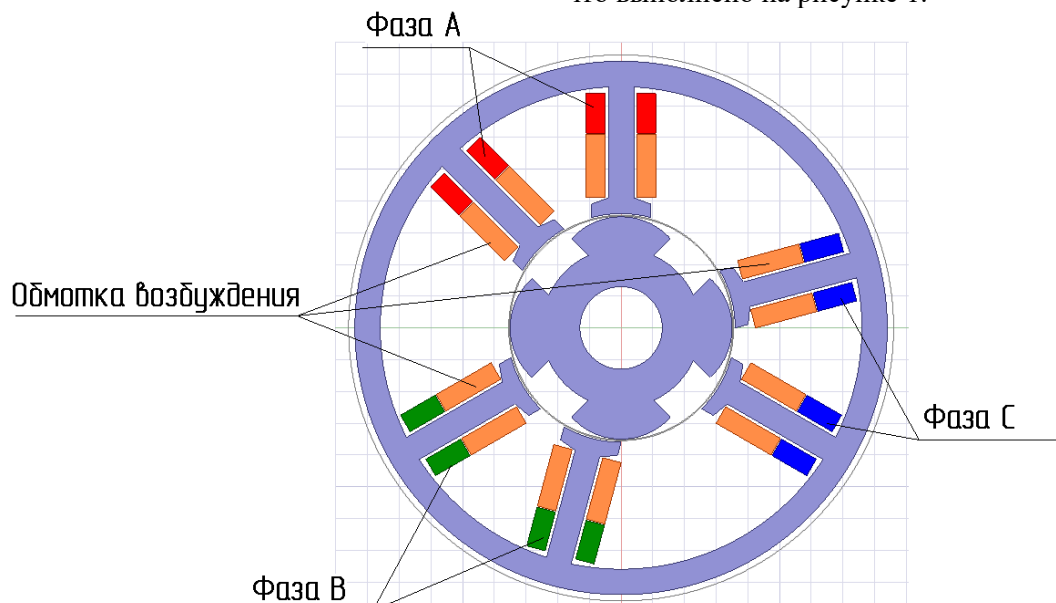


Рис. 1. Модель трехфазной индукционной электромашины с неравномерным шагом

Данная особенность электромашины приводит либо к неравномерному шагу по статору, как на рисунке 1, либо может быть реализована конструкция, представленная в виде развертки в [4] с двумя слоями зубцов (малые и большие) и является определенным недостатком данного варианта, так как приводит к усложнению обмотки, а с другой стороны к снижению числа витков.

Можно заметить одну особенность при рассмотрении электромашины с четным числом фаз. Там, где число фаз равно 4, 6, 8 и т.д., всегда существуют две фазы, сдвинутые на 180° электрических градусов, внутри каждой из которых, как указано выше, находится двухзубцовая группа, содержащая, также сдвиг на 180° электрических градусов. Это можно использовать для создания индукционных машин другой конструкции, где в одну фазу соединяются не смежные две катушки, находящиеся напротив зубца и паза ротора, а две катушки диаметрально противоположных фаз.

Преимуществом такого подхода является то, что не требуется создавать переменный шаг по статору, что упрощает обмотку и делает ее единообразной для всей электрической машины. При этом не требуется использование числа 2 в знаменателе формулы (2), а число m в этом случае можно трактовать как число полу-фаз элек-

трической машины, которые объединяясь попарно с противоположными, образуют полноценную ($m/2$) фазную систему. При этом как уже указано необходимо, чтобы число m , было четным.

Таким образом, соотношение (2) можно переписать в виде (3):

$$Z_p = \pm \frac{Z_{CT}}{2mk} \cdot (n \pm im) \text{ при любом } m \quad (3)$$

$$Z_p = \pm \frac{Z_{CT}}{mk} \cdot (n \pm im) \text{ при четном } m,$$

При этом по формуле в верхней части соотношения (3) формируется симметричная m -фазная электромашина, по формуле нижней части формируется симметричная $\frac{m}{2}$ -фазная электромашина.

Приведем пример построения датчика по обоим формулам соотношения (3) на примере датчика с редукцией 5, соотношения датчиков и сравнение вариантов приведены в таблице 1.

В таблице 2 приведены ЭДС фаз обоих датчиков, при этом датчики имеют одинаковые размеры, схемы возбуждения, частоту запитки сигналов и одинаковый диаметр провода намотки, но разное число витков, так как при равномерном шаге повышается коэффициент заполнения паза.

Таблица 1

Сопоставление реализации датчика с редукцией 5 по ротору в 3-х фазном и 6-ти фазном варианте

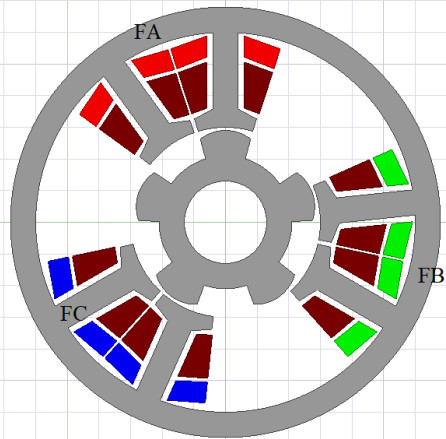
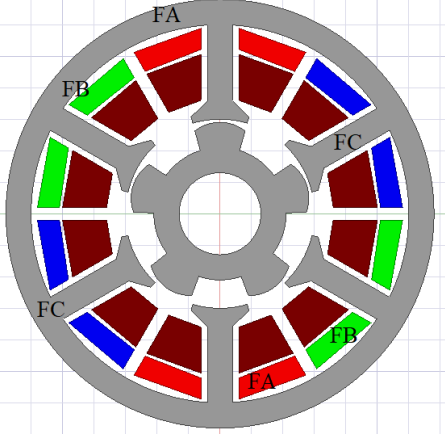
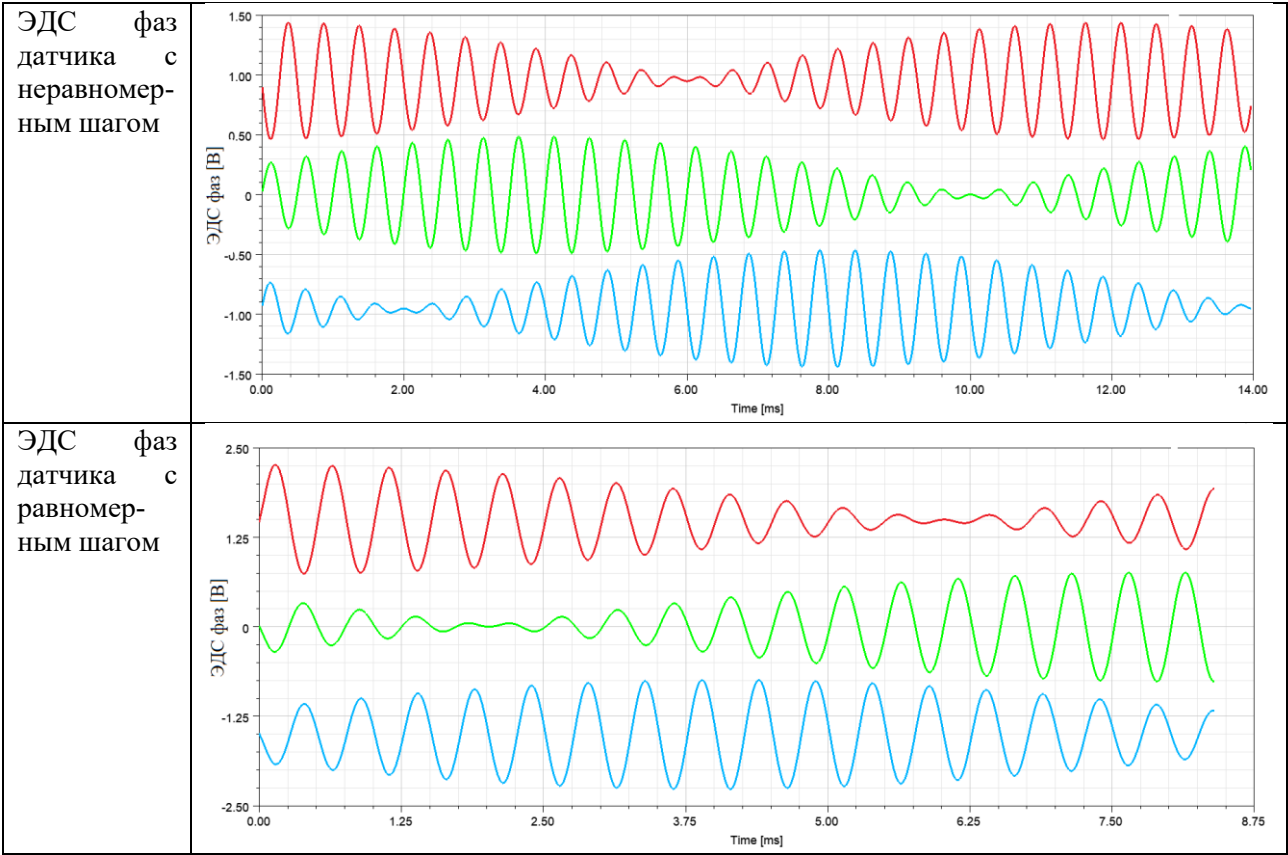
Соотношение	$Z_p = \pm \frac{Z_{CT}}{2mk} \cdot (n \pm im); 5 = \frac{6}{2 \cdot 3 \cdot 1} \cdot (2 + 1 \cdot 3)$	$Z_p = \pm \frac{Z_{CT}}{mk} \cdot (n \pm im); 5 = -\frac{6}{6 \cdot 1} \cdot (1 - 1 \cdot 6)$
Параметры	$Z_p=5; Z_{CT}=6; m=3; n=2; i=1; k=1;$	$Z_p=5; Z_{CT}=6; m=6; n=1; i=1; k=1;$
Общий вид датчика		

Таблица 2

ЭДС съема фаз 3-х фазного и 6-ти фазного датчика при возбуждении синусоидальным током



Кроме лучшего коэффициента заполнения датчик с равномерным шагом зубцов имеет более простую укладку обмоток, более технологичен, имеет большую крутизну сигналов, и соотношение сигнал/шум, что видно при сравнении сигналов в таблице 2.

Как пример построения датчика по формуле (3) с четным числом фаз можно привести датчик, описание которого дано в [4] на с. 145. На рисунке 2 приведен общий вид данного датчика, представленного в [4] на рисунке 6.1.

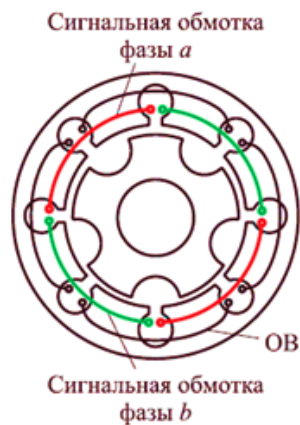


Рис. 2. Пример датчика с четным числом фаз и равномерным шагом

Датчик построен по соотношению $Z_p = \pm \frac{Z_{ст}}{mk} \cdot (n \pm im)$ (четное $m=4$), при следующих параметрах: $Z_p=5$; $Z_{ст}=8$; $m=4$; $n=1$; $i=1$; $k=2$, что образует следующее равенство $5 = \frac{8}{4 \cdot 2} \cdot (1 + 1 \cdot 4)$.

Особенностью данного датчика является то, что используется 2 зубца в фазной группе. Из рисунка 2 хорошо видно, что, например, для каждого зубца фазы «а» противоположный, т.е. 5-й по счету зубец является как раз полу-фазой, перевернутой на 180° , что позволяет из четырех полу-фаз формировать правильную 2-х фазную систему, при этом за счет равномерности шага обеспечивается хороший коэффициент заполнения обмоткой и упрощается намотка датчика.

Соотношения (3) создают для разработчика основу для дальнейшего проектирования, задачей которого является выбор из данных соотношений тех, которые будут наиболее подходящими для проектируемой системы, и может быть применена как к исполнительным индукторным электродвигателям, так и к редуктосинам и тахометрам с пассивным ротором.

В качестве еще одного примера использования выражения (3) при нечетном числе фаз приведем индукционный датчик, описанный в [4] в разделе 6.2, который был разработан, практически изготовлен и исследован. Данный датчик построен по следующему соотношению: $Z_{ст} = 56$; $Z_p = 64$; $m=7$ с переменным шагом по статору, который соответствует выражению:

$$64 = \frac{56}{2 \cdot 7} \cdot (2 + 2 \cdot 7) \quad (4), \text{ в котором } i=2, n=2,$$

$k=1$. В данном случае введение $i=2$, позволяет значительно поднять электрическую редукцию,

что положительно сказывается на точности датчика.

Отметим, что в значительном числе случаев, разработчику требуется спроектировать измерительную электромашину (датчик или тахометр) с нужной электрической редукцией, но при этом, имеющую стандартный двухфазный синусно-косинусный выход. Это может быть связано с ограниченностью каналов обработки, например, входов АЦП микроконтроллера, или с ограниченной возможностью прокладки витых пар под каждую фазу датчика, или малым количеством контактов разъема и т.д. В этом случае преимуществом разработчика, проектирующего новую встраиваемую электромашину под заданные габариты мехатронного модуля является то, что для новой системы можно спроектировать m -фазную измерительную электромашину (например, 5,6,7-фазную), выполнить ее детальный анализ методами конечных элементов, и привести данную машину к 2-ух фазной с помощью подбора витков в m -фазной системе.

Таким образом, число витков на каждом зубце двухфазной системы определяется проекцией этого зубца как фазы m -фазной системы на оси двухфазной системы, расположенные под 90 градусов. Преимуществом этого варианта является компактность выводов, совместимость со стандартными синусно-косинусными алгоритмами обработки. Недостатком является усложнение обмотки, так как вместо расположения m одинаковых катушек фаз на зубцах, требуется на каждом зубце расположить 2 типа катушек съема, в каждом из которых число витков определено как проекция данной фазы из m -фазного набора на оси двухфазной системы.

Выводы. Предложены соотношения, для построения исполнительных и измерительных компонентов мехатронных приводных модулей, реализованных на индукторных электрических машинах с сосредоточенными обмотками и пассивным зубчатым ротором.

Выведенные соотношения позволяют проектировать индукторные двигатели, тахометры, редуктосины, что позволяет разрабатывать данные компоненты под габариты, заданные конструкцией мехатронного модуля.

Рассмотрено влияние четности/нечетности фаз электромашины на конструкцию машины, что может быть использовано при построении встраиваемых в конструкцию электромашин. Отмечено преимущество использования электромашин с четным числом фаз, что позволяет использовать равномерный шаг по статору, более простую укладку обмотки, при этом электромашина имеет большую крутизну сигнала, что особенно

актуально при малых габаритах, используемых под измерительную систему.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики: Учебник для вузов. 2-изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1985. 368 с., ил.
2. Каасик П.Ю. Тихоходные безредукторные микроэлектродвигатели. Л.: Энергия 1974 г. 136 с.
3. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2010. 350с.
4. Баранов М.В., Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржавов Б.Н. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 240 с.
5. Тазов С.Г. Моделирование индукционных редуктосинов: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.01 Санкт-Петербург., 2003. 157 с.
6. Ахметжанов А.А. Высокоточные системы передачи угла автоматических устройств. Учеб. Пособие для вузов. М., «Энергия», 1975. 288 с.
7. Ахметжанов А.А., Кочемасов А.В. Следящие системы и регуляторы. М., Энергоатомиздат, 1986. 288 с.
8. Шатова Ю.А. Редукционные электромагнитные фазовращатели и информационно-измерительные системы на их основе: дис. ... канд. тех. наук: 05.11.16 Пенза., 2009. 211 с.
9. Опалев Ю.Г. Вентильные электродвигатели для прецизионных быстродействующих приводов мехатронных технологических модулей: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.01 Чебоксары., 2011. 198 с.
10. Пат. 1557641, СССР, МПК Н 02 К 24/00. Индукционный редуктосин / В.А. Батыгин, В. М. Гладких; заявитель предприятие п/я В-8708. № 4455799; заявл. 06.07.1988; опубл. 15.04.1990, Бюл. №14. 3с.
11. Пат. 1584042, СССР, МПК Н 02 К 24/00. Индукционный редуктосин / О.П. Белавин, А.В. Булеков, Н.Н. Левин, В.Д. Смирнов, А.Д. Серебряков; заявитель Рижский институт инженеров гражданской авиации им. Ленинского комсомола. № 4377341; заявл. 10.02.1988; опубл. 07.08.1990, Бюл. №29. 4 с.
12. Пат. 193505, Россия, МПК Н 02 К 24/00. Бесконтактный синусно-косинусный вращающийся трансформатор (резольвер) / А.А. Афанасьев, В. А. Ваткин, А.Н. Матюхин, Патентообладатель Акционерное общество "Чебоксарский электроаппаратный завод". №2019127148; заявл. 27.08.2019; опубл. 31.10.2019, Бюл. №31. 5с.
13. Пат. 194081, Россия, МПК Н 02 К 24/00. Двухотсчетный индукционный редуктосин / О.А. Бунин, Н.Ю. Евтухов; патентообладатель акционерное общество «Завод «Фиолент». № 2019130537; заявл. 25.09.2019; опубл. 28.11.2019, Бюл. №34. 11 с.
14. Пат. 1798865, СССР, МПК Н 02 К 24/00. Индукционный редуктосин / А.Р. Гуль, О.К. Епифанов, В.Н. Зверева, В.В.Иванов; заявитель Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор». № 4856160; заявл. 01.08.1990; опубл. 28.02.1993, Бюл. №8. 2 с.
15. Корчагин О.А. Связь параметров статора и ротора в электрических машинах мехатронных систем с сосредоточенными обмотками статора и возбуждением на роторе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №1. С. 104–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-104-111

Информация об авторах

Корчагин Олег Александрович, зам. главного конструктора. E-mail: koroleg@inbox.ru. ООО НПФ «Политех». 123001, Россия, г. Москва, Малый Патриарший переулок, д.-39

Поступила 18.02.2024 г.

© Корчагин О.А., 2024

Korchagin O.A.
NPF Polytech LLC
E-mail: koroleg@inbox.ru

CONSTRUCTIVE RELATIONS IN ELECTRIC MACHINES OF MECHATRONIC SYSTEMS WITH CONCENTRATED STATOR WINDINGS AND A TOOTHE NON-WINDING ROTOR

Abstract. The issues of substantiation and selection of basic design relationships of induction machines with single-tooth windings, which can be part of newly developed mechatronic systems, are considered.

The relationships substantiated in this work can be applied in the development of new mechatronic systems, especially when the task of developing mechatronic modules for specified dimensions is often encountered in practice, which requires the development of both motors, new angle and speed sensors. In addition, this task becomes more urgent when setting harsh operating conditions, such as low and high temperatures, shocks, vibrations, and operation in submersible servos filled with oil. All this makes it difficult or impossible to use a number of other non-electromechanical sensors, such as optical, discrete Hall sensors, which further narrows the range of purchased products for embedding in the specified dimensions of the module. The considered ratios allows to implement sensors not only for different product dimensions, but also to take into account the purpose, accuracy requirements, and design meters with different electrical reduction, with different number of phases. An additional advantage of developing sensors according to these ratios is manufacturability, simplicity and speed of development and the ability to quickly launch into production.

In addition, the derived ratios make it possible to design an angle sensors, speed sensors, as well as electric motors and generators, which may be in demand in a number of special cases, for example, if it is necessary to minimize the moment of inertia of the motor rotor and to build high-speed machines.

Keywords: *electric machines with concentrated windings, inductor electric machines, the ratio between the teeth of the stator and rotor of inductor electric machines, resolver, electric machines with a passive rotor.*

REFERENCES

1. Khrushchev V.V. Electric machines of automation systems: Textbook for universities [E'lektricheskie mashiny' sistem avtomatiki: Uchebnik dlya vuzov]. 2nd ed., revised. and additional information: Energoatomizdat. Leningr. publishing House, 1985. 368 p. (rus)
2. Kaasik P.Yu. Low-speed gearless microelectromotors [Tixoxodny'e bezreduktorny'e mikro'e'lektrodvigateli]. Leningrad: Energiya 1974. 136 p. (rus)
3. Voldek A.I., Popov V.V. Electric machines. AC machines: A textbook for universities [E'lektricheskie mashiny'. Mashiny' peremennogo toka: Uchebnik dlya vuzov]. St. Petersburg: St. Petersburg, 2010. 350 p. (rus)
4. Baranov M.V., Brodovsky V.N., Zimin A.V., Karzhavov B.N. Electric tracking drives with torque control of executive motors: Monograph [E'lektricheskie sledyashhie privody' s momentny'm upravleniem ispolnitel'ny'mi dvigatelyami: Monografiya]. M.: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2006. 240 p. (rus)
5. Tazov S.G. Modeling of resolver [Modelirovanie indukcionny'x reduktosinov]. Candidate's thesis. St. Petersburg, 2003, 157 p. (rus)
6. Akhmetzhanov A.A. High-precision angle transmission systems of automatic devices. Studies. Handbook for universities [Vy'sokotochny'e sistemy' peredachi ugla avtomaticheskix ustroystv. Ucheb. Posobie dlya vuzov]. M.: Energy. 1975. (rus)
7. Akhmetzhanov A.A., Kochemasov A.V. Tracking systems and regulators: Textbook. Handbook for universities [Sledyashhie sistemy' i regulatory': Ucheb. Posobie dlya vuzov]. M.: Energoatomizdat, 1986. (rus)
8. Shatova Yu.A. Reduction electromagnetic phase shifters and information and measurement systems based on them [Redukcionny'e e'lektromagnitny'e fazovrashhateli i informacionno-izmeritel'ny'e sistemy' na ix osnove]. Candidate's thesis. Penza, 2009. 211 p. (rus)
9. Opalev Yu.G. Valve electric motors for precision high-speed drives of mechatronic technological modules [Ventil'ny'e e'lektrodvigateli dlya precizionny'x by'strodejstvuyushhix privodov mexatronny'x texnologicheskix modulej]. Candidate's thesis. Cheboksary, 2011. 198 p. (rus)
10. Batygin V.A., Gladkikh V. M. Resolver [Induction reductosin]. Patent USSR no. 1557641, 1990. (rus)
11. Belavin O.P., Bulekov A.V. Resolver [Induction reductosin]. Patent USSR no. 1584042, 1990. (rus)
12. Afanasyev A.A., Vatin V.A., Matyukhin. A.N. Contactless sine-cosine rotating transformer (resolver) [Beskontaktny'j sinusno-kosinusny'j vrashhayushhijsya transformator (rezol'ver)]. Patent RF no. 193505, 2019. (rus)
13. Bunin O.A., Evtukhov N.Yu. Two-account resolver [Dvuxotschetny'j indukcionny'j reduktosin]. Patent RF no. 194081, 2019. (rus)
14. Gul A.R., Epifanov O.K., Zvereva V.N., Ivanov V.V. Resolver [Induction reductosin]. Patent USSR no. 1798865, 1993. (rus)
15. Korchagin O.A. Relationship of stator and rotor parameters in electric machines of mechatronic systems with concentrated stator windings and excitation on the rotor. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 1. Pp. 104–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-104-111 (rus)

Information about the authors

Korchagin, Oleg A. Chief Designer. E-mail: koroleg@inbox.ru. NPF Polytech LLC, Moscow, 123001, Russia, Moscow, Maly Patriarchal alleyway, d3-39

Received 18.02.2024

Для цитирования:

Корчагин О.А. Конструктивные соотношения в электрических машинах мехатронных систем с сосредоточенными обмотками статора и зубчатым безобмоточным ротором // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №4. С. 91–99. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-91-99

For citation:

Korchagin O.A. Constructive relations in electric machines of mechatronic systems with concentrated stator windings and a toothe non-winding rotor. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 4. Pp. 91–99. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-91-99

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-100-106

Хурматуллин С.Р., Каменов Р.У.Альметьевский государственный нефтяной институт***E-mail: salikamirmama6@gmail.com)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУЖКИ

Аннотация. Современное машиностроение является одной из ключевых отраслей промышленности, определяющей технологический прогресс и конкурентоспособность производства.

При разработке и совершенствовании машин и оборудования в машиностроении важную роль играют исследования в области формирования стружки при лезвийной обработке. Формирование стружки – это процесс удаления материала с помощью режущего инструмента, который может быть лезвием или фрезой. Качество и характеристики стружки напрямую влияют на эффективность и качество обработки, а также на износ инструмента и стабильность процесса.

Изучение влияния скорости резания на формирование стружки при лезвийной обработке является одним из важных аспектов в улучшении производственных процессов. Скорость резания определяет скорость перемещения инструмента относительно обрабатываемого материала. При увеличении скорости резания происходит ускорение процесса формирования стружки и увеличение тепловыделения. Это может привести к повышению трения между инструментом и обрабатываемым материалом, что может негативно сказаться на качестве обработки и сроке службы инструмента.

Моделирование с использованием программного комплекса Deform-2D позволяет анализировать влияние скорости резания на характеристики стружки. Результаты моделирования показали, что при увеличении скорости резания происходит переход стружки от сливной формы к сегментной. Этот переход может быть связан с изменениями в контактном взаимодействии между инструментом и материалом, а также с изменением температуры резания.

Ключевые слова: моделирование, скорость резания, лезвийная обработка, формирование стружки, Deform-2D, сливная стружка, сегментная стружка.

Введение. К деталям предъявляют высокие требования по качеству, в частности к точности размеров и форм, и шероховатости обработанной поверхности. Существующий мировой опыт механической обработки титановых сплавов охватывает широкий круг вопросов, связанных с требованиями к металлорежущему оборудованию и инструменту, режимам обработки и т. д. [1, 2]. Механическая обработка титановых сплавов настолько важна, потому что эти материалы широко используются в авиации, медицинской промышленности, автомобилестроении, и других отраслях, где требуется высокая прочность и стойкость к коррозии. Работа с этими сплавами предъявляет большие вызовы из-за их материальных свойств, таких как низкая теплопроводность и высокая адгезия к режущему инструменту, что требует особого внимания при механической обработке.

Важным фактором при механической обработке титановых сплавов является точность размеров и формы, а также шероховатость обработанной поверхности. Для обеспечения этой точности требуются высокоточное металлорежущее оборудование и инструменты. Режимы обработки, такие как скорость резания, подача инструмента и глубина резания должны быть оптимально настроены, чтобы получить требуемые характеристики обработанных деталей.

В связи с этим, проведение исследований и опытных работ на предмет оптимизации процессов обработки титановых сплавов является важным направлением, заинтересовавшим множество специалистов в области машиностроения и материаловедения. Путем изучения влияния режимов обработки на качество изделий и шероховатость обработанной поверхности, а также разработкой новых методов и инструментов, можно улучшить процессы обработки и повысить качество изготавливаемой продукции.

В современном машиностроении вопросы оптимизации производственных процессов и повышения качества изделий играют решающую роль в конкурентной борьбе на рынке. Одним из важнейших аспектов является лезвийная обработка материалов, процесс, который играет ключевую роль в формировании деталей с заданными параметрами. Важным аспектом лезвийной обработки материалов является стремление к достижению заданных параметров изделий, таких как точность размеров, формы и шероховатости обработанных поверхностей. Точность и качество этих параметров оказывают существенное влияние на конечное качество продукции и ее конкурентоспособность на рынке.

Исследования показывают, что наиболее значимым фактором, влияющим на процесс формирования стружки при лезвийной обработке,

является скорость резания [3]. Именно скорость резания существенным образом определяет характеристики стружки и, как следствие, качество обработанной поверхности.

Скорость резания играет критическую роль в процессе механической обработки материалов, особенно при лезвийной обработке. Она влияет на формирование стружки и, как следствие, на качество обработанной поверхности. Исследования показывают, что увеличение скорости резания сопровождается увеличением тепловых нагрузок на зону резания, что приводит к изменению характеристик стружки и обработанной поверхности. Например, увеличение скорости резания приводит к более интенсивному пластическому деформированию материала, что влияет на формирование различных типов стружки. При этом, важно отметить, что при низких скоростях резания преобладает образование сливной стружки, в то время как увеличение скорости резания может привести к формированию элементной стружки, которая обладает более благоприятными характеристиками для удаления и переработки.

В процессе исследования было установлено, что изменение скорости резания приводит к существенным изменениям в форме и структуре образующейся стружки. Ранее проведенные исследования также указывали на нелинейную зависимость между скоростью резания и формой стружки [4].

Цель настоящего исследования заключается в моделировании влияния скорости резания на процесс формирования стружки при лезвийной обработке с использованием программного комплекса Deform-2D [5]. Программа Deform-2D предназначена для моделирования процессов с объёмным напряженным состоянием, таких какковка, объёмная штамповка, волочение, прокатка, прессование и др. [6]. Deform-2D представляет собой мощный инструмент для моделирования процессов металлообработки с учетом объёмного напряженного состояния. Она разрабатывалась с целью анализа различных типов металлообрабатывающих процессов, включая ковку, объёмную штамповку, волочение, прокатку и прессование. За счет использования данной программы можно более детально проанализировать процессы формирования стружки, различных типов напряжений и тепловых полей, возникающих в процессе лезвийной обработки материалов. Когда мы говорим о лезвийной обработке, программа Deform-2D позволяет создавать модели, чтобы понять, как изменения в режимах резания, включая скорость и подачу инструмента, могут повлиять на процесс образования стружки и на формирование напряжений в обрабатываемом

материале. Это важно для понимания влияния острой геометрии режущего инструмента на конечное качество обработки и производительность. Результаты данного исследования могут способствовать оптимизации производственных процессов и повышению качества обработки материалов.

Следовательно, данное исследование имеет не только теоретическое, но и практическое значение для современного машиностроения, что подчеркивает актуальность и значимость данной проблематики в современном контексте [7].

Данная информация говорит о важности точности и качества механической обработки титановых сплавов в современном машиностроении. Она подчеркивает, что формирование деталей с заданными параметрами имеет критическое значение для конкурентоспособности на рынке.

Исследования, упомянутые в тексте, выявляют, что скорость резания играет решающую роль в формировании стружки при лезвийной обработке, влияя на характеристики стружки и, как следствие, на качество обработанной поверхности. Это свидетельствует о важности оптимального режима резания для получения требуемых результатов. Установлено, что изменение скорости резания приводит к существенным изменениям в форме и структуре стружки, что подтверждает нелинейную зависимость между скоростью резания и формой стружки.

Цель проводимого исследования заключается в моделировании влияния скорости резания на процесс формирования стружки с использованием программного комплекса Deform-2D, призванного оптимизировать производственные процессы и повысить качество обработки материалов. Таким образом, это исследование представляет не только теоретическую, но и практическую значимость для современного машиностроения, подчеркивая актуальность и важность решаемой проблематики в современном контексте.

Материалы и методы. Исследование процесса формирования стружки является важным аспектом в контексте лезвийной обработки материалов. Одним из наиболее значимых факторов, влияющих на этот процесс, является скорость резания. Повышение скорости резания ведет к неоднородному тепловому воздействию на материал и более интенсивному пластическому деформированию, что в свою очередь приводит к изменениям в форме и структуре образующейся стружки.

Стружкой называется не крупная фракция какого-либо материала, в том числе дерева, пластмассы, металла, являющаяся собой неширо-

кий филигранный слой, снятый с заготовки посредством строгального оборудования, ножей либо других инструментов. [8] При резании выделяют несколько видов стружек, которые образуются при некой обработке. Сливная стружка представляет собой непрерывную ленту, которая в зависимости от условий схода по передней поверхности инструмента может быть прямой, спиральной или в виде хаотических завитков [9]. Сегментная стружка характеризуется колеблющимся профилем с видными вершинами чешуек на вершине [10]. Стружка надлома образуется при резании мало пластичных материалов (чугуна, бронзы) и состоит из отдельных кусочков [11].

Современные исследования указывают на нелинейную зависимость между скоростью резания и процессом стружкообразования [12]. Увеличение скорости резания обычно сопровождается увеличением тепловых нагрузок на зону резания, что, в свою очередь, приводит к интенсивному пластическому деформированию материала и изменению характеристик стружки. При увеличении скорости резания: количество тепла, уходящего в стружку, возрастает, а в деталь и инструмент – уменьшается [13].

Изменения в процессе стружкообразования при увеличении скорости резания можно интерпретировать через изменение типа стружки. При низких скоростях резания преобладает образование сливной стружки, которая обладает определенными характеристиками и особенностями [14]. Однако, с увеличением скорости резания, структура стружки может претерпевать изменения, приводя к формированию сегментной стружки, что характеризуется более сложным поведением стружки и влияет на процесс лезвийной обработки.

Важность изучения процесса стружкообразования и его связи со скоростью резания в кон-

тексте лезвийной обработки материалов не может быть недооценена. Имеющиеся данные указывают на нелинейную зависимость между скоростью резания и процессом стружкообразования, что подчеркивает значимость дополнительных исследований для более глубокого понимания этих явлений.

Согласно современным исследованиям, увеличение скорости резания сопровождается увеличением тепловых нагрузок на зону резания, в результате чего происходит интенсивное пластическое деформирование материала. Это влияет на изменение характеристик стружки, приводя к формированию различных типов стружки в зависимости от условий и параметров резания. Дополнительные исследования в этой области будут направлены на анализ изменений в структуре и форме образующейся стружки при различных скоростях резания. Выявление особенностей формирования различных типов стружки в условиях изменения скорости резания поможет определить оптимальные параметры резания для достижения требуемых характеристик обработанной поверхности. Это подчеркивает актуальность проведения моделирования, предполагающего изучение воздействия различных скоростей резания на процесс формирования стружки при лезвийной обработке.

Таким образом, важно изучить и понять явления, происходящие в процессе стружкообразования при увеличении скорости резания, что позволит разработать более эффективные методы лезвийной обработки материалов [15].

Для того, чтобы определить влияние скорости резания на формирование стружки при лезвийной обработке, нужно произвести 3 моделирования, с различными скоростями резания (50, 150 и 250 м/мин) и одинаковой глубиной резания ($t = 0,05$ мм). Схема моделирования представлена на рисунке 1.

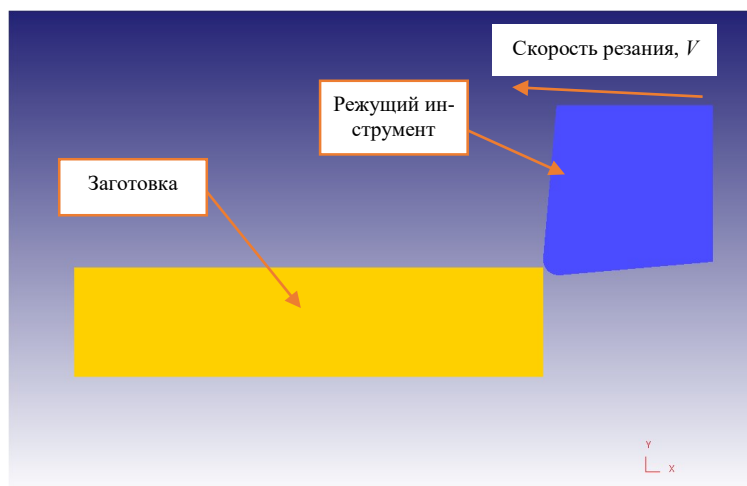


Рис. 1. Схема моделирования

При моделировании для заготовки использовался материал Ti-5553, для инструмента – WC.

Для подтверждения результатов моделирования также был проведен натурный эксперимент с режимами резания аналогичными используемым в моделировании (50 и 250 м/мин). Материал заготовки – титановый сплав BT-3. Сам процесс резания был заснят при помощи высокоскоростной камеры EoSens CL.

Результаты эксперимента. Скорость резания является ключевым фактором в процессе лезвийной обработки материалов. Результаты моделирования, представленные на рисунке 2, позволяют визуализировать влияние скорости резания на образование стружки во время процесса обработки.

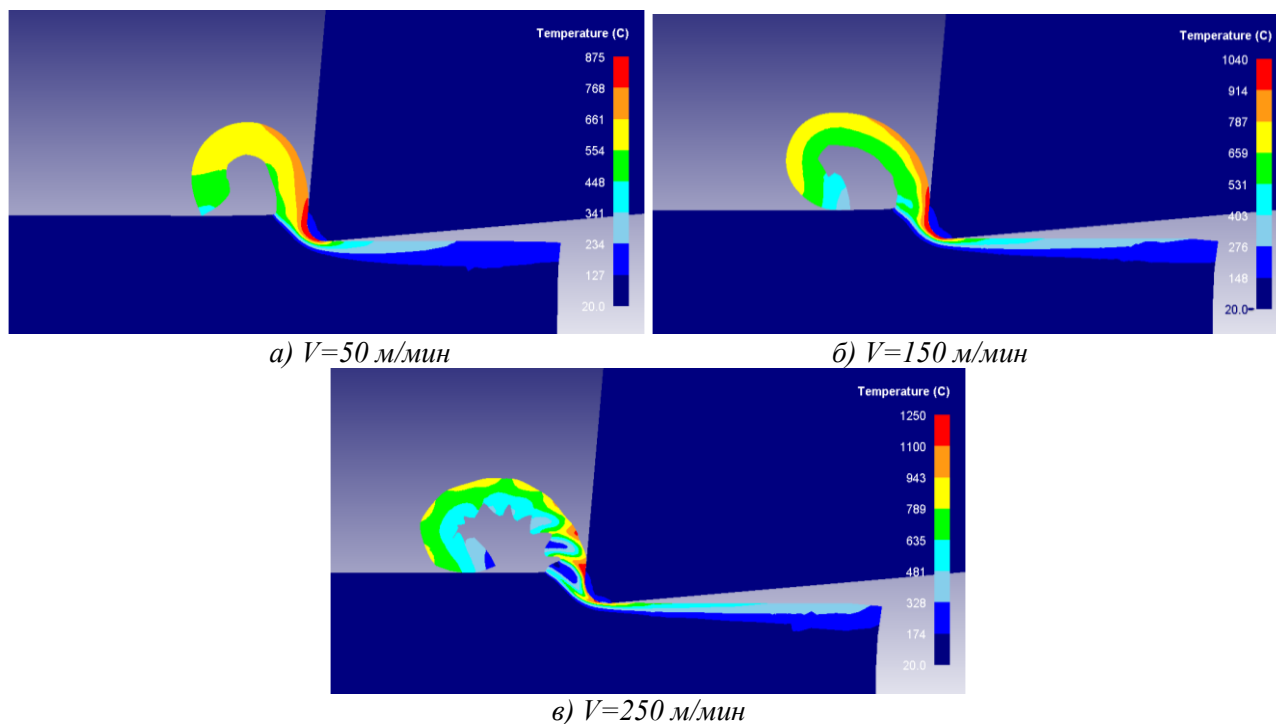


Рисунок 2 – Результаты моделирования

Результаты эксперимента приведены на рисунке 3.

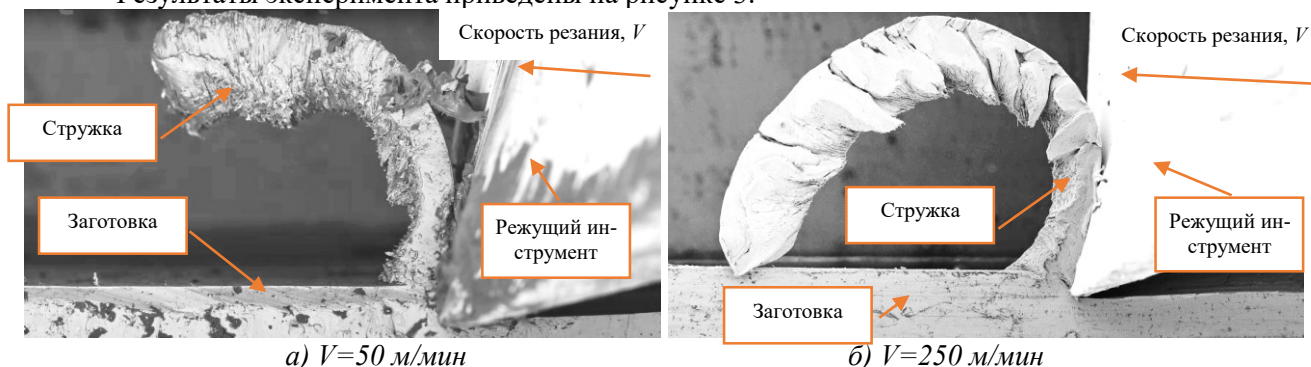


Рис. 3. Результаты эксперимента

Обсуждение результатов. Результаты моделирования и эксперимента явно указывают на связь между скоростью резания и типом образующейся стружки. При скоростях резания от 50 до 150 м/мин наблюдается образование сливной стружки, в то время как при скоростях резания от 250 м/мин и выше формируется элементная стружка.

Это наблюдение позволяет сделать вывод о более благоприятном типе стружки с точки зрения удаления и переработки. Элементная

стружка, образующаяся при более высоких скоростях резания, представляет собой более компактный и удобный для удаления материал. Этот тип стружки также обеспечивает более эффективную переработку и повторное использование материала, что в свою очередь способствует сокращению отходов и повышению эффективности производственных процессов.

С учетом этих результатов рекомендуется использовать скорости резания, обеспечивающие

формирование элементной стружки, для повышения эффективности и улучшения процессов удаления стружки от станка, а также ее последующей переработки. Это позволит минимизировать производственные отходы и расход материалов, повысив при этом эффективность и экологическую устойчивость производственных процессов.

Выводы и заключения. Исходя из результатов исследований, явно проявляется важность оптимального выбора скорости резания для обеспечения формирования более благоприятной стружки.

На основании упомянутых данных, где подчеркивается связь между скоростью резания и типом образующейся стружки, можно сделать вывод о необходимости уделения внимания оптимизации параметров резания для повышения качества обработки материалов.

Полученные результаты указывают, что скорость металлорежущего инструмента должна превышать 250 м/мин для достижения более благоприятной стружки. Однако, необходимо провести дополнительные исследования, чтобы установить оптимальные значения скорости резания для конкретных материалов и условий обработки, поскольку эти параметры могут варьироваться в зависимости от типа материала, его свойств и требуемых характеристик обрабатываемой поверхности.

Разработана универсальная методика теоретического анализа процесса стружкообразования для любой пары обрабатываемый материал — режущий инструмент.

Исследования показали, что стружкообразование при резании пластичных материалов имеет циклический характер, что подтверждается наличием выступов на наружной поверхности стружки.

Большое влияние на формирование стружкообразования также оказывает передний угол резца режущего инструмента. По мере износа резца радиус скругления увеличивается, что вызывает снижение частоты стружкообразования. Появление на резце нароста может снизить частоту стружкообразования в разы.

Исходя из этого, дальнейшие исследования в данной области могут привести к разработке более точных рекомендаций по выбору оптимальной скорости резания для различных материалов, что в итоге способствует повышению эффективности процессов механической обработки и улучшению качества изготовления деталей.

Полученные результаты явствуют о важности оптимального выбора скорости резания в процессе механической обработки материалов.

Учитывая связь между скоростью резания и типом образующейся стружки, становится ясно, что оптимизация параметров резания играет решающую роль в обеспечении высокого качества обработки материалов. Глубокий анализ и дополнительные исследования в этой области могут привести к формированию стандартов и рекомендаций, способствующих улучшению и оптимизации процессов механической обработки различных материалов, что, в конечном итоге, сыграет ключевую роль в повышении качества и конкурентоспособности производимой продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Uzun T., Aslantas K., Bedir F. An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of Inconel 718 super alloy // *Wear*. 2013. Vol. 300 (1-2). Pp. 8–19. DOI: 10.1016/j.wear.2013.01.103.
2. Jaffery S.I., Mativenga P.T. Assessment of the machinability of Ti-6Al-4V alloy using the wear map approach // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 40 (7–8). Pp. 687–696. DOI: 10.1007/s00170-008-1393-9.
3. Камалов В.С., Корнеев С.С., Корнеева В.М. Теплофизика лезвийной обработки металлов со сверхвысокими скоростями // *Вестник машиностроения*. 1993. № 5-6. С. 26–27.
4. Корнеева В.М., Корнеев С.С. Разработка модели процесса стружкообразования в условиях сверхвысоких скоростей резания // *Технология машиностроения*. 2014. № 11. С. 54–58.
5. Лежнев С., Панин Е. Использование программного комплекса DEFORM 2D/3D в научной работе и учебном процессе // *САПР и графика*. 2009. № 5. С. 92–93.
6. Сотов А.В., Смелов В.Г., Агаповичев А.В., Карташов Р.Д., Проничев Н.Д. Моделирование процессов ОМД в программе Deform-2D, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 2017, 51 с.
7. Полосаткин Г.Д., Калашникова М.П. Изучение процесса резания при сверхвысоких скоростях // *Физика металлов и металловедение*. 1960. Т. 10. Вып. 3. С. 425–435.
8. Обработка металлов резанием: виды стружек при ОМР. URL: <https://textman.ru/news/2018/12/02/139892/> (дата обращения: 12.01.2024)
9. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Институт Машиностроения. Резание материалов, методичка. URL: <https://studfile.net/preview/3392295/> (дата обращения: 12.01.2024)

10. Элементное стружкообразование: современное состояние проблемы. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=13113> (дата обращения: 13.01.2024)

11. Процесс стружкообразования и классификация стружки. URL: <http://weldworld.ru/theory/obrab-rezaniem/teoriya-rezaniya/process-struzhkoobrazovaniya-i-klassifikaciya-struzhki.html> (дата обращения: 14.01.2024)

12. Бобров В.Ф. Основы теории о резании металлов. М.: Машиностроение, 1975. 343 с.

13. Юлия Кузнецова, Глава 4. Тепловыделение при резании. URL: <https://pan-dia.ru/text/80/150/43588.php>

14. Зорев Н.Н. О взаимозаменяемости процессов в зоне стружкообразования и в зоне контакта передней поверхности инструмента // Вестник машиностроения. 1963. №12. С. 42–51.

15. Ипатов Н.С., Паокина Л.С. Влияние высокоскоростного резания на качество поверхности и размерную точность детали. Рыбинск, 1992. 16 с.

Информация об авторах:

Хурматуллин Салават Рамилович, бакалавр кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений. E-mail: salikamirmama6@gmail.com. Альметьевский государственный нефтяной институт. Россия, 423452, Альметьевск, ул. Ленина, д. 2.

Каменов Ренат Уахитович, кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела. E-mail: renatkaменов@mail.ru. Альметьевский государственный нефтяной институт. Россия, 423452, Альметьевск, ул. Ленина, д. 2

Поступила 10.01.2024 г.

© Хурматуллин С.Р., Каменов Р.У. 2024

***Khurmatullin S.R., Kamenov R.U.**

Almetyevsk State Oil Institute

**E-mail: salikamirmama6@gmail.com*

SIMULATION OF THE INFLUENCE OF CUTTING SPEED DURING BLADE MACHINING ON CHIP FORMATION

Abstract. Modern mechanical engineering is one of the key industries determining technological progress and competitiveness of production. In the development and improvement of machinery and equipment in mechanical engineering, research in the field of chip formation during blade processing plays an important role. Chip forming is the process of removing material using a cutting tool, which can be a blade or a milling cutter. The quality and characteristics of the chips directly affect the efficiency and quality of processing, as well as tool wear and process stability. Studying the effect of cutting speed on chip formation during blade processing is one of the important aspects in improving production processes. The cutting speed determines the speed of movement of the tool relative to the material being processed. As the cutting speed increases, the chip formation process accelerates and heat generation increases. This can lead to increased friction between the tool and the material being processed, which can negatively affect the quality of processing and the service life of the tool. Modeling using the Deform-2D software package allows you to analyze the effect of cutting speed on chip characteristics. The simulation results showed that with an increase in the cutting speed, the chip transitions from a drain shape to a segmented one. This transition may be associated with changes in the contact interaction between the tool and the material, as well as with a change in the direction of chip movement.

Keywords: modeling, cutting speed, blade processing, chip formation, Deform-2D, drain chips, segment chips.

REFERENCES

1. Uzun T., Aslantas K., Bedir F. An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of Inconel 718 super alloy. *Wear*. 2013. Vol. 300 (1-2). Pp. 8–19. DOI: 10.1016/j.wear.2013.01.103

2. Jaffery S.I., Mativenga P.T. Assessment of the machinability of Ti-6Al-4V alloy using the wear map approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 40 (7–8). Pp. 687–696. DOI: 10.1007/s00170-008-1393-9

3. Kamalov V.S., Korneev S.S., Korneeva V.M. Thermophysics of blade processing of metals with ultrahigh speeds. Bulletin of mechanical engineering [Teplofizika lezvijnoj obrabotki metallov so sverhvyssokimi skorostyami]. 1993. No. 5-6. Pp. 26–27. (rus)
4. Korneeva V.M., Korneev S.S. Development of a model of the chip formation process under conditions of ultrahigh cutting speeds [Razrabotka modeli processa struzhkoobrazovaniya v usloviyah sverhvyssokih skorostej rezaniya]. Mechanical engineering technology. 2014. No. 11. Pp. 54–58. (rus)
5. Lezhnev S., Panin E. The use of the DEFORM 2D/3D software package in scientific work and educational process [Ispol'zovanie programmnogo kompleksa DEFORM 2D/3D v nauchnoj rabote i uchebnom processe]. CAD and graphics. 2009. No. 5. Pp. 92–93. (rus)
6. Sotov A.V., Smelov V.G., Agapovichev A.V., Kartashov R.D., Pronichev N.D. Modeling of OMD processes in the Deform-2D program, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, 2017. 51c
7. Polosatkin G.D., Kalashnikova M.P. Studying the cutting process at ultrahigh speeds [Izuchenie processa rezaniya pri sverhvyssokih skorostyah]. Physics of metals and metallovedenie. 1960. Vol. 10. Iss. 3. Pp. 425–435. (rus)
8. Metal cutting: types of chips at omr. [Obrabotka metallov rezaniem: vidy struzhek pri omr]. URL: <https://textman.ru/news/2018/12/02/139892/> (date of treatment: 12.01.2024)
9. St. Petersburg State Polytechnic University Institute of Mechanical Engineering. Cutting of materials, a manual [Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet Institut Mashinostroeniya. Rezanie materialov, metodichka]. URL: <https://studfile.net/preview/3392295/> (date of treatment: 12.01.2024) (rus)
10. Elemental chip formation: the current state of the problem [Elementnoe struzhkoobrazovanie: sovremennoe sostoyanie problemy]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=13113> (date of treatment: 13.01.2024) (rus)
11. Chip formation process and chip classification [Process struzhkoobrazovaniya i klassifikaciya struzhki]. URL: <http://weldworld.ru/theory/obrabrezaniem/teoriya-rezaniya/process-struzhkoobrazovaniya-i-klassifikaciya-struzhki.html> (date of treatment: 14.01.2024) (rus)
12. Bobrov V.F. Fundamentals of the theory of metal cutting [Osnovy teorii o rezanii metallov]. M.: Mashinostroenie, 1975. 343 p. (rus)
13. Yulia Kuznetsova, Chapter 4. Heat dissipation during cutting. URL: <https://pan-dia.ru/text/80/150/43588.php>
14. Zorev H.H. On the interchangeability of processes in the chip formation zone and in the contact zone of the front surface of the tool [O vzaimozamenyaemosti processov v zone struzhkoobrazovaniya i v zone kontakta perednej poverhnosti instrumenta]. Bulletin of Mechanical Engineering. 1963. No. 12. Pp. 42–51. (rus)
15. Ipatov N.S., Paokina L.C. The effect of high-speed cutting on the surface quality and dimensional accuracy of the part [Vliyanie vysokoskorostnogo rezaniya na kachestvo poverhnosti i razmernuyu tochnost' detali]. Rybinsk, 1992. 16 p. (rus)

Information about the author

Khurmatullin, Salavat R. Bachelor student of the Department of Development and Operation of Oil and Gas fields. E-mail: salikamirmama6@gmail.com. Almet'yevsk State Oil Institute. 2 Lenin Street, Almet'yevsk, 423452, Russia

Kamenov, Renat U. Candidate of Technical Sciences, Head of the Research Department. E-mail: renatkamenov@mail.ru. Almet'yevsk State Oil Institute. Russia, 423452, Almet'yevsk, Lenin str., 2

Received 10.01.2024

Для цитирования:

Хурматуллин С.Р., Каменов Р.У. Моделирование влияния скорости резания при лезвийной обработке на формирование стружки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №4. С. 100–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-100-106

For citation:

Khurmatullin S.R., Kamenov R.U. Simulation of the influence of cutting speed during blade machining on chip formation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 4. Pp. 100–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-100-106