

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

8

2022

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

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

№ 8, 2022 год

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

Vol. 8. 2022

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

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

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

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

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

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

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. 724/4 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	16.08.2022
Выход в свет	30.08.2022

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 14,07. Уч.-изд. л. 15,13. Тираж 40 экз. Заказ № 71

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov

scientific and theoretical journal

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

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

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

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

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

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. 724/4
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/2558104627/
Signed for printing:	16.08.2022

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

Благоевич Деян, PhD, проф. Высшей технической школы по профессиональному образованию в Нише (Республика Сербия, г. Ниш).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Юрьев Александр Гаврилович, д-р техн. наук, проф., кафедры теоретической механики и 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, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Architecture, Professor, Samara State Technical University, Academy of Construction and Architecture (Russian Federation, Samara).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Гоглев И.Н., Логинова С.А.

НОВЫЙ ИНДИКАТОРНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОН КАРБОНИЗАЦИИ
В БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ 8

Фролова М.А.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ
ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ МИНЕРАЛЬНЫХ
КВАРЦСОДЕРЖАЩИХ ПОРОШКОВ 17

Донченко О.М., Сулейманова Л.А., Крючков А.А., Логачев К.И.

УНИВЕРСАЛЬНАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ
ДЕФОРМАТИВНО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ АРМАТУРНЫХ 27

Мерщев А.А., Головинский П.А., Свирин М.В., Семиненко А.С.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПОМЕЩЕНИЯ
С ДЕРЕВЯННЫМИ ОГРАЖДАЮЩИМИ КОНСТРУКЦИЯМИ 35

Осипова Н.Н., Культяев С.Г.

НАКОПЛЕНИЕ СВОБОДНОЙ ВОДЫ В СИСТЕМАХ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ
СЖИЖЕННЫМ ГАЗОМ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ БУТАНА 50

Митякина Н.А., Старченко К.М., Доценко В.А., Вишнякова А.А.,

Дворяшина М.С.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ УЧЕБНОЙ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СТУДЕНТОВ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОБЩЕСТВЕННОГО КОВОРКИНГОВОГО ПРОСТРАНСТВА
НА ТЕРРИТОРИИ КАМПУСА ВУЗА 60

Перькова А.Ю., Перькова М.В., Ладик Е.И.

ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЙ.
ЗАРУБЕЖНЫЙ И ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ 71

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Никулин С.С., Батурина Е.В., Власова Л.А., Рудыка Е.А., Никулина Н.С.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ
ЭМУЛЬСИОННЫХ КАУЧУКОВ 85

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Сычев Е.А., Обернихин А.А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СТАНИНЫ КОНУСНОЙ ДРОБИЛКИ 92

Вайтехович П.Е., Боровский Д.Н.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН ПЛАНЕТАРНОГО ТИПА 103

Алак Сабах Алхалили, Лукьянов Е.А.

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ КОЛЕСНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА
НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 112

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Goglev I.N., Loginova S.A.

NEW INDICATOR METHOD FOR DETERMINING CARBONIZATION ZONES
IN CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

8

Frolova M.A.

METHODOLOGICAL FEATURES OF DETERMINATION THE SPECIFIC SURFACE
ENERGY OF MINERAL QUARTZ-CONTAINING POWDERS

17

Donchenko O.M., Suleymanova L.A., Kryuchkov A.A., Logachev K.I.

UNIVERSAL ANALYTICAL DEPENDENCE OF DEFORMATION-STRENGTH
PROPERTIES OF REINFORCING STEELS UNDER FORCE TENSION

27

Mershchiev A.A., Golovinski P.A., Svirin M.V., Seminenko A.S.

SIMULATION OF A NON-STATIONARY THERMAL MODE OF PREMISE
WITH THE WOOD ENCLOSING STRUCTURES

35

Osipova N.N., Kultyaev S.G.

ACCUMULATION OF FREE WATER IN GAS SUPPLY SYSTEMS WITH LIQUEFIED
GAS WITH INCREASED BUTANE CONTENT

50

Mityakina N.A., Starchenko K.M., Docenko V.A., Vishnyakova A.A., Dvoryashina M.S.

SOME ASPECTS OF EDUCATIONAL PROJECT ACTIVITY OF STUDENTS
IN THE DEVELOPMENT OF A PUBLIC COWORKING SPACE

60

ON THE TERRITORY OF THE UNIVERSITY CAMPUS

Perkova A.Yu., Perkova M.V., Ladik E.I.

FORMATION AND DEVELOPMENT OF URBAN AGGLOMERATIONS.
FOREIGN AND DOMESTIC EXPERIENCE

71

CHEMICAL TECHNOLOGY

Nikulin S.S., Baturina E.V., Vlasova L.A., Rudyka E.A., Nikulina N.S.

ENSURING TECHNOSPHERE SAFETY IN THE PRODUCTION
OF EMULSION RUBBERS

85

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Antsiferov S.I., Karachevceva A.V., Sychev E.A., Obernikhin A.A.

DETERMINATION OF THE STRENGTH OF A CONE CRUSHER STAND

92

Vaytekovich P.E., Borovskiy D.N.

DETERMINATION OF KINEMATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS
OF TECHNOLOGICAL MACHINES OF PLANETARY TYPE

103

Alaq Sabah Alkhaleeli, Lukyanov E.A.

MOTION CONTROL OF A WHEELED MOBILE ROBOT BASED ON SIMULATION

112

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-8-16

¹Гоглев И.Н., ²*Логинова С.А.¹Ивановский государственный политехнический университет²Ярославский государственный технический университет

*E-mail: sl79066171227@yandex.ru

НОВЫЙ ИНДИКАТОРНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОН КАРБОНИЗАЦИИ В БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Аннотация. В статье представлен новый индикаторный способ выявления зон карбонизации (нейтрализации) бетона, который можно успешно применять в практике обследований строительных конструкций из бетона и железобетона (на полевой и лабораторной стадиях работ). Рассмотрены аспекты возникновения и протекания процесса карбонизации (нейтрализации), а также проанализированы случаи её влияния на долговечность бетонных и железобетонных строительных конструкций различных объектов (промышленных, транспортных, гражданских, гидротехнических, линейных). Карбонизация способна в определенных условиях приводить к выщелачиванию бетона, что влечет повреждение арматуры в железобетонных конструкциях. Рассмотрены объекты, на которых возможно проводить обследования с применением нового метода, а также приведено сравнение эффективности указанного метода с методом фенолфталеиновой пробы. Недостаток метода фенолфталеиновой пробы (МФФП) состоит в том, что он не позволяет понять полную картину распределения pH бетона по слоям, поскольку индикатор имеет 1 рабочий интервал перехода окраски. Отличие нового метода состоит в более высокой точности (метод позволяет выявить зоны, в которых процесс коррозии бетона, связанный с массопереносом целевого компонента при карбонизации только начинается или полноценно протекает, а также оценить состояние защитного слоя бетона в текущий момент времени). Новый метод является перспективным, т.к. позволяет оценивать состояние обследуемых железобетонных конструкций на предмет их долговечности и степени повреждения. Полученные результаты исследования можно использовать при организации ремонта бетонных и железобетонных строительных конструкций.

Ключевые слова: бетон, железобетон, коррозия, карбонизация, нейтрализация, выщелачивание, обследование, фенолфталеиновая проба, универсальный индикатор.

Введение. Процесс обследования бетонных и железобетонных строительных конструкций, эксплуатируемых в условиях атмосферного воздуха и влаги, зачастую сопровождается выявлением участков карбонизации бетона (дополнительно могут определяться и другие распростра-

ненные виды коррозии бетона). От степени развития процесса карбонизации прямо зависит состояние железобетонных конструкций гражданских, промышленных, транспортных сооружений, например, опор и плит покрытий мостов, эстакад и др. (рис. 1) [1, 2].



Рис. 1. Ребристые плиты покрытия в транспортном сооружении (Московская область). Срок эксплуатации плит – более 30 лет. Совместное действие карбонизации и хлоридной коррозии. Оголение и коррозия продольной арматуры

Процесс карбонизации вызывает снижение долговечности железобетонных конструкций, особенно используемых в качестве опорных и изгибаемых элементов, вследствие уменьшения pH бетона, его пассивирующих свойств по отношению к стальной арматуре и снижению площади поперечного сечения арматуры в результате образования продуктов коррозии.

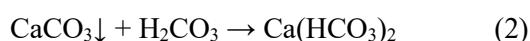
Другое название процесса карбонизации – нейтрализация, поскольку процесс коррозии связан с химической реакцией одного из основных компонентов цементного камня – свободного гидроксида кальция (согласно терминологии академика Российской академии архитектуры и строительных наук, С. В. Федосова) [1–4]. Согласно классификации профессора В.М. Москвина и его соавторов, карбонизация относится к процессам коррозии бетона 2-го вида и представляет собой один из подвидов химической коррозии цементного камня [2]. Процесс карбонизации представляет собой реакцию щелочных компонентов бетона (в основном, свободного гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$), происходящей при диффузии углекислого газа или угольной кислоты (содержащегося в атмосфере) в порах цементного камня.

Процесс можно условно разделить на 2 стадии:

- 1) Образование карбоната кальция



- 2) Образование и унос в среду гидрокарбоната кальция



Развитие первой стадии (1) связано с особенностью микроструктуры цементного камня, который является пористым материалом. В ходе взаимодействия с атмосферным воздухом (в том числе и во влажной среде) происходит насыщение пор бетона углекислым газом (CO_2) или раствором угольной кислоты (H_2CO_3), что ведет к образованию углекислого кальция (CaCO_3) [1–4]. Углекислый кальций (CaCO_3) является нерастворимым соединением, благодаря чему он остается в структуре железобетонной конструкции [2, 3, 4].

Вторая стадия процесса (2) протекает при условии избытка углекислого газа или угольной кислоты. В случае атмосферной эксплуатации данное условие полностью выполняется – углекислый газ содержится в воздухе. В результате в растворе образуется гидрокарбонат кальция ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), который является растворимым соединением. В дальнейшем, при увлажнении конструкции происходит диффузия гидрокарбоната кальция с образованием раствора, который уно-

сится во внешнюю среду [1–4], а цементный камень бетона теряет один из ценнейших компонентов.

Именно поэтому выявление и определение карбонизации бетона является актуальной задачей в области строительного материаловедения и обследования строительных конструкций (как для отечественных, так и зарубежных научных школ), подкрепленной также в нормативных документах РФ. Например, согласно ГОСТ 31384-2017 (п. 7.4.3) необходимо предусматривать защиту бетонных и железобетонных конструкций от карбонизации, путем введения специальных добавок в бетон или благодаря устройству защитных покрытий [3, 4].

Процесс карбонизации сопровождается снижением pH защитного слоя бетона [3–5]. По данным различных исследований [4, 5], при снижении pH бетона ниже 10–9, начинается процесс химической и электрохимической коррозии арматуры, поскольку пассивирующие свойства бетона по отношению к металлической арматуре могут быть утрачены [4, 5]. Следует отметить, что зачастую карбонизация воздействует на бетонные и железобетонные конструкции совместно с другими видами коррозии (хлоридной коррозией [1, 4, 5, 10, 13] и биологической коррозией [5, 7, 9]). Биокоррозия бетона является серьезной глобальной проблемой, ущерб от которой оценивается в размере миллиардов долларов в год [1]. Кроме того, исследование микробиологического воздействия на цементные материалы имеет санитарно-гигиеническое значение. Биодеструктивные процессы затрагивают структурную целостность многих наземных и морских конструкций, мостов, зданий и сооружений, в результате чего бетон подвергается разрушению. Биодеструкция бетонных конструкций способствует увеличению пористости бетона и ускорению диффузионных процессов в нем, тем самым стимулируя коррозионные процессы. Основным компонентом, ускоряющим общий процесс коррозии в бетоне, является смесь органических кислот ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_5$ и др.), которая является продуктом жизнедеятельности микроорганизмов [7]. Своевременная защита бетонных и железобетонных конструкций от биологического обрастания позволяет значительно сократить экономический ущерб от последствий коррозионных разрушений, повысить надежность конструкций, эксплуатирующихся в условиях повышенной влажности, снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций. И если исследования по влиянию карбонизации и хлоридной коррозии, а также по их выявлению на полевой и лабораторной стадии обследования строительных конструкций в литературе встречаются достаточно

часто [6, 7], то вот вопросы выявления и исследования биологической коррозии отражены недостаточно широко. До настоящего времени предотвращение биообрастания подводных бетонных и железобетонных сооружений проводилось в основном за счет обработки поверхностей биоцидами для уничтожения или предотвращения оседания потенциальных загрязняющих веществ. Однако экологическая безопасность ряда биоцидов против биообрастания вызывает серьезные опасения, возникает необходимость поиска альтернативных методов защиты [7].

Таким образом, процесс карбонизации непосредственно влияет на долговечность бетонных и железобетонных конструкций [1–5, 7, 8, 10, 13–15], из-за чего его необходимо учитывать при проведении обследований.

Материалы и методы. Выявление карбонизации на полевой или лабораторной стадии – важный аспект обследования бетонных и железобетонных строительных конструкций на предмет коррозии. Наиболее известным и применяемым как в зарубежных странах, так и в РФ, является

метод фенолфталеиновой пробы (МФФП). Данный метод успешно используется как на полевом этапе обследования, так и на лабораторном [4, 6, 15]. Выполнить фенолфталеиновую пробу можно не только на объекте обследования при помощи нанесения раствора индикатора на свежие сколы (спилы) бетона или в недавно подготовленные контрольные отверстия, но также и в лабораторных условиях на заранее отобранных образцах (кернах) (рис. 2а) цилиндрической формы (рис. 2б) [4, 6].

Суть МФФП состоит в изменении окраски раствора фенолфталеина, в зависимости от величины pH бетона в реальном времени. Например, при значениях $\text{pH}=8\div 10$ (щелочная среда) окраска раствора фенолфталеина переходит из бесцветной в малиновую (1 рабочий интервал перехода). При значении $\text{pH}<8$ окраска раствора фенолфталеина бесцветная, что позволяет понять границы зон карбонизированного бетона и определить глубину карбонизации (рис. 2) [4, 6] эксплуатируемой конструкции.



(а)



(б)

Рис. 2. (а) – участок алмазного бурения на ж/б конструкции, выбранный для отбора образца-керн; (б) – фенолфталеиновый тест на определение карбонизации бетона образца-керн в лаборатории

Основная часть. Благодаря простоте и доступности МФФП успешно применяется в практике обследований, но, к сожалению, он не лишен своих недостатков [4–6], которые могут способствовать лишним временным затратам или недостаточной точности полученных результатов. В качестве примера рассмотрим незащищенную (без мероприятий первичной и вторичной защиты) бетонную конструкцию [4, 6]. При значениях pH бетона более 10,5, окраска раствора фенолфталеина практически бесцветная и переход индикатора, особенно в полевых условиях, может быть незаметным [4, 6]. К сравнению, pH свежеприготовленного бетона составляет примерно $13\div 14$ (сильнощелочная среда), а pH бетона недавно возведенной (1–3 года или 3–5 лет) бетонной или ж/б конструкции может составлять $11,5\div 12,5$. В таком диапазоне окраска раствора

фенолфталеина также бесцветная [4, 6]. Таким образом, если процесс нейтрализации бетона уже начался и происходит постепенное снижение pH от начальных значений, раствор индикатора в МФФП не позволит понять динамику протекания процесса и оценить границы наиболее уязвимых зон к карбонизации, в особенности если поврежденный коррозией бетон визуально абсолютно не отличается от целого [4, 6].

Помимо фенолфталеина есть другие индикаторы и их смеси, работающие в большем диапазоне pH бетона. Именно поэтому, помимо раствора фенолфталеина ведется поиск растворов других индикаторов, которые смогут дать понимание показателей значений pH бетона и понять границы зон их распределения [4, 6].

В качестве такой альтернативы было предложено использование спиртового раствора универсального индикатора ЗИВ-1 [6]. Поскольку универсальный индикатор представляет собой смесь различных индикаторов, в отличие от фенолфталеина он имеет несколько рабочих интервалов перехода (рис. 3) [6]. Каждому интервалу перехода соответствует своя уникальная окраска раствора (окраска значительно контрастирует по сравнению с исходной), что упрощает определение pH в указанном участке (рис. 3) [6]. Благодаря данному индикатору можно получить представление о границах зон бетона с конкретными показателями его pH (рис. 5 а, б). В качестве примера показаны участки свежих сколов бетона одной и той же строительной ж/б конструкции, на поверхность которых нанесены спиртовые растворы универсального индикатора ЗИВ-1 и фенолфталеина (рис. 5 а, б) [6].

Раствор индикатора наносится на стенки недавно подготовленных контрольных отверстий (КО) на поверхности железобетонных конструкций, которые располагаются с определенным шагом (рис. 4 а, б). Шаг КО определяется в зависимости от основных габаритов конструкции (длина, ширина, высота, толщина) [6]. Отверстия в конструкции предварительно подготавливаются с помощью перфоратора, при этом их полости тщательно очищаются от бетонной пыли и грязи, а также промываются дистиллированной водой (рис. 4 а, б). Очистка отверстий необходима от бетонной пыли, которая способствует загрязнению и может помешать работе индикатора. КО производятся в заранее определенных местах и представляют собой шпуры, диаметром 16÷24 мм и максимальной глубиной до 80 мм (в зависимости от толщины защитного бетонного слоя в железобетонных конструкциях). Рекомендуемая глубина отверстий составляет 1,5 диаметра. При обследовании бетона морских и реч-

ных гидротехнических сооружений, бомбоубежищ, подземных толстостенных и специальных конструкций, допускается выполнение отверстий глубиной до 180 мм. Места и разметка нанесения контрольных отверстий предварительно определяются магнитным детектором, для минимального шанса попадания в арматуру при сверлении. Шаг контрольных отверстий принимается 300 мм в горизонтальном направлении и 200 мм в вертикальном направлении. Раствор индикатора допускается наносить и на свежие сколы (спилы) бетона (рис. 5 а, б), в случае если имеются трудности с выполнением контрольных отверстий (рис. 5) [6]. Такая ситуация, например, характерна для тонкостенных ж/б конструкций. Поскольку раствор индикатора имеет несколько интервалов перехода окраски, то за основную окраску зоны pH принимается наиболее крупная зона с однородной насыщенной окраской. В случае если таких зон сразу несколько, предполагается равномерное усреднение показателей, с составлением подробной карты зон pH бетона.

При использовании метода необходимо иметь с собой качественные световые приборы, которые будут подсвечивать контрольные отверстия (освещение необходимо для точного определения различных pH зон в бетоне). Также необходимо наличие перфоратора с бурами необходимых диаметров (рекомендуемые диаметры буров от 16÷24 мм).

Новым методом исследовано более 10 участков железобетонной конструкции (ребристая плита покрытия автомобильнодорожного моста), которая длительное время (более 30 лет) эксплуатируется в условиях воздействия атмосферного воздуха и влаги. Конструкция выполнена без первичной и вторичной защиты бетона [2, 3, 14]. Автомобильнодорожный мост находится в Ивановской области. Результаты сравнения приведены в таблице 1.

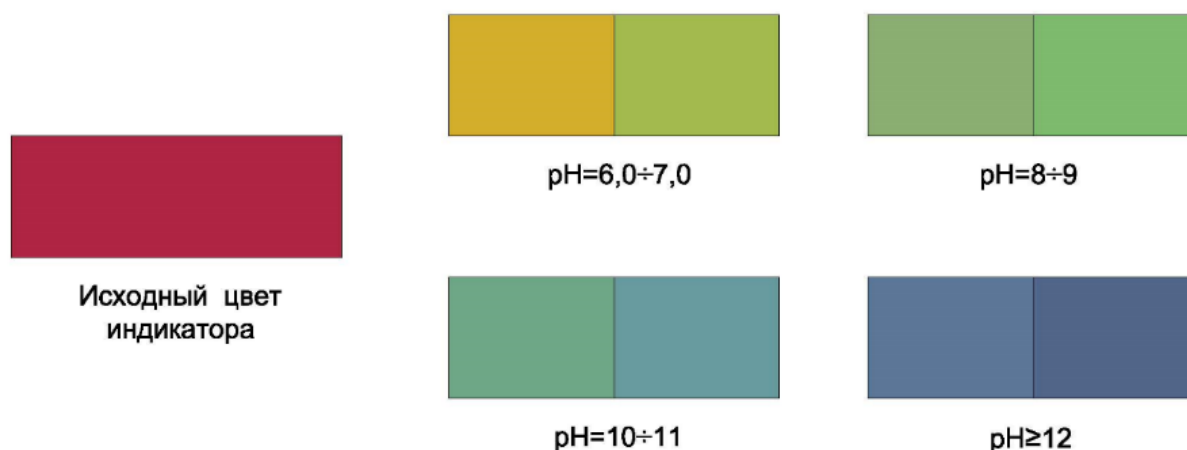


Рис. 3. Основные рабочие интервалы перехода раствора универсального индикатора ЗИВ-1

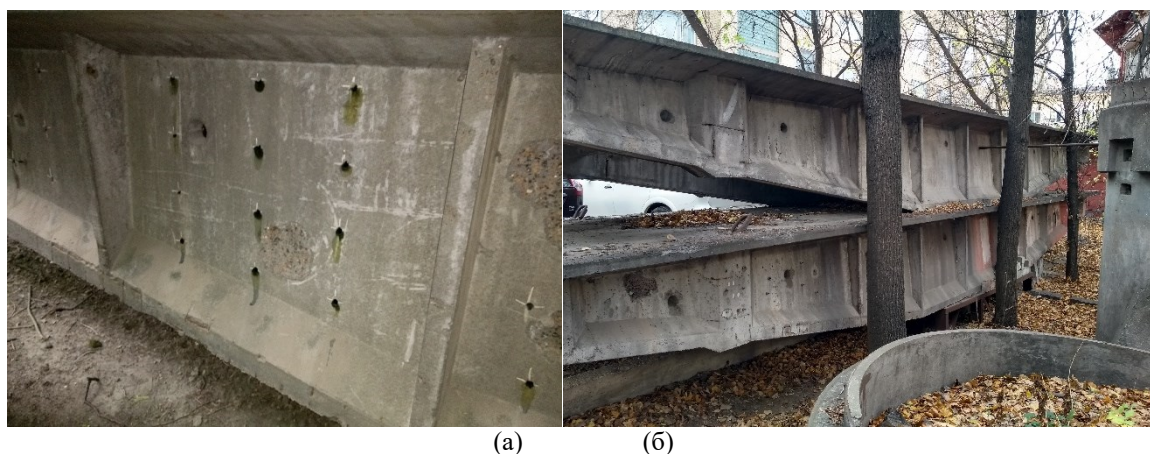


Рис. 4. (а) – выполненные контрольные отверстия глубиной 30÷50мм на поверхности железобетонной конструкции; (б) – пример обследуемой железобетонной конструкции. Конструкции находятся на открытом воздухе более 15 лет

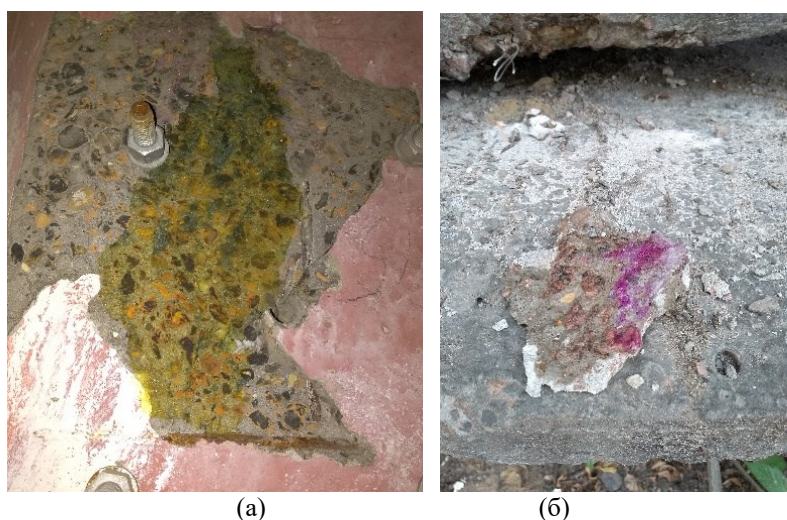


Рис.6. Сравнение показаний спиртовых растворов индикаторов, нанесенных на сколы бетона:
а) универсальный индикатор ЗИВ-1; б) фенолфталеин. В зонах бесцветной окраски фенолфталеина карбонизированный бетон, рН которого можно определить с помощью раствора универсального индикатора

Таблица 1

Сравнение показаний предлагаемого метода с методом фенолфталеиновой пробы

№ участка	Предлагаемый метод		Метод фенолфталеиновой пробы	
	Окраска	Значение рН	Окраска	Значение рН
1	Светло-зеленая	9÷9,5	Малиновая	8÷10
2	Салатово-зеленая	7,5÷7,9	Блекло-малиновая	~8
3	Светло-зеленая	~9,5	Малиновая	8÷10
4	Синий	~12,5	Бесцветная	<8
5	Желтая	~6	Бесцветная	<8
6	Желто-салатовая	6,5÷7,0	Бесцветная	<8
7	Темно-зеленая	~10,5	Темно-малиновая	8÷10
8	Салатово-зеленая	7,5÷7,9	Блекло-малиновая	~8
9	Синий	~12,5	Бесцветная	<8
10	Желтая	~6	Бесцветная	<8

В участках №4 и №9 окраска фенолфталеина бесцветная, т.е. по данным фенолфталеиновой пробы, предполагается, что рН бетона на данном участке менее 8 (визуально бетон схож с поврежденными коррозией участками). Однако рас-

твор универсального индикатора ЗИВ-1 дает понимание, что рН бетона там превышает 12, что означает, что участок полностью «здоров» [6] – при ремонте железобетонной конструкции его не нужно удалять с последующим восстановлением ремонтными составами [2, 3].

В участках №2 и №8, где цвет окраски раствора фенолфталеина практически бесцветный (т.е. pH бетона ≈ 8), раствор универсального индикатора ЗИВ-1 позволяет получить практически полностью точные значения (табл. 1). Сходная ситуация наблюдается и в участках №5, №6, №10, где при показателях $\text{pH} < 8$ новый метод позволяет с большей точностью определить границы зон полностью нейтрализованного бетона [6].



Рис. 7. Окраска фенолфталеина на поверхности кубиков с ускорителем твердения.
Окраска говорит о $9 < \text{pH} \leq 10,1$

В качестве примера приведено исследование влияния добавок-ускорителей твердения на pH бетона с помощью предполагаемого метода.

Недостаток метода фенолфталеиновой пробы состоит в том, что фенолфталеина не даёт представления о pH бетона выше границы своего применения. На рис. 7, 8 приведены снимки окраски фенолфталеина на бетонных кубиках $10 \times 10 \times 10$ см с добавкой ускорителя твердения (на основе фтористых солей, рис. 7) и кубика из обычного бетона (без добавок, рис. 8).



Рис. 8. Окраска фенолфталеина на поверхности кубиков без добавок. Почти полное отсутствие окраски говорит о $\text{pH} \gg 10,5$

Предлагаемый метод позволяет определить pH бетона в случае применения подобных добавок. Например, на рис. 9-11 показаны карбонизированные бетонные кубики $3 \times 3 \times 3$ см (2шт) и кубик $10 \times 10 \times 10$ см (1шт), в которые 3 года назад были добавлены различные добавки (ускоритель твердения на основе неорганических фтористых солей, нитрит натрия и ускоритель твердения на

основе орг. фтористых солей). Как видно из фотографий, в участках бетона, где окраска фенолфталеина была бы бесцветной, раствор универсального индикатора окрашивает бетон. Это позволяет понять зоны бетона с различным pH , а также даёт представление о влиянии различных добавок на pH бетона при дальнейшей эксплуатации.



Рис. 9. Окраска универсального индикатора на поверхности карб. кубика $3 \times 3 \times 3$ см с ускорителем твердения (неорг. фториды).
Окраска в **зоне 1** говорит $\text{pH} \approx 10,5$.
Окраска в **зоне 2** говорит $7 < \text{pH} \leq 8$



Рис. 10. Окраска универсального индикатора на поверхности карб. кубика $10 \times 10 \times 10$ см с добавкой нитрита натрия.
Окраска говорит о $10,5 < \text{pH} \leq 11$

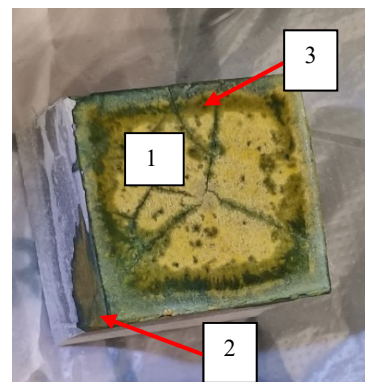


Рис. 11. Окраска универсального индикатора на поверхности карб. кубика $3 \times 3 \times 3$ см с ускорителем твердения (орг. фторист. соли).
Окраска в **зоне 1** говорит $\text{pH} \approx 6 \div 6,5$.
Окраска в **зоне 2** говорит $\text{pH} \approx 11$.
Окраска в **зоне 3** говорит $\text{pH} \approx 7 \div 7,5$

Выводы

1. Новый индикаторный метод определения зон карбонизации (нейтрализации) бетона является перспективным и более точным, по сравнению с методом фенолфталеиновой пробы, а также позволяет определить динамику процесса (границы зон бетона с различными показателями его pH).

2. Также этот метод в полевых условиях, с учетом факторов эксплуатации железобетонных конструкций, дает возможность оценить распределение наиболее уязвимых к карбонизации зон бетона и определить моменты возможного начала химической и электрохимической коррозии арматуры в данных участках.

3. Метод возможно использовать не только при оценке долговечности бетонных и железобетонных конструкций, но также и применять при испытаниях новейших добавок в бетон (неорганических кислотных, щелочных и солевых, органических), поскольку он даст понимание по их влиянию на pH свежеприготовленного бетона. Таким образом, постепенно решается задача по накоплению практического опыта в этой области научных знаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Раткин В.В., Черных В.К. Хлоридная коррозия и ее влияние на свойства бетона // XVII междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и промышленности». Сборник трудов конф. 2016. С. 150–151.
2. Павлова И.Л., Мосюкова Н.О. Повышение долговечности железобетонных конструкций при их реконструкции и восстановлении // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2015. № 6. С. 200–203.
3. Гнам П.А. Анализ методик технического обследования объектов с целью определения их физического износа // AlfaBuild. 2019. № 4 (11). С. 7–22.
4. Федоров П.А., Анваров Б.Р., Латыпова Т.В., Анваров А.Р., Латыпов В.М. Карбонизация бетона. По какой формуле рассчитывать глубину коррозии? // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2010. № 4-5 (16). С. 54–60.
5. Румянцева В.Е., Логинова С.А., Карцева Н.Е. Математическое моделирование коррозии бетонных конструкций в биологически агрессивных средах // Вестник Череповецкого государственного университета. 2021. № 3 (102). С. 56–67. DOI: 10.23859/1994-0637-2021-3-102-4
6. Пат. 2755246 С1, Российская Федерация. Способ определения долговечности железобетонных конструкций / Д.С.Рыбнов, И.Н.Гоглев, К.Ю. Соколов. № 2020127659; заявл. 19.08.2020, опубл. 14.09.2021.
7. Федосов С.В., Федосеев В.Н., Логинова С.А., Гоглев И.Н. Выявление сульфатной и хлоридной коррозии бетона на полевой и лабораторной стадиях обследования строительных конструкций зданий и сооружений // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2021. № 10 (1046). С. 29–31.
8. Сороканич С.В., Бочковский Д.Ю., Корж А.А. Сульфатная коррозия бетона при фильтрационном влагопереносе // Вестник Луганского государственного университета им. Владимира Даля. 2020. № 12 (42). С. 131–134.
9. Строганов В.Ф., Сагадеев Е.В. Биоповреждение строительных материалов // Строительные материалы. 2015. № 5. С. 5–9.
10. Бондаренко В.М., Мигаль Р.Е., Ягулов Б.А. Резервы и экспозиция конструктивной безопасности зданий, эксплуатирующихся в агрессивной среде // Строительство и реконструкция. 2014. № 1 (51). С. 3–10.
11. Etteyeb N., Sanchez M., Dhouibi L., Alonso C., Andrade C., Triki E. Corrosion protection of steel reinforcement by a pre-treatment phosphate solution. Assessment of passivity by electrochemical techniques. // Corrosion Engineering Science and Technology. 2006. V. 41(4). Pp. 336–341. DOI: 10.1179/174327806X120775
12. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т.О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 93–102.
13. Cao C., Cheung M. Non-uniform rust expansion for chloride-induced pitting corrosion in RC structures // Constr. Build. Mater. 2014. №51. Pp. 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.042>
14. Лесная В.И. Карбонизация бетона в конструкциях зданий // Вологодские чтения. 2003. № 37. С. 86–87.
15. Васильев А.А., Шевченко Д.Н. Математическая расчетно-экспериментальная модель начальной карбонизации бетона // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2016. № 2 (33). С. 176–179.
16. Goglev I.N. A new promising method for detecting carbonization of reinforced concrete building structures during inspections // Smart Composite in Construction. 2021. V. 2. № 4. Pp. 35–45. DOI: 10.52957/27821919_2021_4_35

Информация об авторах

Гоглев Илья Николаевич, соискатель. E-mail: azidplumbum00@mail.ru. Ивановский государственный политехнический университет. Россия, 153000, Иваново, Шереметевский пр., д. 21

Логинова Светлана Андреевна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций. E-mail: sl79066171227@yandex.ru. Ярославский государственный технический университет. Россия, 150023, Ярославль, Московский пр., д. 88

Поступила 14.03.2022 г.

© Гоглев И.Н., Логинова С.А., 2022

¹Goglev I.N., ^{2,*}Loginova S.A.

¹Ivanovo State Polytechnic University

²Yaroslavl State Technical University

*E-mail: sl79066171227@yandex.ru

NEW INDICATOR METHOD FOR DETERMINING CARBONIZATION ZONES IN CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Abstract. The article considers a new indicator method for identifying zones of carbonization (neutralization) of concrete, which can be successfully applied in the practice of inspections of building structures made of concrete and reinforced concrete (at the field and laboratory stages of work). The aspects of the occurrence and course of the carbonization (neutralization) process are considered. The cases of its influence on the durability of concrete and reinforced concrete building structures of various objects (industrial, transport, civil, hydraulic, linear) are analyzed. Carbonization can lead to leaching of concrete under certain conditions. This is followed by damage of armature in reinforced concrete structures. The objects of the survey using the new method are considered. A comparison of the effectiveness of this method with the phenolphthalein test method is made. The disadvantage of the phenolphthalein test method (PPTM) is that it does not allow to understand the full picture of the pH distribution of concrete over layers, because the indicator has 1 working color transition interval. The difference of the new method consists in higher accuracy: the method allows to identify areas in which the corrosion process of concrete associated with the mass transfer of the target component during carbonization is just beginning or is fully proceeding. In addition, it helps to assess the condition of the protective layer of concrete at the current time. The new method is promising, because it allows assessing the condition of the examined reinforced concrete structures for their durability and degree of damage. The results of the study can be used in organizing the repair of concrete and reinforced concrete building structures.

Keywords: concrete, reinforced concrete, corrosion, carbonization, neutralization, leaching, examination, phenolphthalein test, universal indicator.

REFERENCES

1. Ratkin V.V., Chernykh V.K. Chloride corrosion and its influence on the properties of concrete [Hloridnaya korrozziya i ee vliyanie na svoystva betona]. XVII intl. sci.-tech. conf. «Aktual'nye problem stroitel'stva, stroitel'noj industrii i promyshlennosti». Collection of proceedings conf. 2016. Pp. 150–151. (rus)
2. Pavlova I.L., Mosyukova N.O. Increasing the durability of reinforced concrete structures during their reconstruction and restoration [Povyshenie dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstrukcij pri ih rekonstrukcii i ivosstanovlenii]. Resursoenergoeffektivnye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona. 2015. No.6. Pp. 200–203. (rus)
3. Gnam P.A. Analysis of methods of technical inspection of objects in order to determine their physical wear [Analiz metodik tekhnicheskogo ob-sledovaniya ob"ektov s cel'yu opredeleniya ih fizicheskogo iznosa]. AlfaBuild. 2019. No. 4 (11). Pp. 7–22. (rus)
4. Fedorov P.A., Anvarov B.R., Latypova T.V., Anvarov A.R., Latypov V.M. Concrete carbonization. What is the formula for calculating the depth of corrosion? [Karbonizaciya betona. Po kakoj formule rasschityvat' glubinukorrozii?]. ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixes. 2010. No. 4–5 (16). Pp. 54–60. (rus)
5. Rumyantseva V.E., Loginova S.A., Kartseva N.E. Mathematical modeling of corrosion of concrete structures in biologically aggressive environments [Matematicheskoe modelirovanie korrozii betonnykh konstrukcij v biologicheski agressivnykh sredah]. Bulletin of the Cherepovets State University. 2021. No. 3 (102). Pp. 56–67. DOI: 10.23859/1994-0637-2021-3-102-4. (rus)
6. Rybnov D.S., Goglev I.N., Sokolov K.Yu. Patent RF, no. 2020127659, 2021

7. Fedosov S.V., Fedoseev V.N., Loginova S.A., Goglev I.N. Identification of sulfate and chloride corrosion of concrete at the field and laboratory stages of inspection of building structures of buildings and structures [Vyyavlenie sul'fatnoj i hloridnoj korrozii betona na polevoj i laboratornoj stadiyah obledovaniya stroitel'nyh konstrukcij zdaniy i sooruzhenij]. BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki. 2021. No. 10 (1046). Pp. 29–31. (rus)

8. Sorokanich S.V., Bochkovsky D.Yu., Korzh A.A. Sulfate corrosion of concrete during filtration moisture transfer [Sul'fatnaya korroziya betona pri fil'tracionnom vlagoperenose]. Bulletin of the Lugansk State University. Vladimir Dahl. 2020. No. 12 (42). Pp. 131–134.

9. Stroganov V.F., Sagadeev E.V. Biodeterioration of building materials [Biopovrezhdenie stroitel'nyh materialov]. Construction materials. 2015. No. 5. Pp. 5–9. (rus)

10. Bondarenko V.M., Migal R.E., Yagupov B.A. Reserves and exposition of the constructive safety of buildings operated in an aggressive environment [Rezervy i ekspozitsiya konstruktivnoj bezopasnosti zdaniy, ekspluatiruyushchih v agresivnoj srede]. Construction and Reconstruction. 2014. No. 1 (51). Pp. 3–10. (rus)

11. Etteyeb N., Sanchez M., Dhouibi L., Alonso C., Andrade C., Triki E. Corrosion protection of steel reinforcement by a pre-treatment phosphate solution. Assessment of passivity by electrochemical tech-

niques. Corrosion Engineering Science and Technology. 2006. Vol. 41(4). P. 336–341. DOI: 10.1179/174327806X120775

12. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Erofeev V.T. On modern methods of ensuring the durability of reinforced concrete structures [O sovremennykh metodah obespecheniya dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstrukcij]. Academia. Architecture and Construction. 2015. No. 1. Pp. 93–102. (rus)

13. Cao C., Cheung M. Non-uniform rust expansion for chloride-induced pitting corrosion in RC structures. Constr. Build. Mater. 2014. Vol. 51. Pp. 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.042>.

14. Lesnaya V.I. Concrete carbonization in building structures [Karbonizatsiya betona v konstrukciyakh zdaniy]. Vologdinskije chteniya. 2003. No. 37. Pp. 86–87. (rus)

15. Vasiliev A.A., Shevchenko D.N. Mathematical calculation-experimental model of the initial carbonization of concrete [Matematicheskaya raschetno-eksperimental'naya model' nachal'noj karbonizatsii betona]. Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport. 2016. No. 2 (33). Pp. 176–179. (rus)

16. Goglev I.N. A new promising method for detecting carbonation reinforced building structures in practice surveys. Smart Composite in Construction. 2021. Vol. 2. No. 4. Pp. 35–45.

Information about the authors

Goglev, Ilya N. Applicant. E-mail: azidplumbum00@mail.ru. Ivanovo State Polytechnic University. Russia, 153000, Ivanovo, Sheremetevsky pr., 21

Loginova, Svetlana A. PhD. Associate Professor of the Department of Building Structures. E-mail: sl79066171227@yandex.ru. Yaroslavl State Technical University Russia, 150023, Yaroslavl, Moskovsky pr., 88

Received 14.03.2022

Для цитирования:

Гоглев И.Н., Логинова С.А. Новый индикаторный метод определения зон карбонизации в бетонных и железобетонных конструкциях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 8. С. 00–00. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-8-16

For citation:

Goglev I.N., Loginova S.A. New indicator method for determining carbonization zones in concrete and reinforced concrete structures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 8. Pp. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-8-16

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-17-26

Фролова М.А.

Северный Арктический федеральный университет имени М.В. Ломоносова

E-mail: aizenmaria@gmail.com

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ МИНЕРАЛЬНЫХ КВАРЦСОДЕРЖАЩИХ ПОРОШКОВ

Аннотация. На примере высокодисперсных порошков кварцевого песка, характеризующегося содержанием SiO_2 – 98,3 % отработаны методические приемы пробоподготовки опытных образцов для последующего определения удельной поверхностной энергии методом Оунса–Вендта–Рабеля–Кьельбле (ОВРК). С этой целью сырьевой материал был диспергирован сухим помолом на планетарной шаровой мельнице, время механической активации изменялось в диапазоне 15÷45 мин. Было получено пять фракций высокодисперсных порошков, которые охарактеризованы по величине удельной поверхности. Данный параметр изменялся в следующем диапазоне: $1200 \div 3000 \text{ кг/м}^2$. Опытные образцы для последующего исследования методом ОВРК были изготовлены путем прессования при величине усилия прессования от 2 до 16 тонн. В качестве критерия оптимизации условий пробоподготовки предложен коэффициент детерминации функциональной зависимости косинуса угла смачивания поверхности опытных образцов рабочими жидкостями (декан, глицерин, вода) от дисперсионной составляющей их поверхностного натяжения.

Установлено, что для используемого кварцевого песка максимальное значение коэффициента детерминации (0,94) отмечается при усилии прессования высокодисперсных фракций, равного двум тоннам. Увеличение удельной поверхности порошковых материалов более 2370 кг/м^2 , полученных методом механического диспергирования и увеличении усилия прессования до 12÷16 т, приводит к дополнительным погрешностям определения поверхностного натяжения уплотненных опытных образцов методом ОВРК.

Ключевые слова: высокодисперсные порошки кварцевого песка, удельная поверхностная энергия, метод ОВРК, коэффициент детерминации, усилие прессования.

Введение. Управление структурообразованием и, в конечном итоге, свойствами бетонной смеси или готового бетона основано на использовании химических и минеральных добавок. Минеральные добавки (порошки минеральных пород) природного (горные породы) и техногенного (молотые шлаки, зола и т. д.) происхождения выполняют функции заполнителя, наполнителя, уплотнителя, модификатора [1–5]. В связи с такой полифункциональностью важным критерием при оценке возможностей использования минерального порошка (например, как заполнителя – уплотняющего структуру бетона, или наполнителя – уменьшающего расход цемента) является характеристика его активности [6–8], проявляющаяся в свободной поверхностной энергии рассматриваемых дисперсных системах [9–12]. Другим критерием склонности дисперсной системы к возможной самопроизвольной агрегации частиц за счет ван-дер-ваальсового взаимодействия, является величина постоянной Гамакера [11, 13]. Поэтому понятен проявляемый интерес исследователей к вопросам, связанным с количественным определением данных параметров. В этом плане в последнее время получили широкое распространение методы, осно-

ванные на измерении угла смачивания поверхности рабочими жидкостями (А. Зисмана, ОВРК [11, 12, 14–17]), образованной анализируемыми системами, причем в случае исследования минеральных порошков пробоподготовка включает в себя процесс уплотнения дисперсной системы под избыточной нагрузкой [18]. Кроме того, можно отметить, что измерение краевых углов смачивания позволяет подойти к решению вопросов, связанных с оценкой структурообразующей способности по потенциалу притяжения Ван-Дер-Ваальса и совместимости компонентов смеси с учетом постоянной Гамакера, рассчитываемой по уравнению Дерягина [19–21].

В работах [13, 16, 18, 21] представлены важные результаты методических подходов при расчете энергетических параметров поверхности порошков (удельной величины поверхностной энергии, численно равной поверхностному натяжению) с использованием метода Оунса–Вендта–Рабеля–Кьельбле при использовании в качестве рабочих жидкостей декана, глицерина и воды, однако учитывая зависимость краевого угла смачивания от шероховатости поверхности (уравнение Венцеля–Дерягина [12]), в настоящее время остается неопределенным фактор выбора

величины избыточного усилия прессования исходного порошка в процессе пробоподготовки (данный параметр для большинства работ составляет от 2 до 16 тонн).

Поэтому целью данной работы является оптимизация условий изготовления опытных образцов порошковых систем по усилию прессования при реализации метода ОВРК. В этом случае в качестве критерия оптимизации может служить коэффициент детерминации (R^2) линейной зависимости между $\cos\theta$ и обратной величиной поверхностного натяжения рабочих жидкостей ($1/\sigma_{\text{ж}}$), которая следует из уравнения Дерягина:

$$\cos\theta - 1 = \frac{A_{01}}{12\pi h} \cdot \frac{1}{\sigma_{\text{ж}}}, \quad (1)$$

где A_{01} – постоянная Гамакера на границе твердое тело-раствор («0» и «1» – обозначение жидкой и твердой фаз, соответственно); h – ван-дер-ваальсовое расстояние, 0,24 нм.

Однако, надо учитывать тот факт, что A_{01} в данном случае (при реализации метода ОВРК) не является строгой термодинамической величиной, так как смачивание поверхности опытных образцов происходит различными по природе жидкостями и по этой причине рассчитать непосредственно аналоговую величину постоянной Гамакера по алгоритму, приведенному в [21] не представляется возможным. Кроме того, для построения зависимости (1) вместо поверхностного натяжения жидкости необходимо использовать соответствующую величину ее дисперсионной составляющей ($\sigma_{\text{с}}^{\text{д}}$).

Материалы и методы. В качестве пилотного объекта исследования был выбран кварцевый песок, который использован авторами при проведении экспериментов в работе [23]. Химический состав исходных образцов определен по

результатам рентгенофлуоресцентного анализа, выполненного с помощью анализатора ПРФА «МетЭксперт». Образцы механически активировали до получения разной величины площади удельной поверхности путем сухого измельчения в планетарно-шаровой мельнице Retsch PM100 при скорости вращения ротора 420 об/мин. Исходный кварцевый песок диспергировали в течение 15, 25, 30 и 45 минут. Удельная поверхность тонкодисперсных порошков измерена на анализаторе Autosorb-iQ-MP. Для исследований из полученных порошков на гидравлическом прессе ПЛГ-20 изготовлены образцы-запрессовки диаметром 30 мм при воздействии в течение 2 минут фиксированного избыточного усилия (p) 2, 4, 8, 12 и 16 тонн. Экспериментальные значения краевого угла смачивания (θ) поверхностей образцов-запрессовок рабочими жидкостями с известными дисперсионными составляющими ($\sigma_{\text{с}}^{\text{д}}$) поверхностного натяжения (вода, глицерин, декан) были определены с помощью гониометра DSA-20E (EasyDrop). Для нахождения функциональной взаимосвязи между значениями $(\cos\theta - 1)$ и $1/\sigma_{\text{с}}^{\text{д}}$ использовали следующие значения дисперсионной составляющей поверхностного натяжения рабочих жидкостей [24, 25]: вода – 23,8 мН/м; глицерин – 37,0 мН/м; декан – 21,8 мН/м.

Основная часть. Минеральный состав показал, что исследуемый образец кварцевого песка содержит (в пересчете на оксиды) 98,3% SiO_2 , в качестве примесей были обнаружены оксиды железа и титана. В таблице 1 представлены значения удельной поверхности ($S_{\text{уд}}$) порошков кварцевого песка, полученных при разном времени механического помола (t).

Таблица 1

Значение удельной поверхности порошков кварцевого песка при разном времени механического помола

t , мин	0	15	25	30	45
$S_{\text{уд}}$, кг/м ²	1200	2370	2690	3000	1570

Зависимости $S_{\text{уд}}=f(t)$ имеют экстремум при времени помола порядка 30 мин, этот факт позволяет сделать вывод, что это время механической активации является оптимальным для исследуемого образца кварцевого песка. При продолжительности помола более 30 мин происходит снижение величины удельной поверхности, что на наш взгляд объясняется наличием значительного избытка свободной поверхностной энергии дисперсной системы и стремлением самопроизвольно уменьшить этот параметр за счет агрегации твердых частиц порошков при увеличении времени механической активации.

В таблице 2 приведены экспериментальные результаты по определению угла смачивания поверхности образцов и рассчитанные значения косинуса этого параметра (приведены средние значения угла по трем параллельным измерениям). Установлено, что для используемого порошка кварцевого песка при использовании органических рабочих жидкостей (декан, глицерин) с увеличением давления прессования угол смачивания уменьшается. Обратный эффект наблюдается в случае применения в качестве рабочей жидкости воды. В этом варианте для всех серий экспериментов наблюдается увеличение угла смачивания, при этом изменение значений $\cos\theta$

(рис.1) имеет линейный характер (в отличие от декана и глицерина).

На рисунках 2–4 представлены функциональные зависимости $\cos\theta=f(S_{уд})$ для используемых рабочих жидкостей для уплотненных дисперсных образцов, полученных при различном усилии уплотнения. Приведенные данные показывают, что в случае использования декана в качестве смачивающей жидкости значения $\cos\theta$

практически не зависят от удельной поверхности для образцов, полученных при разном усилии уплотнения. Для глицерина и воды наблюдается область независимости косинуса угла смачивания от удельной поверхности для исследуемого образца кварцевого песка. Можно заключить, что критическое значение удельной поверхности порошков при любом режиме прессования в этом случае составляет 2370 кг/м^2 .

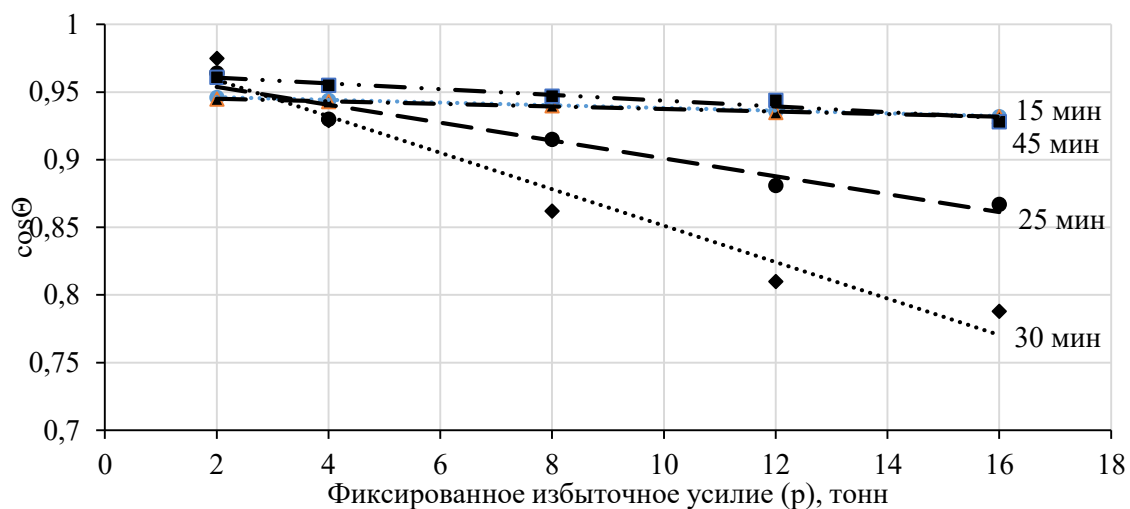
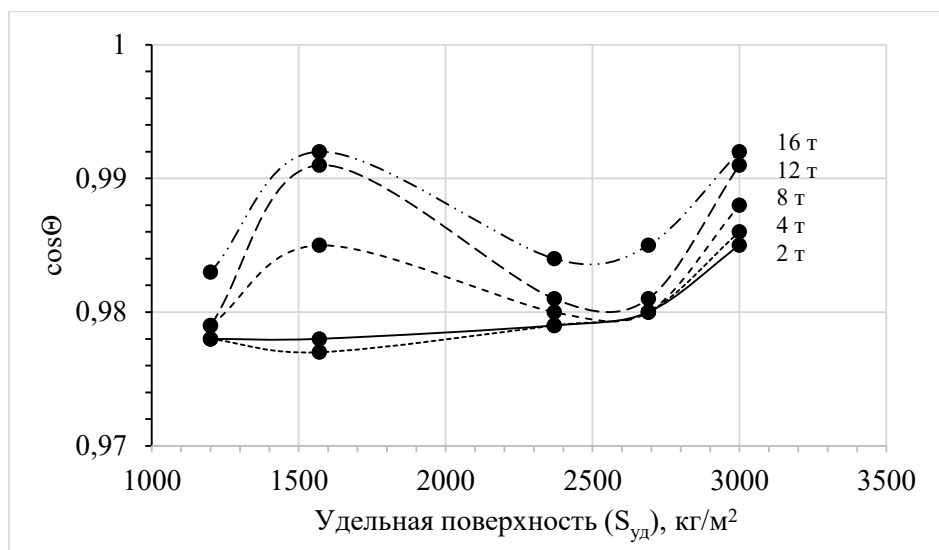
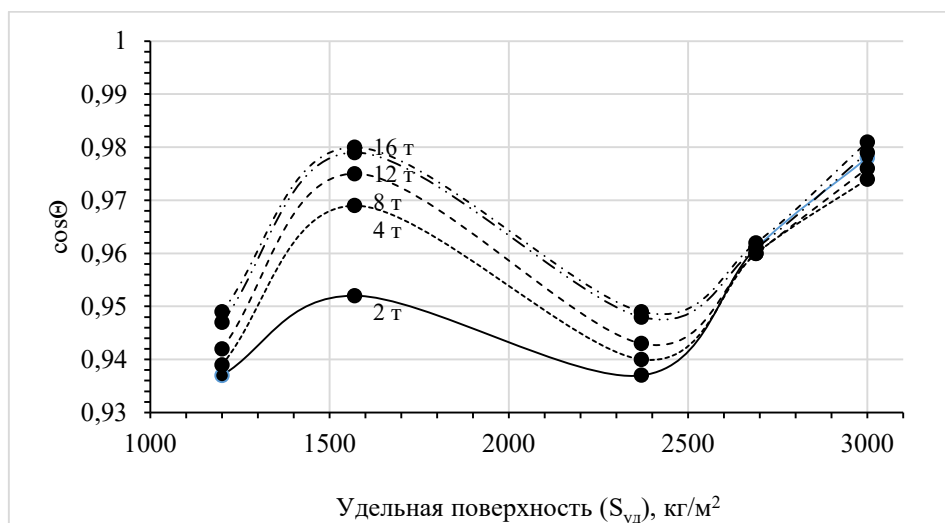
Таблица 2

Экспериментальные и расчетные данные для образцов-запрессовок кварцевого песка

Время помола, мин	Усилие прессования, т	Краевые углы смачивания, $\theta_{ср} \pm 0,1, ^\circ$			$\cos\theta_{ср}$		
		декан	глицерин	вода	декан	глицерин	вода
0	2	12,0	20,5	19,1	0,978	0,937	0,945
	4	12,0	20,1	19,4	0,978	0,939	0,943
	8	11,9	19,6	19,9	0,979	0,942	0,940
	12	11,9	18,7	20,7	0,979	0,947	0,935
	16	10,6	18,4	21,3	0,983	0,949	0,932
15	2	11,7	20,4	19,0	0,979	0,937	0,946
	4	11,7	20,0	19,2	0,979	0,940	0,944
	8	11,5	19,5	19,8	0,980	0,943	0,941
	12	11,3	18,6	20,6	0,981	0,948	0,936
	16	10,3	18,3	21,2	0,984	0,949	0,932
25	2	11,6	16,1	15,4	0,980	0,961	0,964
	4	11,5	16,3	21,6	0,980	0,960	0,930
	8	11,4	16,2	23,8	0,980	0,960	0,915
	12	11,1	16,0	28,2	0,981	0,961	0,881
	16	10,1	15,9	29,7	0,985	0,962	0,869
30	2	9,8	12,0	12,8	0,985	0,978	0,975
	4	9,7	13,0	21,7	0,986	0,974	0,929
	8	8,9	12,4	30,5	0,988	0,977	0,862
	12	7,8	11,8	35,9	0,991	0,979	0,810
	16	7,3	11,2	38,0	0,992	0,981	0,788
45	2	14,4	17,9	16,0	0,969	0,952	0,961
	4	12,2	14,2	17,3	0,977	0,969	0,955
	8	9,9	12,8	18,8	0,985	0,975	0,947
	12	7,9	11,8	19,2	0,991	0,979	0,944
	16	7,3	11,5	22,0	0,992	0,980	0,927

Таким образом, области для которых отсутствует влияние удельной поверхности (размерных характеристик частиц, шероховатости поверхности и пр.) запрессованных образцов порошков кварцевого песка позволяют определить возможные оптимальные условия подготовки опытных образцов для реализации метода ОВРК. Так для воды и глицерина усилии прессования 2 тонны, при этом удельная поверхность должна иметь значения порядка 2370 кг/м^2 . Для декана можно использовать эти значения в более широ-

ком диапазоне, но для унификации пробоподготовки используем аналогичные значения усилии прессования и удельной поверхности. На рисунке 5 представлена функциональная зависимость $\cos\theta-1=f(1/\sigma_s^d)$, которая имеет линейный характер, с коэффициентом детерминации (доверности аппроксимации) $R^2=0,94$. Кроме того, для сравнительного анализа представлены аналогичные зависимости для других условий пробоподготовки, которые имеют значительно более низкое значение показателя R^2 .

Рис. 1. Функциональная зависимость $\cos\theta=f(p)$ для воды при различном времени механического помолаРис. 2. Функциональная зависимость $\cos\theta=f(S_{уд})$ для образцов, обработанных деканом при различном усилии прессованияРис. 3. Функциональная зависимость $\cos\theta=f(S_{уд})$ для образцов, обработанных глицерином при различном усилии прессования

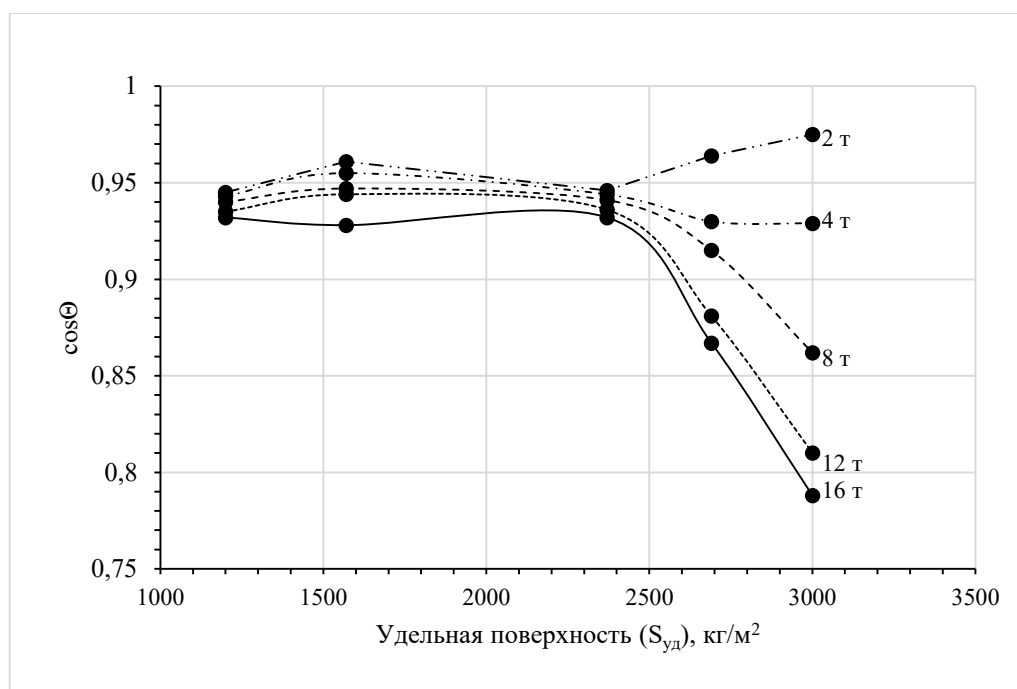


Рис. 4. Функциональная зависимость $\cos\theta=f(S_{уд})$ для образцов, обработанных водой при различном усилии прессования

Таким образом, при реализации метода определения поверхностного натяжения (удельной свободной поверхностной энергии) минеральных порошков на основе кварцсодержащих горных пород методом Оунса–Вендта–Рабея–Кьельбле необходимо учитывать не только смачиваемость поверхности опытных образцов рабочими жидкостями, но и ее шероховатость, препятствующую растеканию капли жидкости на границе раздела фаз. Данный эффект наиболее заметно проявляется для водной среды, для декана влияние неоднородности поверхности опытных образцов практически не проявляется.

Для процесса пробоподготовки опытных образцов из порошков разной степени дисперсности необходимо в результате предварительных исследований установить зависимость косинуса угла смачивания от величины удельной поверхности исходного материала, которая должна быть использована при определении диапазона усилий прессования, для которого данная зависимость практически отсутствует или проявляется слабо. Так, например, для используемого кварцевого песка этот факт отмечается при усилии прессования, равного двум тоннам. Следует отметить, что увеличение удельной поверхности порошковых материалов методом механического диспергирования более 2370 кг/м² и увеличение усилия прессования до 12÷16 т, приводит к дополнительным погрешностям определения поверхностного натяжения уплотненных опытных образцов методом ОВРК. Данный эффект может быть связан с дополнительным неконтро-

лируемым разрушением кристаллической структуры частиц анализируемого материала и, как следствие, увеличением неоднородности поверхности. В качестве критерия оптимизации условий пробоподготовки предложен коэффициент детерминации функциональной зависимости $\cos\theta-1=f(1/\sigma_s^d)$.

Вместе с тем, отмечено, что при механическом размоле сырьевого материала минеральных кварцсодержащих горных пород значительное увеличение времени диспергирования может приводить к уменьшению значений удельной поверхности, связанное с самопроизвольной агрегацией частиц. Так, для исследуемого порошка кварцевого песка данный эффект проявляется при увеличении времени помола более 30 мин.

Выводы

Таким образом, на основании вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что при реализации метода определения поверхностного натяжения (удельной свободной поверхностной энергии) минеральных порошков на основе кварцсодержащих горных пород методом ОВРК необходимо учитывать не только смачиваемость поверхности опытных образцов рабочими жидкостями, но и ее шероховатость, препятствующую растеканию капли жидкости на границе раздела фаз.

2. В качестве критерия оптимизации условий пробоподготовки предложен коэффициент детерминации функциональной зависимости косинуса угла смачивания поверхности опытных

образцов рабочими жидкостями (декан, глицерин, вода) от дисперсионной составляющей их поверхностного натяжения, $\cos\theta-1=f(1/\sigma_s^d)$.

3. Установлено, что для кварцевого песка

максимальное значение коэффициента детерминации (0,94) отмечается при усилении прессования высокодисперсных фракций, равного двум тоннам.

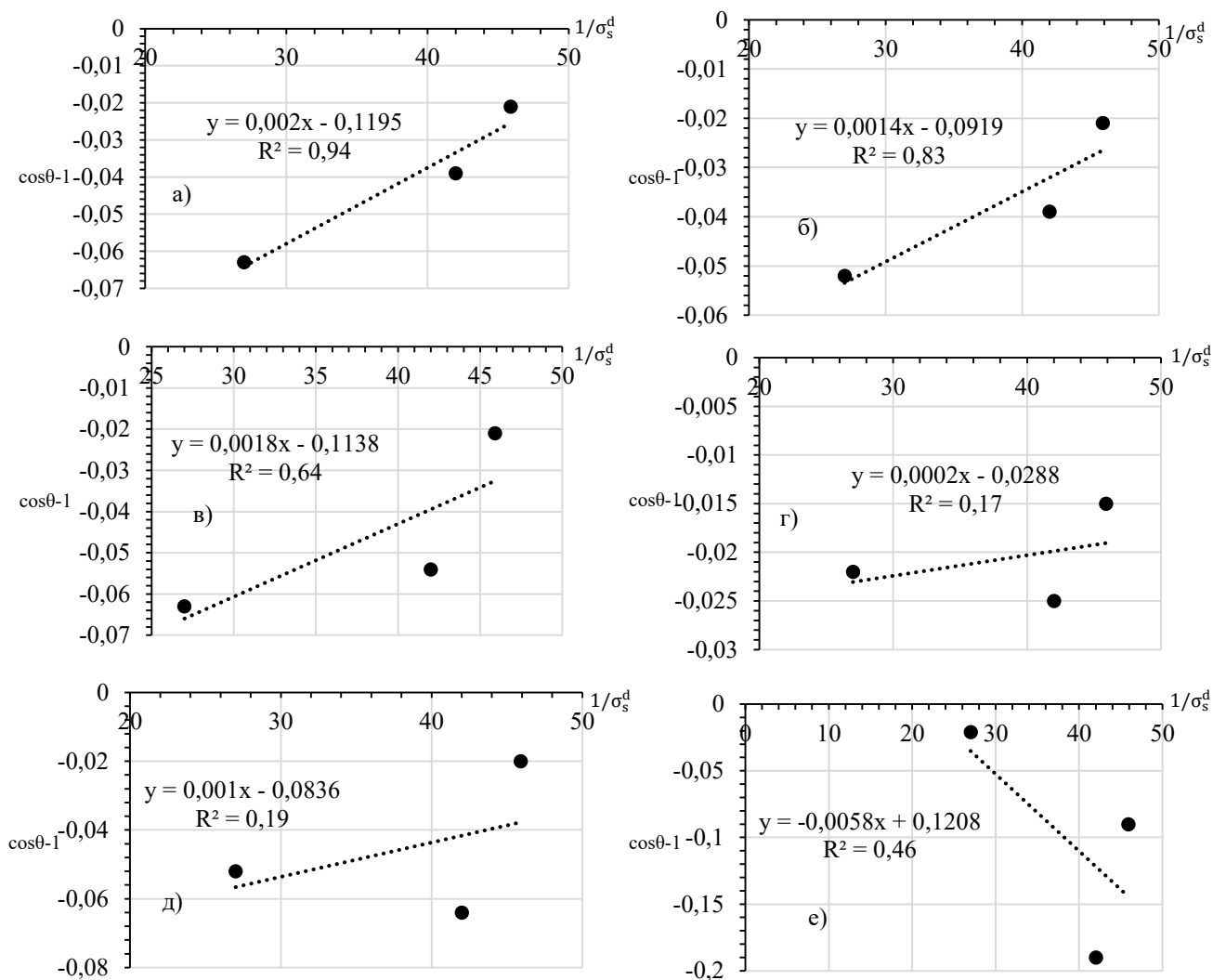


Рис. 5. Функциональная зависимость $\cos\theta-1=f(1/\sigma_s^d)$:

- а) $p = 2$ т (вода, глицерин, декан), 2370 кг/м^2 ; б) $p = 2$ т (вода, декан), $p = 12$ т (глицерин), 2370 кг/м^2 ;
 в) $p = 2$ т (вода), 2690 кг/м^2 , глицерин, декан (2370 кг/м^2));
 г) $p = 2$ т (вода, глицерин, декан), 3000 кг/м^2 ; $p = 12$ т (вода, глицерин, декан), 2370 кг/м^2 ;
 е) $p = 12$ т (вода, глицерин, декан), 3000 кг/м^2

Источник финансирования. Исследования проводились на уникальном научном оборудовании «Физическая химия поверхностей нанодисперсных систем» при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-23-00047.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нелюбова В.В., Усиков С.А., Строкова В.В., Нецвет Д.Д. Состав и свойства самоуплотняющегося бетона с использованием комплекса

модификаторов // Строительные материалы. 2021. №12. С. 48–54.

2. Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Сальникова А.С., Казлитин О.В. К вопросу повышения эффективности высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 1(46). С. 20–27.

3. Королев Е.В., Гришина А.Н., Айзенштадт А.М. Композиционные материалы как полидисперсные Системы. Эффективные модели // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 3. С.16–25.

4. Каприелов С.С., Батраков В.Г., Шейнфельд А.В. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива // Бетон и железобетон. 1999. № 6. С. 6–10.
5. Alos Dushimimana A., Niyonsenga A.A., Nzamurambaho F. A review on strength development of high performance concrete // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 307. 124865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124865>
6. Вешнякова Л.А., Айзенштадт А.М., Фролова М. А. Оценка поверхностной активности высокодисперсного сырья для композиционных строительных материалов // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 2. С. 68–72.
7. Вешнякова Л.А., Дроздук Т.А., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Тутыгин А.С. Поверхностная активность кремнесодержащих горных пород // Материаловедение. 2016. № 5. С. 45–48.
8. Морозова М.В. Активность поверхности высокодисперсных систем на основе сапонит-содержащего отхода алмазодобывающей промышленности // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2018. № 2. С. 5–11.
9. Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р. Определение удельной свободной поверхностной энергии бесклнкерных композитов на вяжущем щелочной активации // Строительные материалы. 2022. № 1–2. С. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-30-39>.
10. Danilov V. E., Ayzenshtadt A.M., Frolova M. A., Tutygin A.S. Dispersion Interactions as Criterion of Optimization of Cementless Composite Binders // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. Vol. 9. No. 4. Pp. 767–771.
11. Яковец Н.В., Крутько Н.П., Опанасенко О.Н. Определение свободной поверхностной энергии порошкообразных смолисто-асфальтовых веществ методом Оуэнса-Вендта-Рабея-Каелбле // Свиридовские чтения, Минск. 2012. Вып.8. С. 253–260.
12. Волков В.А. Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы: Учебник. СПб.: Издательство «Лань». 2015. 672 с.
13. Danilov V.E., Korolev E.V., Ayzenshtadt A.M. Measuring the Contact Angles of Powders by the Sessile Drop Method // Inorganic Materials: Applied Research. 2021. Vol. 12. No. 3. Pp. 794–798.
14. Баранников А.А., Постнов В.И., Вешкин Е.А., Старостина И.В. Связь энергетических характеристик поверхности стеклопластика марки ВПС-53К с прочностью клеевого соединения на его основе // Труды ВИАМ. 2020. №10(92). С. 40–50.
15. Фролова М.А., Тутыгин А.С., Айзенштадт А.М., Лесовик В.С., Махова Т.А., Поспелова Т.А. Критерий оценки энергетических свойств поверхности // Наносистемы: физика, химия, математика. 2011. № 2 (4). С. 120–125.
16. Соколова Ю.В., Айзенштадт А.М. Оценка дисперсионного взаимодействия в алюмосиликатной системе под действием органической добавки // Физика и химия обработки материалов. 2017. № 4. С. 83–88.
17. Susana L., Campaci F., Santomaso A.C. Wettability of mineral and metallic powders: Applicability and limitations of sessile drop method and Washburn's technique // Powder Technology. 2012. Vol. 226. Pp. 68–77.
18. Shamanina A.V., Kononova V.M., Danilov V.E., Frolova M.A., Aizenshtadt A. M. Aspects of Determining the Surface Activity of Dispersed Systems Based on Mineral Powders // Inorganic Materials: Applied Research. 2022. Vol. 13. No. 1. Pp. 194–199.
19. Дерягин Б.Д., Чураев Н.В. Смачивающие пленки. М.: Изд-во «Наука». 1984. 160 с.
20. Русанов А.И. К термодинамике тонких пленок. Уравнение Фрумкина-Дерягина // Коллоидный журнал. 2020. Том 82. № 1. С. 75–81.
21. Айзенштадт А.М., Королев Е.В., Дроздук Т.А., Данилов В.Е., Фролова М.А. Возможный подход к оценке дисперсионного взаимодействия в порошковых системах // Физика и химия обработки материалов. 2021. № 3. С. 40–48.
22. Соколова Ю.В., Айзенштадт А.М., Королев Е.В., Чибисов А.А. Оценка влияния рецептурных факторов на структурообразование полимер-органического связующего // Строительные материалы. 2020. № 9. С. 27–36.
23. Шаманина А.В., Айзенштадт А.М., Кононова В.М., Данилов В.Е. Оценка эффективности механоактивации кремнеземсодержащих горных пород // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. Том 6. №5. С. 19–27.
24. Данилов В.Е., Королев Е.В., Айзенштадт А.М., Строкова В.В. Особенности расчета свободной энергии поверхности на основе модели межфазного взаимодействия Оунса–Вендта–Рабея–Къельбле // Строительные материалы. 2019. № 11. С. 66–72.
25. Ariawan D., Mohd Ishak Z.A., Salim M.S., Mat Taib R., Ahmad Thirmizir M.Z. Wettability and interfacial characterization of alkaline treated kenaf fiber-unsaturated polyester composites fabricated by resin transfer molding // Polymer Composites. 2017. Vol. 38. Iss. 3. Pp. 507–515.

Информация об авторах

Фролова Мария Аркадьевна, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры композиционных материалов и строительной экологии. Северный Арктический федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, 163002, Архангельская область, г. Архангельск, ул. Набережная Северной Двины, д. 17

Поступила 15.04.2022 г.

© Фролова М.А., 2022

Frolova M.A.

Northern Arctic Federal University named after M. V. Lomonosov

E-mail: aizenmaria@gmail.com

METHODOLOGICAL FEATURES OF DETERMINATION THE SPECIFIC SURFACE ENERGY OF MINERAL QUARTZ-CONTAINING POWDERS

Abstract. Methods for sample preparation of prototypes for the subsequent determination of the specific surface energy by the Owens, Wendt, Rabel and Kaelble (OWRK) method are worked out on the example of highly dispersed powders of quartz sand, characterized by a SiO_2 content of 98.3 %. For this purpose, dry grinding in a planetary ball mill disperses the raw material, the mechanical activation time is varied in the range of 15–45 min. Five fractions of highly dispersed powders are obtained. They are characterized by the specific surface area. This parameter is changed in the following range: 1200–3000 kg/m^2 . Prototypes for subsequent research by the OWRK method are made by pressing with a pressing force of 2 to 16 tons. As a criterion for optimizing sample preparation conditions, the coefficient of determination of the functional dependence of the cosine of the wetting angle of the surface of test samples with working fluids (decane, glycerin, water) on the dispersion component of their surface tension is proposed. It has been established that for the quartz sand used, the maximum value of the coefficient of determination (0.94) is noted at a pressing force of fine fractions equal to two tons. An increase in the specific surface area of powder materials over 2370 kg/m^2 , obtained by mechanical dispersion and an increase in pressing force up to 12–16 tons, leads to additional errors in determining the surface tension of compacted prototypes by the OWRK method.

Keywords: highly dispersed powders of quartz sand, specific surface energy, OWRK method, coefficient of determination, pressing force.

REFERENCES

1. Nelyubova V.V., Usikov S.A., Strokova V.V., Netsvet D.D. Composition and properties of self-compacting concrete using a complex of modifiers [Sostav i svoystva samouplotnyayushchegosya betona s ispol'zovaniem kompleksa modifikatorov]. Building materials. 2021. No. 12. Pp. 48–54. (rus)
2. Lesovik V.S., Elistratkin M.Yu., Salnikova A.S., Kazlitin O.V. On the issue of improving the efficiency of high-strength self-compacting concrete [K voprosu povysheniya effektivnosti vysokoprotchnykh samouplotnyayushchihsya betonov]. Regional architecture and construction. 2021. No. 1(46). Pp. 20–27. (rus)
3. Korolev E. V., Grishina A. N., Aizenshtadt A. M. Composite materials as polydisperse systems. Effective models [Kompozitsionnye materialy kak polidispersnye Sistemy. Effektivnye modeli]. Regional architecture and construction. 2021. No. 3. Pp. 16–25. (rus)
4. Kaprielov S.S., Batrakov V.G., Sheinfeld A.V. Modified concrete of a new generation: reality and perspective [Modificirovannye betony novogo pokoleniya: real'nost' i perspektiva]. Beton and reinforced concrete. 1999. No. 6. Pp. 6–10. (rus)
5. Alos Dushimimana A., Niyonsenga A.A., Nzamurambaho F. A review on strength development of high performance concrete. Construction and Building Materials. 2021. Vol. 307. 124865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124865>
6. Veshnyakova L.A., Aizenshtadt A.M., Frolova M.A. Evaluation of the surface activity of highly dispersed raw materials for composite building materials [Ocenka poverhnostnoj aktivnosti vysokodispersnogo syr'ya dlya kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov]. Physics and Chemistry of Materials Processing. 2015. No. 2. Pp. 68–72. (rus)
7. Veshnyakova L.A., Drozdyuk T.A., Aizenshtadt A.M., Frolova M.A., Tutygin A.S. Surface activity of silicon-containing rocks [Poverhnostnaya aktivnost' kremnesoderzhashchih gornykh porod]. Materialovedenie. 2016. No. 5. Pp. 45–48. (rus)
8. Morozova M.V. Activity of the surface of highly dispersed systems based on saponite-containing waste of the diamond mining industry [Aktivnost' poverhnosti vysokodispersnykh sistem na osnove saponit-soderzhashchego othoda almazodobyvayushchej promyshlennosti]. Vestnik BSTU named after V. G. Shukhov. 2018. No. 2. Pp. 5–11. (rus)

9. Salamanova M.Sh., Nakhaev M.R. Determination of the specific free surface energy of clinker-free composites on an alkaline activation binder [Opredelenie udel'noj svobodnoj poverhnostnoj energii besklinsknykh kompozitov na vyazhushchem shchelochnoj aktivacii]. *Stroitel'nye materialy*. 2022. No. 1–2. Pp. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-30-39>. (rus)
10. Danilov V. E., Ayzenshtadt A.M., Frolova M. A., Tutygin A.S. Dispersion Interactions as Criterion of Optimization of Cementless Composite Binders. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. Vol. 9. No. 4. pp. 767–771.
11. Yakovets N.V., Krutko N.P., Opanasenko O.N. Determination of the free surface energy of powdered resinous-asphaltene substances by the Owens-Wendt-Rabel-Kaelble method [Opredelenie svobodnoj poverhnostnoj energii poroshkoobraznykh smolisto-asfal'tenovykh veshchestv metodom Ouensa-Vendta-Rabeliya-Kaelble]. *Sviridovskie readings, Minsk*. 2012. Issue 8. Pp. 253–260. (rus)
12. Volkov V. A. Colloid chemistry. Surface phenomena and disperse systems [Kolloidnaya himiya. Poverhnostnye yavleniya i dispersnye sistemy]: Textbook. - 2nd ed. St. Petersburg: Publishing house "Lan". 2015. 672 p. (rus)
13. Danilov V.E., Korolev E.V., Ayzenshtadt A.M. Measuring the Contact Angles of Powders by the Sessile Drop Method. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2021. Vol. 12. No. 3. Pp. 794–798.
14. Barannikov A.A., Postnov V.I., Veshkin E.A., Starostina I.V. Connection of the energy characteristics of the surface of fiberglass grade VPS-53K with the strength of the adhesive joint based on it [Svyaz' energeticheskikh harakteristik poverhnosti stekloplastika marki VPS-53K s prochnost'yu kleevogo soedineniya na ego osnove]. *Proceedings of VIAM*. 2020. No. 10(92). Pp. 40–50. (rus)
15. Frolova M.A., Tutygin A.S., Aizenshtadt A.M., Lesovik V.S., Makhova T.A., Pospelova T.A. Criteria for evaluating the energy properties of the surface [Kriterij ocenki energeticheskikh svojstv poverhnosti]. *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*. 2011. No. 2 (4). Pp. 120–125. (rus)
16. Sokolova Yu.V., Aizenshtadt A.M. Evaluation of dispersion interaction in an aluminosilicate system under the action of an organic additive [Ocenka dispersionnogo vzaimodejstviya v al'yumosilikatnoj sisteme pod dejstviem organicheskoy dobavki]. *Physics and Chemistry of Materials Processing*. 2017. No. 4. Pp. 83–88. (rus)
17. Susana L., Campaci F., Santomaso A.C. Wettability of mineral and metallic powders: Applicability and limitations of sessile drop method and Washburn's technique. *Powder Technology*. 2012. Vol. 226. Pp. 68–77.
18. Shamanina A.V., Kononova V.M., Danilov V.E., Frolova M.A., Aizenshtadt A. M. Aspects of Determining the Surface Activity of Dispersed Systems Based on Mineral Powders. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2022. Vol. 13. No. 1. Pp. 194–199.
19. Deryagin B.D., Churaev N.V. Wetting films [Smachivayushchie plenki]. M.: Publishing house "Nauka", 1984. 160 p. (rus)
20. Rusanov A.I. On the thermodynamics of thin films. Frumkin-Deryagin equation [K termodinamike tonkih plenok. Uravnenie Frumkina-Deryagina] *Colloid journal*. 2020. Vol. 82. No. 1. Pp. 75–81. (rus)
21. Aizenstadt A.M., Korolev E.V., Drozdnyuk T.A., Danilov V.E., Frolova M.A. A possible approach to the evaluation of dispersion interaction in powder systems [Vozmozhnyj podhod k ocenke dispersionnogo vzaimodejstviya v poroshkovykh sistemah]. *Physics and Chemistry of Materials Processing*. 2021. No. 3. Pp. 40–48. (rus)
22. Sokolova Yu.V., Aizenshtadt A.M., Korolev E.V., Chibisov A.A. Evaluation of the influence of prescription factors on the structure formation of a polymer-organic binder [Ocenka vliyaniya recepturnykh faktorov na strukturoobrazovanie polimer-organicheskogo svyazuyushchego]. *Stroitel'nye materialy*. 2020. No. 9. Pp. 27–36. (rus)
23. Shamanina A.V., Aizenstadt A.M., Kononova V.M., Danilov V.E. Evaluation of the efficiency of mechanical activation of silica-containing rocks [Ocenka effektivnosti mekhanoaktivacii kremnezemsoderzhashchih gornykh porod]. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2021. Vol. 6. No. 5. Pp. 19–27. (rus)
24. Danilov V.E., Korolev E.V., Aizenshtadt A.M., Strokova V.V. Peculiarities of calculation of surface free energy based on the Ouns-Wendt-Rabel-Kjellble interfacial interaction model [Osobennosti rascheta svobodnoj energii poverhnosti na osnove modeli mezhfaznogo vzaimodejstviya Ounsa-Vendta-Rabeliya-K'el'ble]. *Stroitel'nye materialy*. 2019. No. 11. Pp. 66–72. (rus)
25. Ariawan D., Mohd Ishak Z.A., Salim M.S., Mat Taib R., Ahmad Thirmizir M.Z. Wettability and interfacial characterization of alkaline treated kenaf fiber-unsaturated polyester composites fabricated by resin transfer molding. *Polymer Composites*. 2017. Vol. 38. Iss. 3. Pp. 507–515.

Information about the authors

Frolova, Maria A. PhD. E-mail: aizenmaria@gmail.com, Northern Arctic Federal University named after M. V. Lomonosov, Russia, 163002, Arkhangelsk, st. Northern Dvina river emb., 17

Received 15.04.2022

Для цитирования:

Фролова М.А. Методические особенности определения удельной поверхностной энергии минеральных кварцсодержащих порошков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 8. С. 17–26. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-17-26

For citation:

Frolova M.A. Methodological features of determination the specific surface energy of mineral quartz-containing powders. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 8. Pp. 17–26. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-17-26

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-27-34

Донченко О.М., *Сулейманова Л.А., Крючков А.А., Логачев К.И.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: kafedrasigsh@mail.ru

УНИВЕРСАЛЬНАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДЕФОРМАТИВНО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ АРМАТУРНЫХ

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные вопросы нормативной методики расчета изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов по нормальным сечениям, основанной на совместном использовании нелинейной деформационной модели, гипотезы плоских сечений, физически и геометрически линейных диаграмм механического состояния арматурных сталей различной прочности при силовом растяжении. Обращается внимание на значительные неточности таких расчетов при использовании приближенного прямолинейного модуля деформации стали постоянного значения $E = 2 \cdot 10^5$ МПа до самого предела прочности стали. Подтверждается высокая степень сложности ручного счета при использовании действительных значений физически нелинейного модуля деформаций стали, аппроксимированного аналитическими зависимостями высоких степеней. На основании обзора и анализа широкого круга экспериментальных исследований, разработан подход, основанный на простом и достаточно точном аналитическом решении по определению секущего модуля деформаций для сталей, в том числе с ограниченными пластическими свойствами. Приводится новый авторский подход для решения таких задач посредством аппроксимации действительного нелинейного модуля деформаций в секущий модуль деформаций E'_s несложными уравнениями для высокопрочных «твердых» и «мягких» (не высокой и средней прочности) сталей, позволяющий проводить ручной счет подобных задач с большей точностью.

Ключевые слова: изгибаемые элементы, внецентренно сжатые элементы, железобетонные элементы, линейность, нелинейность, секущий модуль деформации.

Введение. Для многих вопросов и задач сопротивления и нормативной методики [1] расчета железобетонных конструкций необходима физически верная и аналитически точная зависимость действительных деформативно-прочностных свойств $\varepsilon_s = \varphi(\sigma_s)$ арматурных сталей при силовом растяжении. Особенно это важно при расчете изгибаемых и внецентренно сжатых элементов по нормальным сечениям для установления в соответствии с нелинейной деформационной моделью распределения относительных деформаций бетона и арматуры по высоте сечения по линейному закону гипотезы плоских сечений. Полученные при этом недостаточно верные значения относительных деформаций растянутой арматуры ε_s при ее заданных значениях высокого уровня напряжения σ_s приводят к значительно ошибочным значениям относительных деформаций ε_b и напряжений σ_b бетона сжатой зоны и предельных усилий изгибаемого момента M . Это должно постоянно происходить при использовании в таких расчетах постоянного значения модуля деформации стали $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа до физического предела текучести R_y «мягких» и условного предела текучести σ_{a2} «твердых» сталей.

Действительно, недостаточно верное назначение величины относительной деформации высокопрочной стали, соответствующей высокому уровню ее напряжения, согласно гипотезы плоского сечения обязательно уже на уровне первой

итерации расчета приводит к неверному расчетному значению относительной деформации и соответствующего ей напряжения в сжатом бетоне. А поскольку при решении таких задач по нелинейной деформационной модели приходится производить большое количество (4–15) итераций, то каждая последующая из них может приводить к постоянному увеличению погрешности всего расчета и, естественно, к недостаточно верному значению несущей способности рассчитываемого элемента.

И если ранее в течение длительного времени нормы многих стран, включая Россию [1], принимали в качестве расчетной аналитической зависимости упрощенную физически линейную связь $\varepsilon_s = \sigma_s/E_s$ с постоянным аналитически линейным и геометрически прямолинейным модулем деформации E_s , полагая вызванные этим численные ошибки незначительными (порядка 15–20 МПа), то в настоящее время при все большем применении арматуры из высокопрочных сталей, такие ошибки численно становятся более значительными, достигая порядка 75–125 МПа, что чревато значительными погрешностями определения проектных расчетных усилий.

Учитывая это, новые нормы России [1, 2] в отношении действительной нелинейности модуля деформации стали по-разному подходят к различным группам арматурных сталей. Как известно, все виды арматурных сталей условно

подразделяются на «мягкие», имеющие на диаграмме растяжения « σ_s - ε_s » площадку текучести, и «твердые», не имеющие таковой. Если основной расчетной характеристикой «мягких» сталей является браковочный минимум физического предела текучести R_L , то для «твердых» сталей в качестве основной гарантированной характеристики принимается браковочный минимум предела прочности R_s . Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ для «твердых» сталей принимается по напряжению, которому соответствует остаточное относительное удлинение 0,2 %.

Для группы «мягких» арматурных сталей невысокой и средней прочности с физическим пределом текучести $R_y \leq 500$ МПа (классов А240-500) нормы [1, 2] разрешают производить

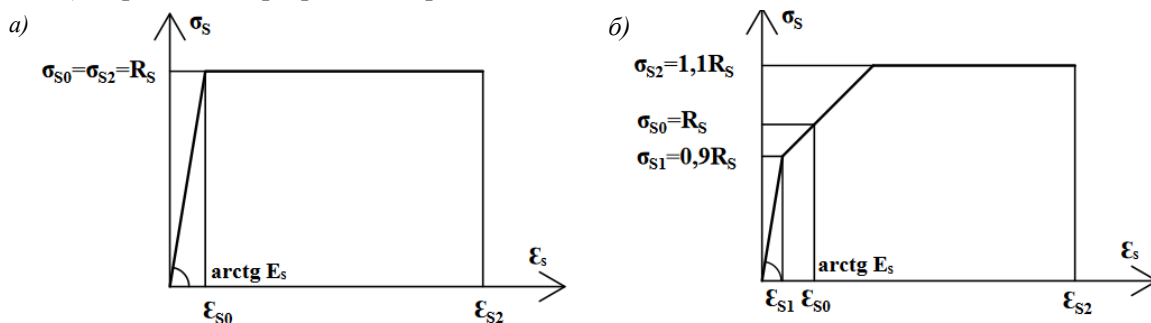


Рис. 1. Нормативные диаграммы силового растяжения арматурных сталей: а – двухлинейная; б – трехлинейная

Такой нормативный подход к установлению искомой связи « σ_s - ε_s » графически по нормам отображается построением различных упрощенных кусочно-прямолинейных диаграмм механического состояния разных групп арматурных сталей. Для группы «мягких» сталей невысокой и средней прочности – это двухлинейная (рис. 1, а), а для высокопрочных «твердых» сталей – трехлинейная (рис. 1, б), но тоже упрощенная кусочно-прямолинейная. При этом нормы [1] заканчивают последнюю диаграмму (рис. 1, б) не у ее предела прочности R_s , равного условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$, а на уровне напряжения, равного $1,1R_s$, что специалистам и проектировщикам совершенно непонятно, вызывая естественные сомнения в правильности использования нормативных прямолинейных диаграмм « σ_s - ε_s » при расчете железобетонных элементов, армированных высокопрочными «твердыми» сталями.

Действительно, как можно аналитически точно отрезками кусочно-прямолинейных диаграмм отразить непрерывную криволинейность фактических линий силового растяжения стали, если действительные ее деформации на средних этапах нагружения при напряжениях $\sigma_s = (0,6-0,75)R_s$, соответственно, на 5,0 и 15,0% по результатам экспериментов многих исследований, в том числе проведенных авторами [3–10], больше упругих по нормативным диаграммам. По дан-

расчеты железобетонных конструкций с принятием модуля деформаций аналитически линейным и геометрически прямолинейным с постоянным значением $2 \cdot 10^5$ МПа до самого предела текучести R_y без зоны самоупрочнения. А для «твердых» высокопрочных сталей классов А800–1000 и В1200–1600 с условным пределом текучести $\sigma_{0,2}$ такие расчеты должны производиться с этим аналитическим линейным и геометрически прямолинейным модулем деформаций E_s аналогично, но уже только до уровня напряжения $0,9R_s$ с прямолинейным изменением его направленности и уменьшением величины на 25 % до условного предела текучести с относительной деформацией $\varepsilon_{sty} = R_s/E_s + 0,002$.

ным этих исследований существенные увеличения неупругих деформаций высокопрочных сталей начинаются уже с 0,35–0,45 от предела их прочности R_s . Да и сами разработчики норм не отрицают значительных отклонений криволинейности модуля деформаций сталей от прямолинейности его по нормам [1], рекомендуя такие участки учитывать в расчетах «коэффициентами пропорциональности» или «упругости», полагая, что учет действительного положения криволинейности модуля деформаций стали резко усложнит расчеты железобетонных конструкций с использованием сложной аналитической зависимости, отражающей его криволинейность.

Материалы и методы. Для установления величины погрешностей, допускаемых нормами [1] при замене фактических криволинейных диаграмм силового растяжения арматурных сталей кусочно-прямолинейными, авторами были проведены специальные экспериментальные исследования для уточнения характера и точности развития их деформаций. Особенностью проведенных экспериментальных исследований являлась относительно высокая степень точности измерения деформаций. Ступени нагружения – отсчетов были в ряде случаев доведены до 5,0 МПа. Отсчеты снимались по двум спаренным, не требующим перестановки, тензосенсором с базой 24 мм. Нагружение после уровня 0,35–0,40 от σ_s или

R_s производили непрерывно со средней скоростью 5,0 МПа/с.

В связи с проведением опытов без перестановки приборов были использованы тензометры системы инж. Василенко, которые при высокой чувствительности (1:1000) могли без перестановки регистрировать деформации порядка 10000 микрон. Это позволило определять значения деформаций для высокопрочных и «мягких» сталей без перестановки приборов.

Испытаниям были подвергнуты следующие виды арматурных сталей: А400 (ø 12 и 16), А800 (ø 12 и 14), А1000 (ø 12 и 16), В1200 (ø 8), В1400 (ø 5) и В1600 (ø 5) мм. Всего было испытано по 6-8 образцов каждого диаметра и вида стали.

На основании обработки и анализа результатов этих экспериментальных исследований (рис. 2) были сделаны следующие выводы:

1. Идеальной пропорциональностью между напряжениями σ_s и деформациями ε_s все виды арматурных сталей не обладают. Их деформативные свойства описываются физически нелинейными аналитическими зависимостями. Практически соблюдение закона пропорциональности можно принимать только на участке от 0,00 до $0,65R_y$ для «мягкой» стали А (240-600). У высокопрочных «твердых» сталей этот участок имеет относительно меньшую длину и соответствует от 0,35-0,45 R_s .

2. Высокопрочные стали не подчиняются закону Гука даже на самых начальных участках диаграмм « σ_s - ε_s ». У них явная криволинейная зависимость $\varepsilon_s = \varphi_s(\sigma_s)$ начиная с самых небольших напряжений.

3. Если у «мягких» сталей предельная величина упругопластических деформаций в среднем на 25–30 % превышает величину упруго-мгновенных, то у «твердых» высокопрочных сталей эти превышения у предела прочности R_s или условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ увеличиваются уже до 50–60 %.

4. Начальный модуль деформации E_s высокопрочных сталей на участке 0,05–0,35 от предела прочности R_s устойчиво равен $2,03$ – $2,05 \cdot 10^5$ МПа. Величина начального модуля деформации E_s «мягких» сталей на участке 0,05–0,65 от предела текучести R_y колеблется в пределах $2,0$ – $2,1 \cdot 10^5$ МПа.

5. Погрешности определения относительных деформаций ε_s и напряжений σ_s арматурных сталей при растяжении, вносимые кусочно-прямолинейными диаграммами, при расчетах железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели являются весьма существенными. Если для «мягких» сталей не превышают 25–30 %, то для высокопрочных они могут достигать 50–60 %.

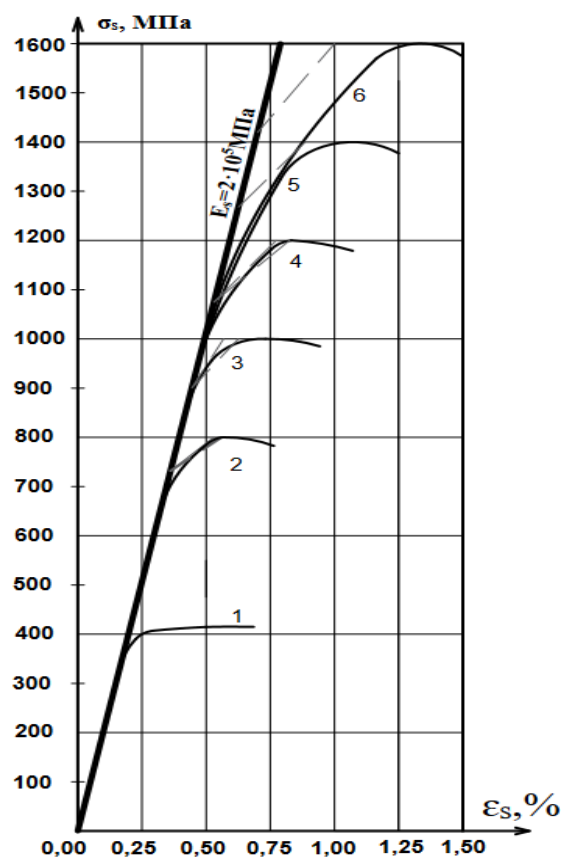


Рис. 2. Диаграмма силового растяжения «твердых» сталей классов: 1 — А400; 2 — А800; 3 — А1000; 4 — Вр1200; 5 — Вр1400; 6 — Вр1600; — — — — — нормативные; — — — — — по зависимостям (1) и (2)

Во всех случаях армирования железобетонных изгибаемых и внецентренно сжатых элементов на короткой длине «мягких» сталей происходит плавное сопряжение участка упруго-мгновенных относительных деформаций и пластических деформаций текучести.

Криволинейный характер и числовые результаты проведенных экспериментальных опытов наилучшим образом отражены в приведенных на рис. 2 диаграммах силового растяжения высокопрочных «твердых» арматурных сталей, где для высоких уровней напряжения отчетливо видны существенные расхождения относительных деформаций с аналогичными, определяемыми по нормативным диаграммам. Несмотря на существенное разнообразие прочностных свойств различных высокопрочных сталей, их геометрическая криволинейность и физическая нелинейность не вызывают сомнений.

Естественно, разнообразие деформативно-прочностных свойств арматурных сталей затрудняет разработку несложной и нетрудоемкой аналитической зависимости $\varepsilon_s = \varphi(\sigma_s)$, единой для всех арматурных сталей, имеющих и не имеющих площадки текучести. Сложность решения подобной задачи объясняется тем, что они, как и все реальные конструктивные материалы, при

силовом нагружении деформируются неравномерно и нелинейно. Их неравномерность проявляется в том, что при нагружении помимо упруго-мгновенных развиваются и неупругие деформации, а нелинейность деформирования объясняется отсутствием между напряжениями σ_s и деформациями ε_s пропорциональной связи. Все это физически приводит к криволинейности деформирования, отражаемой феноменологическими уравнениями механического состояния материала.

Как свидетельствуют результаты попыток многих исследователей [3–5], в том числе проведенных и авторами [6–10], искомая физическая связь обычно у них отражается аналитическими зависимостями высоких степеней [7–11]. В 1966 г. автору удалось разработать такую зависимость [8] более низкой (пятой) степени. Однако и она оказалась достаточно сложной и трудоемкой для инженерных расчетов без применения машинной техники.

Но если для решения этой сложной задачи принять другой подход, то можно получить достаточно точное и существенно менее трудоемкое, более простое аналитическое решение. Таким подходом является использование при расчетах железобетонных конструкций понятия секущего модуля деформаций арматурных сталей E'_s , который в зависимости от относительного уровня напряжений σ_s/E_s или деформаций $\varepsilon_s/\varepsilon_{SR}$ будет давать текущие значения фактического модуля деформаций, как относительную величину общеизвестного модуля упругости стали $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа.

Основная часть. На основании детального анализа результатов многих экспериментальных исследований [6–15] авторам удалось разработать достаточно простое, надежное и точное аналитическое определение искомого секущего модуля деформаций высокопрочных «твердых» и «мягких» арматурных сталей E'_s для железобетонных конструкций, которое являясь универсальным, позволяет определить естественное значение деформаций ε_s по заданному относительному значению напряжения σ_s/R_s и по известной величине относительного отношения деформации $\varepsilon_s/\varepsilon_{SR}$ находить соответствующее значение σ_s .

Так, для «твердых» высокопрочных сталей по известному значению напряжения σ_s получаем искомую величину секущего модуля деформаций:

$$E'_s = E_s [1 - n(\sigma_s/R_s)^4], \quad (1)$$

с последующим определением относительной деформации, как обычно, $\varepsilon_s = \sigma_s/E'_s$.

А по известному значению относительной деформации ε_s получаем величину соответствующего ей секущего модуля деформаций:

$$E'_s = E_s [1 - n(\varepsilon_s/\varepsilon_{SR})^2], \quad (2)$$

где ε_{SR} – относительная деформация, соответствующая пределу прочности R_s .

При этом разыскиваемое значение напряжения стали определяется, как обычно, $\sigma_s = \varepsilon_s E'_s$.

Разработанные зависимости (1) и (2) и по форме, и по существу являются исключительно простыми, основанными практически только на нормативных характеристиках сталей. Исключение составляет лишь один эмпирический коэффициент « n », полученный в результате обработки результатов экспериментальных исследований и равный:

$$n = 2,5 \cdot 10^{-4} R_s, \quad (3)$$

где R_s – предел прочности стали.

Разработанное решение, является совершенно нетрудоемким для проектной практики и обучения студентов и магистров высших учебных заведений [16–18]. Оно состоит из минимума аналитических простейших действий. Так, для определения величины деформации ε_s по заданному значению напряжения σ_s необходимо произвести всего два действия: первое по зависимости (1) определить значение соответствующего ей секущего модуля деформаций E'_s и второе – для определения величины $\varepsilon_s = \sigma_s/E'_s$. И только для определения напряжения σ_s по известной величине ε_s необходимо произвести три действия. Первым является установление по зависимости (1) при $\sigma_s = R_s$ величины секущего модуля деформаций E' , соответствующего пределу прочности R_s , после чего, как обычно, следует установить соответствующую величину предельной деформации стали перед разрывом ε_{SR} , а потом по зависимости (2) определить секущий модуль деформации для искомой величины относительной деформации ε_s и далее определить, как обычно, искомую величину соответствующего напряжения $\sigma_s = \varepsilon_s E'_s$.

Представленные на рис. 2 криволинейные диаграммы силового растяжения «твердых» сталей, построенные по зависимостям (1) и (2), точно соответствуют их действительному механическому состоянию, при силовом растяжении и, естественно, позволяют избежать существенных математических ошибок при расчетах нормальных сечений изгибаемых и внецентренно сжатых элементов.

Анализ результатов экспериментальных исследований различных арматурных сталей показал практическую идентичность деформационно-прочностных свойств «твердых» и «мягких» сталей. Это также криволинейность деформирования

и существенное увеличение неупругих деформаций, начиная с уровня нагружения $0,6R_y$, те же «пределы пропорциональности и упругости», и плавный переход к площадке и пределу текучести R_y . Представление о том, что при достижении предела текучести R_T наклонная прямая E_s сразу же переходит в горизонтальный участок площадки текучести, приводя к разрыву непрерывности аналитической функции, является условным и приближенным.

С физической точки зрения это объясняется поликристаллической структурой стали, у которой одновременное начало скольжения во всех кристаллах не происходит. Последнее является следствием неоднородности физических свойств различных компонентов поликристалла, а также анизотропией механических свойств внутри отдельных зерен, из которых состоит кристалл. Установленные в лабораторных исследованиях на участке будущей площадки текучести цепочки малобазных датчиков всегда фиксируют постепенный вход в текучесть отдельных участков стали, что и создает криволинейность диаграммы перед площадкой ее текучести.

Вышеизложенное позволяет разработанные для «твердых» подход и аналитическое решение полностью перенести и на «мягкие» арматурные стали, определив лишь для них соответствующие эмпирические коэффициенты и числовые степени. Тогда для «мягких» сталей по известному значению напряжения σ_s имеем искомую величину секущего модуля деформаций:

$$E'_s = E_s [1 - m(\sigma_s/R_T)^3], \quad (4)$$

с последующим определением относительной деформации $\varepsilon_s = \sigma_s/E'_s$.

И по известному значению относительной деформации ε_s получаем величину соответствующего ей секущего модуля деформаций:

$$E'_s = E_s [1 - m(\varepsilon_s/\varepsilon_{sm})^2], \quad (5)$$

и разыскиваемое значение напряжения стали $\sigma_s = \varepsilon_s E'_s$.

В зависимостях (5) и (6) эмпирический коэффициент « m » равен:

$$m = 5,0 \cdot 10^{-4} \cdot R_s. \quad (6)$$

Выводы. Полученные аналитические зависимости и решения на их основе являются достаточно универсальными и позволяют, не прибегая к громоздким вычислениям, получать достоверные решения при расчете по нормальным сечениям изгибаемых и внецентренно-сжатых элементов. Кроме этого, данный подход позволяет решать и более сложные задачи теории железобетона, получая решение в виде секущего модуля деформаций E'_s , именуемые в нормативной литературе коэффициентами угла наклона отдельных участков диаграммы при растяжении арматурной стали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения (актуализированная редакция СНиП 52-01-2003). М.: Минрегион России, 2012. 161 с.
2. Тихонов И.Н. Гуменюк В.С. Анализ требований СП 52-101-2003 к арматуре класса прочности 500 МПа // Бетон и железобетон. 2006. № 4. С. 6–11.
3. Дегтерев В.В. Расчет на прочность изгибаемых железобетонных элементов с учетом характера диаграммы растяжения арматуры. Москва, 1959. 56 с.
4. Мельников Г.И. Исследование граничного армирования и прочности перearмированных железобетонных элементов с одиночной арматурой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев. 1964. 18 с.
5. Иващенко Е.И. Разработка методов расчета железобетонных элементов на основе действительных диаграмм деформирования материалов с учетом фактического изменения площади их поперечных сечений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2006. 22 с.
6. Давыдов Н.Ф., Донченко О.М. Обобщенная зависимость деформативных свойств арматурных сталей. Прочность и деформативность железобетонных конструкций. ХИСИ. Издательство Харьковского Университета, 1966.
7. Донченко О.М. К расчету изгибаемых железобетонных элементов, армированных твердыми элементами. Сб. НИИКСа «Строительные конструкции», Изд-во «Будивельник», Киев, 1967.
8. Khuranov V.K., Likhov Z.R., Kaziev A.M., Tsipinov A.S., Mailyan V.D., Bending resistance of reinforced concrete elements under various classes of concrete and ratios of reinforcement // IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&MQ&IS). 2016. Pp. 86–89. DOI: 10.1109/ITMQIS.2016.7751930.
9. Kankam Ch.K., Adom-Asamoah M. Strength and ductility characteristics of reinforcing steel bars milled from scrap metals // Materials & Design. 2002. Vol. 23. Pp. 537–545. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(02\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(02)00028-6).
10. Донченко О.М. Экспериментальное исследование сопротивления железобетонных балок, армированных различного вида сталями // Исследование работы строительных конструкций и сооружений: сб. тр. М.: МИСИ/БТИСМ, 1979. С. 2–34.
11. Михайлов К.В. Новые виды арматуры. НИИЖБ, Стройиздат, 1964. 204 с.

12. Юрьев А.Б., Микрюков В.Р., Иванов Ю.Ф. Эволюция свойств и структуры горячекатаной арматуры в процессе эксплуатации в строительных конструкциях // Материаловедение. 2006. № 9. С. 44–49.

13. Мусихин В.А. Сравнение арматурных канатов класса K1400 (к-7) и класса K1500 (к-19) // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2013. Т. 13. № 2. С. 22–27.

14. Мещеряков В.М., Косенко Е.Е., Косенко В.В. Оценка механических свойств арматурных стержней с использованием статистических методов // Научное обозрение. 2014. № 9-3. С. 908–911.

15. Скороходов В.Н., Одесский П.Д., Рудченко А.В. Строительная сталь. М.: ЗАО «Металлургиздат». 2002. 624 с.

16. Cadoni E., Forni D. Strain rate effects on reinforcing steels in tension // EPJ Web of Conferences. 2015. Vol. 94. Pp. 01004. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159401004>.

17. Donchenko O.M., Suleymanova L.A., Rimshin V.I., Ryabchevskiy I.S. Tensile deformations of “mild” reinforcing steels for reinforced concrete structures // Lecture Notes in Civil Engineering, 2021. Vol. 147. Pp. 302–308. DOI: 10.1007/978-3-030-68984-1_44

18. Обернихин Д.В. Численные исследования прочности, трещиностойкости и деформативности изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного сечения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 24–29. DOI: 10.12737/article_590878faa8b5b4.77635628

Информация об авторах

Донченко Олег Михайлович, кандидат технических наук, профессор кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: kafedrasigsh@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Сулейманова Людмила Александровна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства и городского хозяйства. E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Крючков Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: krjuchkov@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Логачев Константин Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: kilogachev@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 07.06.2022 г.

© Донченко О.М., Сулейманова Л.А., Крючков А.А., Логачев К.И., 2022

Donchenko O.M., *Suleymanova L.A., Kryuchkov A.A., Logachev K.I.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: kafedrasigsh@mail.ru

UNIVERSAL ANALYTICAL DEPENDENCE OF DEFORMATION-STRENGTH PROPERTIES OF REINFORCING STEELS UNDER FORCE TENSION

Abstract. The article deals with topical issues of the normative methodology for calculating bending and eccentrically compressed reinforced concrete elements along normal sections. They are based on the joint use of a nonlinear deformation model, the hypothesis of flat sections, physically and geometrically linear diagrams of the mechanical state of reinforcing steels of various strengths under force tension. Attention is drawn to the significant inaccuracies of calculations when using the approximate rectilinear steel deformation modulus of constant value $E = 2 \cdot 10^5$ MPa up to the steel's ultimate strength. The high degree of complexity of manual calculation is confirmed when using the actual values of the physically nonlinear steel deformation modulus, approximated by analytical dependences of high degrees. A new author's approach is presented for solving such problems by approximating the real nonlinear strain modulus to the secant strain modulus E'_s with simple equations for high-strength “hard” and “soft” (not high and medium strength) steels, which allows to manually calculate such problems with greater accuracy.

Keywords: bending elements, eccentrically compressed elements, reinforced concrete elements, linearity, non-linearity, secant modulus of deformation.

REFERENCES

1. SP 63.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions (updated edition of SNiP 52-01-2003) [SP 63.13330.2012. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozheniya (aktualizirovannaya redakciya SNiP 52-01-2003)]. M.: Ministry of Regional Development of Russia, 2012. 161 p. (rus)
2. Tikhonov I.N. Gumenyuk V.S., Analysis of the requirements of SP 52-101-2003 for reinforcement of strength class 500 MPa [Analiz trebovanij SP 52-101-2003 k armature klassa prochnosti 500 MPa]. Beton i zhelezobeton. 2006. No. 4. Pp. 6–11. (rus)
3. Degterev V.V. Calculation of the strength of bent reinforced concrete elements, taking into account the nature of the reinforcement tensile diagram [Raschet na prochnost' izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov s uchetom haraktera diagrammy rastyazheniya armatury]. M. 1959. 56 p. (rus)
4. Melnikov G.I. Study of boundary reinforcement and strength of re-reinforced reinforced concrete elements with single reinforcement [Issledovanie granichnogo armirovaniya i prochnosti perearmirovannyh zhelezobetonnyh elementov s odnochnoj armaturoj]: Abstract of the thesis. dis. ... cand. tech. Sciences. Kyiv. 1964. 18 p. (rus)
5. Ivashchenko E.I. Development of methods for calculating reinforced concrete elements based on actual material deformation diagrams, taking into account the actual change in their cross-sectional area [Razrabotka metodov rascheta zhelezobetonnyh elementov na osnove dejstvitel'nyh diagramm deformirovaniya materialov s uchetom fakticheskogo izmeneniya ploshchadi ih poperechnykh sechenij]: Ph.D. dis. ... cand. technical sciences. Voronezh, 2006. 22 p. (rus)
6. Davydov N.F., Donchenko O.M. Generalized dependence of the deformative properties of reinforcing steels. Strength and deformability of reinforced concrete structures [Obobshchennaya zavisimost' deformativnyh svoystv armaturnykh stalej. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnyh konstrukcij]. HISI, Kharkov University Press, 1966. (rus)
7. Donchenko O.M. To the calculation of bending reinforced concrete elements reinforced with solid elements [K raschetu izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov, armirovannyh tverdymi elementami]. Sb. NIIKSA "Stroitel'nye konstrukcii", Izd-vo "Budivelnik". Kyiv, 1967. (rus)
8. Khuranov V.K., Likhov Z.R., Kaziev A.M., Tsipinov A.S., Mailyan V.D., Bending resistance of reinforced concrete elements under various classes of concrete and ratios of reinforcement. IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&MQ&IS) 2016. Pp. 86–89. DOI: 10.1109/ITMQIS.2016.7751930.
9. Kankam Ch.K., Adom-Asamoah M. Strength and ductility characteristics of reinforcing steel bars milled from scrap metals. Materials & Design. 2002 Vol. 23. Pp. 537–545. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(02\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(02)00028-6).
10. Donchenko O.M. Experimental study of the resistance of reinforced concrete beams reinforced with various types of steel [Eksperimental'noe issledovanie soprotivleniya zhelezobetonnyh balok, armirovannyh razlichnogo vida stalyami] Issledovanie raboty stroitel'nyh konstrukcij i sooruzhenij: sb. tr. M.: MISI/BTISM, 1979. Pp. 2–34. (rus)
11. Mikhailov K.V. New types of fittings [Novyye vidy armatury]. NIIZhB, Stroyizdat, 1964. 204 p. (rus)
12. Yuryev A.B., Mikryukov V.R., Ivanov Yu.F. Evolution of the properties and structure of hot-rolled reinforcement during operation in building structures [Evoluciya svoystv i struktury goryachekatanoj armatury v processe ekspluatatsii v stroitel'nyh konstrukciyah]. Materialovedenie. 2006. No. 9. Pp. 44–49. (rus)
13. Musikhin V.A. Comparison of reinforcing ropes of class K1400 (k-7) and class K1500 (k-19) [Sravnenie armaturnykh kanatov klassa K1400 (k-7) i klassa K1500 (k-19)]. Bulletin of the South Ural State University. 2013. Vol. 13. No. 2. Pp. 22–27. (rus)
14. Meshcheryakov V.M., Kosenko E.E., Kosenko V.V. Evaluation of the mechanical properties of reinforcing steels using statistical methods [Ocenka mekhanicheskikh svoystv armaturnykh stalej s ispol'zovaniem statisticheskikh metodov]. Nauchnoe obozrenie. 2014. No. 9-3. Pp. 908–911. (rus)
15. Skorokhodov V.N., Odesskii P.D., Rudchenko A.V. Construction steel [Stroitel'naya stal']. M.: ZAO "Metallurgizdat". 2002. 624 p. (rus)
16. Cadoni E., Forni D. Strain rate effects on reinforcing steels tension. EPJ Web of Conferences. 2015. Vol. 94. 01004. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159401004>.
17. Donchenko O.M., Suleymanova L.A., Rimshin V.I., Ryabchevskiy I.S. Tensile deformations of "mild" reinforcing steels for reinforced concrete structures. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 147. Pp. 302–308. DOI: 10.1007/978-3-030-68984-1_44
18. Obernikhin D.V. Numerical study of strength, fracture toughness and deformativnosti of steel reinforced concrete elements of trapezoidal cross-section [Chislennyye issledovaniya prochnosti, treshchinostojkosti i deformativnosti izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov trapecievidnogo secheniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 5. Pp. 24–29. DOI: 10.12737/article_590878faa8b5b4.77635628. (rus)

Information about the authors

Donchenko, Oleg M. PhD, Professor. E-mail: kafedrasigsh@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Suleymanova, Lyudmila A., DSc, Professor. E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kryuchkov, Andrey A. PhD, Professor. E-mail: krjuchkow@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Logachev, Konsntanin I., DSc, Professor. E-mail: kilogachev@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 07.06.2022

Для цитирования:

Донченко О.М., Сулейманова Л.А., Крючков А.А., Логачев К.И. Универсальная аналитическая зависимость деформативно-прочностных свойств арматурных // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 8. С. 27–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-27-34

For citation:

Donchenko O.M., Suleymanova L.A., Kryuchkov A.A., Logachev K.I. Universal analytical dependence of deformation-strength properties of reinforcing steels under force tension. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 8. Pp. 27–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-27-34

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-35-49

¹. *Мерциев А.А., ¹Головинский П.А., ²Свиринов М.В., ²Семиненко А.С.¹Воронежский государственный технический университет²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: sasha__1990@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ПОМЕЩЕНИЯ С ДЕРЕВЯННЫМИ ОГРАЖДАЮЩИМИ КОНСТРУКЦИЯМИ

Аннотация. Рассмотрен нестационарный подход к расчету периодических по времени тепловых режимов малоэтажных зданий с ограждающими конструкциями, выполненными из деревянного бруса, оснащенных стеклопакетами. Применение предложенного метода позволяет определить нестационарную тепловую нагрузку системы кондиционирования воздуха для данного типа домов, а также требуемые компенсирующие мощности в течение суток. Дан анализ условий применимости плоскостных теплофизических расчетных схем при наличии пространственно неоднородного нагрева. Проведено уточнение процедуры усреднения коэффициентов конвективного теплообмена для вертикальных стен по периодическим колебаниям температуры. Предложен алгоритм расчета периодического теплового режима, основанный на представлении временных зависимостей в виде ряда Фурье. Показана роль в тепловом обмене и энергетической эффективности деревянного дома потока солнечного излучения через стеклопакеты. Предложенная математическая модель теплообмена помещения учитывает эффекты запаздывания распространения температурного поля в стенах при изменении температуры окружающего воздуха и динамическое изменение теплового потока от световых потоков снаружи и внутри помещения. Определено, что защита от прямого попадания солнечных лучей в помещение через оконный проем позволяет снизить пиковые затраты на кондиционирование воздуха в летний период на треть для пиковых режимов кондиционирования.

Ключевые слова: дом из дерева, экологическая чистота, нестационарная теплопередача, периодический тепловой режим, энергетическая эффективность.

Введение. При проектировании и возведении современных экологичных и энергоэффективных зданий важнейшую роль играет выбор материалов и проектных решений с использованием больших остекленных поверхностей [1–3]. При этом стараются максимально учесть тепловой обмен через остекленные поверхности и влияние инсоляции на тепловой режим в зависимости от ориентации строения. Остекление, выходящее на север, лучше подходит для улавливания солнечной энергии зимой, когда солнце низко в небе, и его легче затенять от прямых солнечных лучей летом, когда солнце в небе высоко. Для одноэтажных зданий несложно сделать карниз так, чтобы летнее солнце не вызывало перегрева, и давало дополнительный обогрев зимой, как показано на рис. 1. На нем схематически обозначены основные элементы помещения, включая прозрачную остекленную наружную поверхность, стены, потолок и освещаемый солнцем пол, а также направления основных радиационных и тепловых потоков [1].

Одним из вариантов пассивного управления тепловыми потоками является использование стены Тромба [4], предполагающей применение каменных и бетонных массивов для обеспечения тепловой инерции конструкции и выравнивания внутренних температурных колебаний в течение суток. Более простым способом получения теп-

лого дома является утепление стены с деревянным каркасом [5]. Существует широкий набор легкодоступных теплоизолирующих материалов [6], которые просто устанавливаются в полость между внутренней облицовкой и внешней облицовкой. Их типичным недостатком является недолговечность и необходимость замены через 10–15 лет эксплуатации. В связи с этим, особый интерес среди экологически чистых решений в рамках концепции энергетически эффективного жилища вызывают дома из деревянных конструкций [7–9]. Использование древесины, как и любого другого материала при проектировании ограждающих конструкций, требует проведения теплофизических расчетов для определения условий обеспечения комфортного проживания.

В настоящее время существуют различные стационарные и нестационарные методы расчета теплового режима в помещении [10]. Базовый подход основан на стационарных методах теории теплопереноса. Процесс расчета при этом прост, но погрешность результатов довольно значительна. Более сложный динамический анализ теплового режима основывается на теории нестационарного теплообмена и методах теплового баланса. С учетом растущего спроса на дома из дерева, представляет значительный практический интерес развитие эффективных инженерных методов расчета их теплового режима. Важ-

нейшим при этом является правильный учет одновременно инсоляции и конвективного теплообмена.

При теплообмене в ограниченном пространстве явления нагревания и охлаждения газа протекают вблизи друг от друга, и разделить их не всегда возможно. Вследствие ограниченности пространства и наличия восходящих и нисходящих потоков, условия движения усложняются, поскольку они зависят не только от температурного напора, но и от формы и геометрических размеров обтекаемых тел [11, 12].

Механизм конвекции существенно зависит от формы и размеров ограждения рассматриваемой ячейки. Такая конвекция в ограниченном

объеме помещения, вызванная только естественными силами (без вынужденной вентиляции), называется естественной. Одним из стандартных объектов исследований теплообмена в помещениях является модельная ячейка в форме параллелепипеда с различным расположением тепловых источников, в том числе периодических во времени [13]. Соответствующие теоретические и экспериментальные исследования показывают необходимость учета конкретных условий теплообмена на границах и наибольшую роль числа Рэлея в качестве определяющего параметра [14–17].

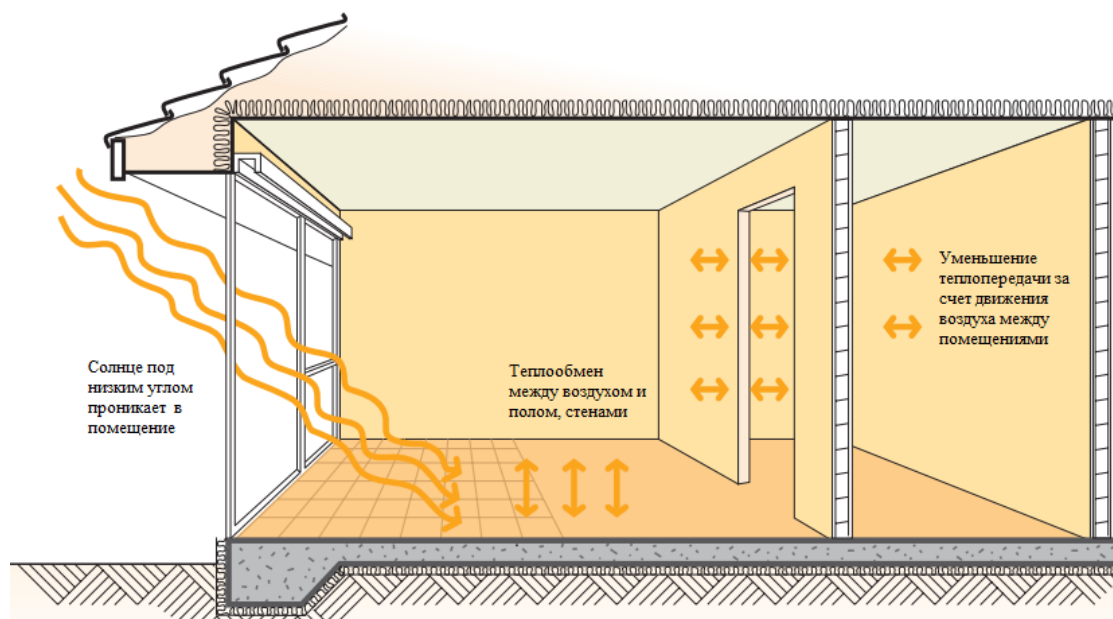


Рис. 1. Тепловые и радиационные потоки в помещении зимой [1]

При проведении конкретных расчетов требуются данные о тепловых характеристиках воздуха [18], которые описываются в интервале температур 300–350 К эмпирическими соотношениями [16] (в СИ): динамическая вязкость, плотность, теплопроводность, теплоемкость, кинематическая вязкость. Для экспериментального изучения конвективного теплообмена используются тестовые помещения также чаще всего в форме параллелепипеда с линейными размерами в несколько метров [14]. Выбор размеров определяется их близостью к размерам реальных помещений. При размерах помещения меньше ~1 м не будет проявляться турбулентная стадия конвективного теплообмена, в то время как существенно большие модели не только труднее изготовить, но в них не будет наблюдаться эффект стеснения конвективного потока в ограниченных объемах, характеризующий отличие естественной конвекции от свободной конвекции. В реальных помещениях идеальная картина свободного

конвективного теплообмена нарушается влиянием ограничения объема и наличием нескольких холодных и нагретых поверхностей теплообмена. Естественная конвекция в помещении вблизи нагретой стенки характеризуется наличием трех выраженных зон [19]: зоны ламинарного движения, зоны турбулентного движения и зоны торможения вблизи потолка. С учетом растущего спроса на дома из дерева, представляет значительный практический интерес развитие эффективных инженерных методов расчета их теплового режима. Важнейшим при этом является правильный учет одновременно инсоляции и конвективного теплообмена.

Распространение тепла в помещениях происходит не мгновенно, и если установление теплового равновесия в воздушной среде помещения происходит достаточно быстро, то тепловая инерция ограждения может приводить к существенному запаздыванию отклика системы на из-

менение внешней температуры. Поэтому необходимо учитывать роль запаздывания температурного поля в массиве дерева при различной толщине стены и использовать для решения задачи нестационарные методы расчета.

Цель исследований авторов состояла в поиске эффективного способа решения нестационарной задачи теплопроводности с учетом переменных граничных условий. Указанная цель предусматривает расчет динамики и общих затрат на кондиционирование воздуха в помещении для определения путей их снижения.

Задачи исследований заключались в выявлении влияния на тепловой режим особенностей конвективного теплообмена и переменного потока солнечного излучения.

Материалы и методы. Для проведения конкретных расчетов теплообмена помещения в рамках сформулированной модели необходимо

задать ряд геометрических и физических параметров, представленных в таблице 1. Следует учитывать, что материал дерева является сильно анизотропным, и теплопроводность древесины вдоль волокон выше на 40 %–90 %, чем поперек волокон, в зависимости от породы дерева. Надежные данные по теплофизическим свойствам древесины содержатся в справочнике [20]. Рассмотрим режим поддержания в помещении постоянной температуры 22 °С. В этом случае основной расчетной величиной является расход энергии на поддержание заданной температуры непосредственно в данном помещении. Остальные смежные помещения будем считать находящимися при такой же температуре за счет собственного кондиционирования воздуха. Основные параметры, необходимые для теплофизического расчета, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры расчетной модели

Наименование параметра	Числовое значение параметра
Теплоемкость воздуха при постоянном давлении c_p	1,005 кДж/(кг·К)
Удельная плотность воздуха ρ	1,2041 кг/м ³
Объем помещения V	81,9 м ³
Коэффициент теплообмена внутренней поверхности стены α_w	3(стена противоположная стене с остеклением)
Коэффициент теплообмена внешней поверхности стены α_e	4,2 Вт/(м ² ·К)
Коэффициент теплообмена поверхности пола α_f	3 Вт/(м ² ·К)
Коэффициент теплообмена поверхности светового пятна α_s	4,2 Вт/(м ² ·К)
Коэффициент теплообмена поверхности потолка α_p	2,8 Вт/(м ² ·К)
Размеры остекленной стены (высота* ширину):	(2 м x 1,7 м)x2
Тепловое сопротивление единицы площади поверхности остекления R	0,55 (м ² ·К/Вт)
Коэффициент воздухопроницаемости остекления β	5 кг/(м ² ·ч)
Максимальные значения светового потока для светового пятна q_0 (Вт/м ²)	980 Вт/м ²
Коэффициент поглощения света деревом ε	0,6
Размеры стен, смежных с остеклением (высота* ширина):	(2,8 м x 4 м)x2
Размеры светового пятна на полу:	0,9 м ²
Время освещения светового пятна t в ч.	4,5 ч
Толщина стен L	0,2 м
Толщина пола L_f	0,2 м
Толщина потолка L_p	0,2 м
Теплоемкость материала стены c_w	1,56 кДж/(кг·К)
Удельная плотность материала стены ρ_w	540 кг/м ³
Теплопроводность материала стены λ_w	0,15 Вт/(м·К)
Теплоемкость материала пола c_f	1,56 кДж/(кг·К)
Удельная плотность материала пола ρ_f	540 кг/м ³
Теплопроводность материала пола λ_f	0,15 Вт/(м·К)
Теплоемкость материала потолка c_p	1,56 кДж/(кг·К)
Удельная плотность материала потолка ρ_p	540 кг/м ³
Теплопроводность материала потолка λ_p	0,15 Вт/(м·К)

В качестве примера приведем расчет теплового режима в один из жарких дней июля 2021 года. По данным на 14.07.2021 погодного портала [21] максимальная температура воздуха со-

ставляла 33 °С в 17:00, а минимальная температура 16 °С в 5:00. Соответствующий суточный график температурной зависимости для воздуха от времени представлен на рис. 2. Средняя тем-

пература составляет $T_0 = 24,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, амплитуда колебаний $\Delta T = 8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для определения потока тепла, поступающего в помещение, необходимо учесть доминирующий теплообмен через наружную стену и окна. В качестве исходного приближения будем считать, что поступающая через окно лучистая энергия поглощается фасадом с коэффициентом ε . Коэффициент пропускания

света трехслойным стеклопакетом примем в соответствии с ГОСТ 11-90 равным 73,4 %. Отметим, что надежность определения коэффициентов теплообмена поверхностей зависит, в том числе, от скорости ветра, а сами их величины могут значительно отличаться в различных источниках [22].

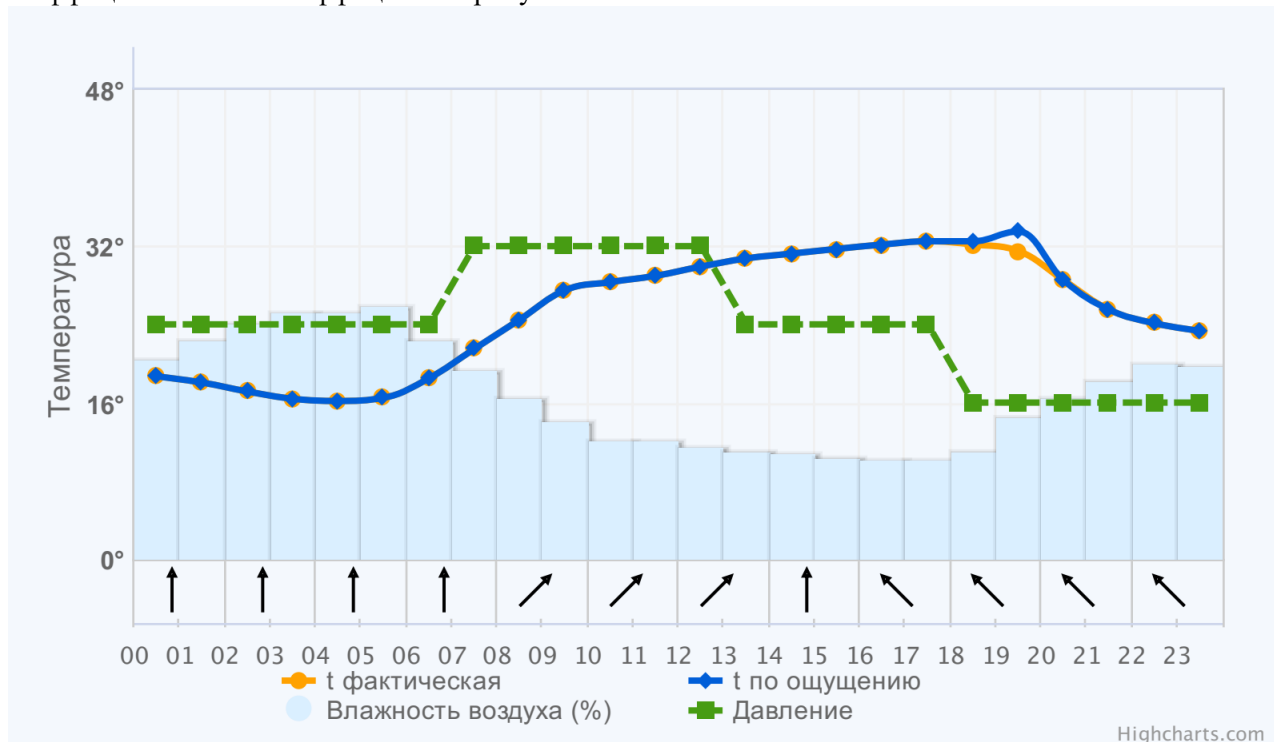


Рис. 2. Зависимость температуры воздуха по шкале Цельсия в Воронеже 14.07.2021 от времени

На рис.3 представлено распределение температур в помещении, полученное с использованием инфракрасного тепловизора. Оно подтверждает сделанное нами предположение о наличии больших плоских поверхностей с почти постоянной температурой и переходных областей с шириной порядка толщины пола. Так, температура холодной части пола и окна отличается примерно на градус, в то время, как неоднородность температуры в световом пятне составляет около $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это позволяет далее придерживаться при численном расчете принятой нами составной одномерной модели, в которой теплообмен наружного ограждения помещения складывается из теплообмена через стену и теплообмена через окна с учетом солнечной радиации. Величина светового потока взята по результатам экспериментальных измерений [23] равной 980 Вт/м^2 . Восход солнца происходил в 4:22, а заход солнца — в 20:36. Астрономический полдень соответствовал $t_0 = 12:29$.

Теплофизическая характеристика стеклопакетов взята из работы [24] для двухкамерного

стеклопакета в виде полного термического сопротивления $R = 0,87\text{ м}^2\cdot\text{К/Вт}$ с учетом конвективного и радиационного теплообмена. Полный тепловой поток через наружное ограждение находится как сумма тепловых потоков через стену и остекленное пространство. При этом тепловая инерция стеклопакета мала, и мы ее не учитываем, рассчитывая плотность теплового потока через остекление по формуле (19). Тепловая инерция стены учитывается с помощью наложения тепловых волн, как это описано выше для нестационарной теплопередачи на основе нестационарного уравнения теплопроводности.

Большая часть практических теплофизических расчетов зданий проводится в рамках одномерных [25, 26] или двумерных стационарных и нестационарных моделей [27–32]. Для определения точности расчетов в рамках одномерной модели мы рассмотрели решение стационарной двумерной задачи о распространении тепла в однородной плоской панели толщиной L . Температура на одной поверхности панели с координатой $y = 0$ поддерживается постоянной и равной T_0 , а

на другой поверхности с координатой $y = L$ она отлична от T_0 только на конечном интервале $0 < x < A$, где равна T . Трехмерная реализация такой

двумерной постановки задачи означает, что область повышенной температуры на одной стороне панели имеет вид длинной полосы с постоянной шириной A .



Рис. 3. Тепловой портрет стеклопакета и светового пятна на деревянном полу (изображение с поворотом на 90°)

Замены переменных $y \rightarrow y\pi/L$, $x \rightarrow x\pi/L$, $u(x, y) = (T(x, y) - T_0)/T$, приводят исходное уравнение для распространения пятна нагрева к задаче Дирихле, решение которой имеет вид [33]:

$$u(x, y) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arctg \frac{e^{-x} - \cos y}{\sin y} \quad (1)$$

Анализ зависимости (1), показывает, что простое однородное линейное приближение для распределения температуры поперек панели воспроизводит интегральный поток, но не отражает деталей его поперечного распределения в переходной области. Такая переходная область неоднородности теплового потока имеет ширину порядка двойной толщины панели стены $2L$. Для деревянных домов толщина стен мала по сравнению с аналогичными параметрами для кирпичных стен с таким же тепловым сопротивлением, и эффектами поперечной неоднородности теплового потока в инженерных расчетах теплового баланса в большинстве случаев можно пренебречь. Это позволяет использовать в качестве основы для расчетов составные плоскостойкие модели.

Распространение тепла в плоском слое теплопроводящей среды описывается одномерным уравнением теплопроводности [34]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad \chi = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (2)$$

Здесь λ – теплопроводность среды, c – удельная теплоемкость, ρ – объемная плотность. Уравнение (2) решается с учетом начальных и граничных условий. Они зависят от условий теплообмена с окружающей средой [35]. Учтем, что на границе конструкции поглощается дополнительный тепловой поток с плотностью $q_s(t)$, вызванной солнечным излучением. Тогда теплообмен на поверхности ограждения учитывается с помощью граничного условия:

$$\alpha(T_{ext}(t) - T(-0, t)) = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=-0} + q_s(t) \quad (3)$$

Здесь $T_{ext}(t)$ может быть температурой наружного воздуха для внешней границы конструкции или температурой внутри помещения, λ – коэффициент теплопроводности материала ограждения. Поскольку коэффициент теплообмена α сам является нелинейной функцией температуры, то в последовательной постановке задача расчета теплообмена является нелинейной. Мы линеаризуем ее, считая известным диапазон изменения температур и проводя усреднение по времени с учетом гармонического изменения температуры в заданных пределах.

В качестве примера приведем расчет среднего значения эффективного коэффициента теплообмена α_{eff} вертикальной стены высотой $h=3$ м из условия равенства тепловых потоков за полупериод для переменного (зависящего от температуры) и постоянного эффективного коэффициентов теплообмена:

$$\int_0^{\pi/2} \alpha(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi = \int_0^{\pi/2} \alpha_{eff} \sin(\varphi) d\varphi. \quad (4)$$

Здесь фаза колебания $\varphi = \omega t$. Температуру воздуха примем равной $T_0 = 22$ °С. Возьмем теплопроводность воздуха равную $\lambda=0.0268$ Вт/(м·К), а его кинематическая вязкость $\nu=16.05 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Основной характеристикой самой конвективной теплопередачи является число Рэлея $Ra = \frac{g\theta L^3}{\nu\chi}$, где g – ускорение свободного падения, L – характерный размер задачи, θ – температурный перепад, T – температура воздуха, ν – его кинематическая вязкость, χ – температуропроводность. Формула для расчета коэффициента теплопередачи имеет вид [36]:

$$\alpha = \{0,825 + 0,3245 \cdot Ra^{1/6}\}^2 \frac{\lambda}{L}. \quad (5)$$

Усреднение производится интегрированием по фазе колебаний температуры. Таким образом, получаем:

$$\alpha_{eff} = \int_0^{\pi/4} \alpha(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi. \quad (6)$$

На рис. 2 показана зависимость отношения $C(\theta) = \alpha_{eff}/\alpha(\theta)$ от амплитуды колебаний температуры θ . Тем самым коэффициент $C(\theta)$ показывает насколько эффективный коэффициент конвективного теплообмена меньше его максимального значения при гармоническом законе изменения температуры. Для дальнейших расчетов мы примем $C = 0,607$ и будем считать граничные условия линейными с заменой коэффициента теплообмена его средним значением.

Следствием линейности уравнения теплопроводности и принятых нами приближенных линейных граничных условий является принцип суперпозиции температурных возмущений [35]. Используя его, представим задачу в виде суммы двух более простых задач. Первая задача является стационарной и учитывает все стационарные составляющие в граничных условиях. Вторая задача описывает установившийся колебательный режим с учетом меняющейся со временем температуры наружного воздуха и потока солнечного излучения. Квазистационарный режим в слое толщиной L устанавливается спустя некоторое время переходного процесса t , определяемое коэффициентом Фурье $Fo = \frac{\lambda t}{\rho L^2} \sim 1$, за

которое начальное температурное распределение переходит в стационарное распределение.

Стационарная часть расчета производится с учетом перепада температур внутри и снаружи панели и условия постоянства потока тепла на границе. Решение ищется в виде линейной функции $T(x) = ax + b$. Подставляя это решение в граничные условия, получим систему линейных уравнений для определения постоянных коэффициентов a, b . Для решения нестационарной части задачи при $T_{ext}(t) = \Delta T \cos(\omega t)$ перейдем к комплексному представлению [48] и ищем решение в виде комплексной функции $u(x)$:

$$\theta(x, t) = u(x)e^{i\omega t}, \quad (7)$$

где $u(x)$ – пространственная часть тепловой волны, ω – частота теплового возмущения. Пространственная часть решения внутри однородной панели имеет вид

$$u(x) = A \exp(-\gamma x) + B \exp(\gamma x). \quad (8)$$

После подстановки граничных условий возникает пара линейных уравнений для определения коэффициентов A и B . В окончательном решении делается переход к действительной форме, путем выделения действительной части полученной зависимости.

Основная часть. Ключевой характеристикой для проведения теплофизических расчетов помещения при инсоляции является величина потока прямого солнечного излучения, которая может быть определена экспериментально [23]. Полное теоретическое описание солнечной радиации в зданиях представляет собой отдельную сложную теплофизическую задачу [38], решение которой зависит от многих факторов. Первичный солнечный поток зависит от высоты и азимута Солнца, а также состояния атмосферы. Поток солнечной энергии, падающий на здание, зависит от рельефа местности, а также затенения от окружающей застройки и зеленых насаждений. Проникающее в помещение излучение, как отмечалось выше, зависит также от ориентации остекления по сторонам света, влияния солнцезащитных элементов и величины пропускной способности стекла.

Имея в виду сложный характер задачи и большую вариативность параметров, целесообразно задавать основные характеристики инсоляции при построении математической модели теплообмена в обобщенном виде. Конкретные данные могут быть получены заранее путем натурных измерений, с помощью физической модели освещенности или расчетным путем. Мы будем

учитывать конечный временной интервал действия светового потока через световой проем и его плотность с помощью зависимости:

$$q_s(t) = kq_0 \sin\left(\pi \frac{t-t_0}{\tau}\right), \quad (9)$$

где k – коэффициент пропускания остекления, q_0 – амплитуда плотности светового потока, t_0 – начальный момент освещения, τ – длительность освещения. Формула (9) описывает временную зависимость светового потока на интервале полупериода ($t_0, t_0 + \tau$), за пределами которого поток считается равным нулю. Ее параметры будут далее считаться заданными, как исходные для расчетной модели [39-41]. Кроме того, мы будем считать заданными углы падения на поверхности пола и стен, а также размеры световых пятен. Эти геометрические параметры потребуются для определения величины конвективного теплообмена нагретых солнцем участков.

Суточный ход температуры воздуха [42] хорошо воспроизводится гармонической зависимостью:

$$T_{ext}(t) = T_0 + \Delta T \cdot \cos(\omega t). \quad (10)$$

Что касается функции (9), то она задана на конечном интервале и не является гармонической, поэтому прямое применение изложенного выше метода гармонических волн невозможно. Для его использования необходимо сначала разложить функцию (9) в ряд Фурье по гармоническим функциям с периодом в $\Delta t = 2\pi/\omega$ (сутки):

$$q_s(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_n \exp(i\omega n t). \quad (11)$$

где

$$c_n = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} q_s(t) \exp(-i\omega n t) dt, n = 0, \pm 1, \pm 2. \quad (12)$$

Для временной зависимости в виде (9) получим:

$$c_n = \frac{kq_0}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\tau} \sin\left(\pi \frac{t-t_0}{\tau}\right) \exp(i\omega n t) dt. \quad (13)$$

Вычисление этого интеграла приводит к выражению:

$$c_n = \frac{\Omega k q_0}{\Delta t (\Omega^2 - \beta^2)} \exp(-i\beta t_0) (\exp(-i\beta \tau) + 1), \quad (14)$$

где введено обозначение $\beta = \omega n$.

Разложение в ряд Фурье (11) позволяет свести задачу о тепловом отклике помещения на нестационарный солнечный поток с суточным периодом к совокупности задач с гармоническими граничными условиями. Поскольку мы рассмотрели основные факторы, влияющие на тепловой обмен помещения, можно представить более полную математическую модель, учитывающую теплообмен через все граничные поверхности помещения в форме параллелепипеда. Мы будем

считать одну из стен выполненной с использованием стеклопакета, в то время как все стены сложены из бруса одинаковой толщины. Пол и потолок будем считать выполненными так же из дерева. Температуру на внешней поверхности деревянных конструкций будем считать соответствующей температуре окружающего воздуха, которая меняется по гармоническому закону в течение суток. Принудительное охлаждение или нагрев воздуха в помещении поддерживают постоянство температуры. Через остекление проникает поток солнечной энергии, который проецируется на пол и стены в виде солнечных пятен определенной освещенности и длительности. Поверхность пола частично поглощает и частично рассеивает излучение, которое мы считаем полностью и равномерно распределяется по всем внутренним поверхностям помещения, внося дополнительный тепловой поток.

Нагретые солнечным излучением участки поверхности имеют температуру, отличную от теневых областей соответствующих поверхностей и вносят основной вклад в конвективный теплообмен. В качестве коэффициентов теплообмена выбраны средние значения коэффициентов для исследуемых диапазонов колебаний температуры. Мы будем считать, что процессы теплообмена в воздушной среде помещения и в воздушном промежутке между стеклами происходят быстро по сравнению с суточными колебаниями температуры воздуха и временем нагрева за счет светового пятна. В то же время, тепловую инерцию в материале стен, пола и потолка необходимо учитывать в виде тепловых волн.

Таким образом, нагрев воздуха внутри помещения мы будем учитывать с помощью уравнения теплового баланса, выражающего закон сохранения энергии. Сумма тепловых потоков равна скорости изменения тепловой энергии массы M воздуха в помещении, так что [43]:

$$c_p M \frac{dT}{dt} = \sum_j Q_j, \quad (15)$$

Здесь c_p – теплоемкость воздуха, T – температура воздуха в помещении, Q_j – тепловые потоки, идущие внутрь и наружу помещения через ограждающие поверхности, а также внутренние тепловые источники. Тепловые потоки через ограждающую поверхность внутри помещения можно записать в виде:

$$Q_j = S_j q_j + s_j p_j, \quad (16)$$

где q_j – плотность теплового потока на границе освещенной солнцем участка поверхности ограждения с номером j и площадью S_j , p_j – плотность теплового потока на границе неосвещенной поверхности.

щенной солнцем участке поверхности ограждения с номером j и площадью s_j . Нагретые солнцем и теневые участки ограждения имеют разную температуру поверхности, которую мы обозначим как $T_j^S(0)$ и $T_j^T(0)$ соответственно. Плотность тепловых потоков внутри помещения определяются разностью температур поверхности стены и температуры воздуха в помещении:

$$q_j = \alpha_j^S (T_j^S(0) - T), \quad (17)$$

$$p_j = \alpha_j^T (T_j^T(0) - T). \quad (18)$$

В уравнениях (17), (18) учтено, что солнечные и теневые участки поверхности могут иметь разные коэффициенты конвекционного теплообмена из-за разной степени нагрева. Теплообмен через остекленную поверхность мы опишем с помощью теплового сопротивления R единицы площади поверхности в виде уравнения:

$$q_G = \Theta(1 + \beta)/R, \quad (19)$$

где β – коэффициент, учитывающий инфильтрацию воздуха.

Таким образом, граничные условия на поверхностях раздела задаются уравнением (3), а уравнение температуропроводности имеет вид (2). Световой поток на освещенных участках поверхностей в зависимости от времени представляется в виде сумм гармонических зависимостей с помощью ряда Фурье (11). Задача об установившемся периодическом за сутки теплообмене сводится к совокупности отдельных задач с периодическими граничными условиями. Для каждого плоского выделенного участка ограждающей конструкции периодическое установившееся решение ищется в виде (7), (8). С учетом граничных условий такая задача сводится к системе линейных алгебраических уравнений. Суммируя полученные решения и переходя к действительным числам, мы получим зависимость температуры воздуха в помещении как функцию времени.

Результаты соответствующего расчета теплового потока в течение суток представлены на рис.4.

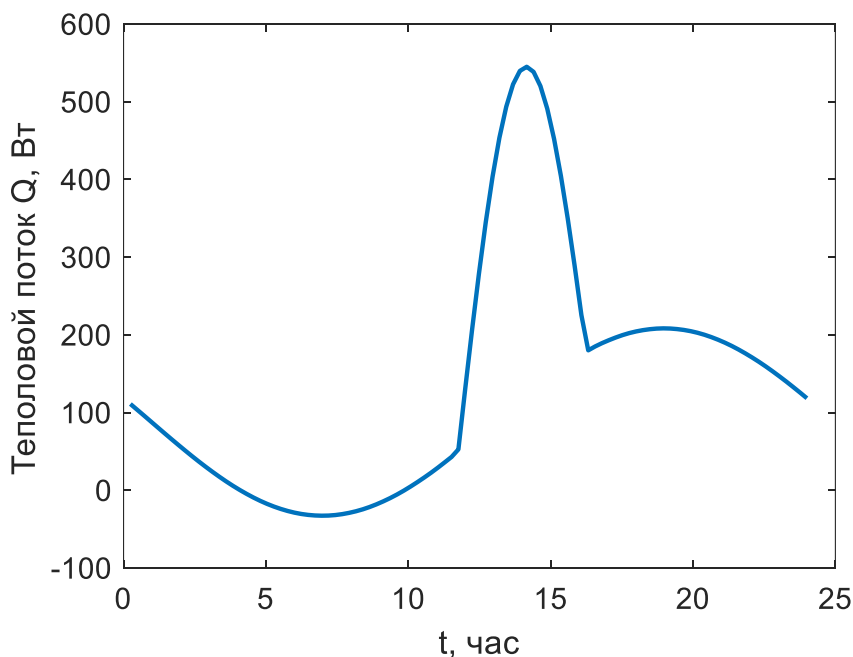


Рис. 4. Тепловой поток через наружное ограждение в течение суток с учетом солнечной инсоляции через оконный проем

Из полученной зависимости видно, что наиболее резко поток энергии нарастает в период прямого солнечного освещения помещения через оконный проем. Полная компенсируемая за счет кондиционирования воздуха тепловая энергия за сутки составляет 3,57 кВтч. С учетом холодильного коэффициента охлаждения 3, затрачиваемая электрическая мощность составляет около

1,2 кВтч. С учетом тарифов для садового некоммерческого товарищества 2,55 руб. за 1 кВтч, суточная стоимость составит около 3 руб. для одной комнаты. Для сравнения нами проведен расчет для случая, когда солнечное излучение не падает на стеклопакет, а отклоняется защитным экраном. Результаты расчетов приведены на рис. 5.

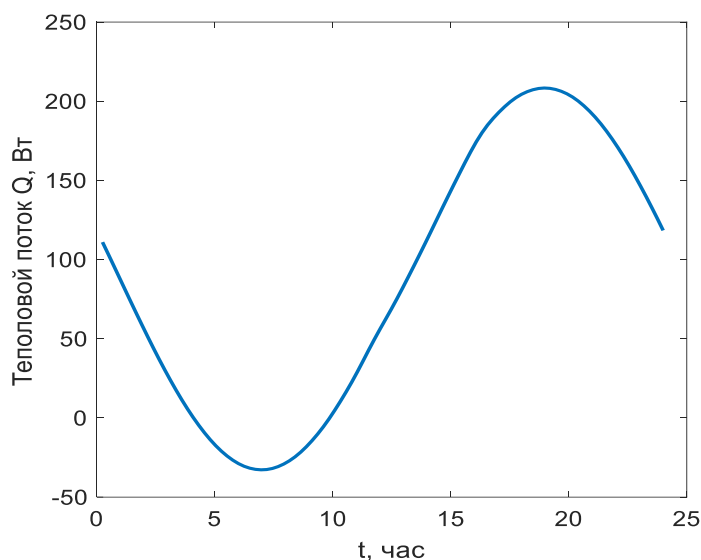


Рис. 5. Тепловой поток через наружное ограждение в течение суток без солнечной инсоляции через оконный проем

Наглядно видно исчезновение характерного пика, связанного перед этим с поступлением прямых солнечных лучей в помещение. Полная компенсируемая тепловая энергия за сутки в этом случае составляет 2,3 кВтч. С учетом коэффициента охлаждения, затрачиваемая электрическая мощность составляет около 0,8 кВтч. С учетом тарифов для садового некоммерческого товарищества, суточная стоимость составит около 2 руб. для одной комнаты, т.е. снижется на треть по сравнению с вариантом открытой инсоляции.

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод, что правильные мероприятия по

затенению оконных проемов с солнечной стороны здания позволяет существенно уменьшить расходы на кондиционирование воздуха в помещениях. Как видно из результатов расчетов, эффективный коэффициент теплообмена всегда ниже максимального значения, и их отношение остается почти постоянным (рис. 6). Получено значение среднего за период температурных колебаний коэффициента конвекции 0,607, отличается от имевшегося ранее значения 0,64 [44], с учетом его нелинейной зависимости от разности температур.

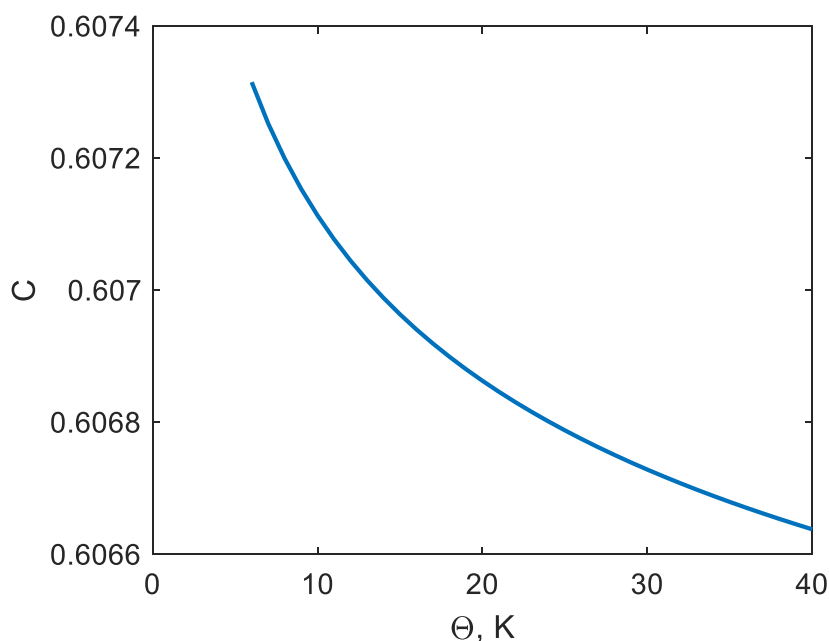


Рис. 6. Зависимость отношения эффективного коэффициента теплообмена к его значению при амплитудном значении температуры от амплитуды температурных колебаний

Выводы. Развита в работе математическая модель расчета нестационарных тепловых потоков внутри помещения с учетом колебаний температуры наружного воздуха и инсоляции позволяет рассчитывать периодическое в течение суток изменение условий кондиционирования воздуха в помещении.

1. Показано, что для описания тепловых потоков в домах из дерева можно с контролируемой точностью использовать составные одномерные модели теплообмена и теплопередачи.

2. Уравнения теплообмена содержат нелинейные граничные условия, которые можно приближенно заменить линейными средними соотношениями.

3. Предложено установившиеся решения с периодическими граничными условиями находить методом наложения тепловых волн с использованием комплексных переменных. Наличие периодического нагрева помещения солнечной радиацией можно учесть с помощью разложения временной зависимости в ряд Фурье.

4. Сформулированная математическая модель теплообмена помещения учитывает эффекты запаздывания распространения температурного поля в стенах при изменении температуры окружающего воздуха и динамическое изменение теплового потока от световых потоков снаружи и внутри помещения.

5. Использование затенения световых проемов с солнечной стороны позволяет получить снижение затрат на одну треть для пиковых режимов кондиционирования.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Donn M.R., Thomas G., Joyce R., Hawkins T., Brown L. Designing comfortable homes: Guidelines on the use of glass, mass and insulation for energy efficiency. Cement & Concrete Association of New Zealand. Wellington, 2001. 78 p.
2. Fitton R., Swan W., Hughes T., Benjaber M. The thermal performance of window coverings in a whole house test facility with single-glazed sash windows // *Energy Efficiency*. 2017. Vol. 10. Pp.1419–1431. Doi 10.1007/s12053-017-9529-0.
3. Борискина И.В. Здания и сооружения со светопрозрачными фасадами и кровлями. Теоретические основы проектирования светопрозрачных конструкций. С-Петербург: Инженерно-информационный Центр Оконных Систем, 2012. 400 с.
4. Dabaieh M., Elbably A. Ventilated Trombe wall as a passive solar heating and cooling retrofit-

ting approach; a low-tech design for off-grid settlements in semi-arid climates // *Solar Energy*. 2015. Vol. 122. Pp. 820–833.

5. Canadian wood-frame house construction. Ottawa - Ontario: Canada Mortgage and Housing Corporation, 2013. 335 p.

6. Bisegna F., Mattoni B., Gori P., Asdrubali F., Guattari C., Evangelisti L., Sambuco S., Bianchi, F. Influence of Insulating Materials on Green Building Rating System Results // *Energies*. 2016. № 9. Pp. 712–728. Doi 10.3390/en9090712.

7. Mitterpach J., Štefko J. An Environmental Impact of a Wooden and Brick House by the LCA Method // *KEM*. 2016. Vol. 688. Pp. 204–209.

8. Dokka T.H., Hemstad K. Energy efficient residential buildings for the future – a handbook for designing passive houses and low energy residential buildings, IEA SHC Task 28/ECBCS Annex 38 Sustainable Solar Housing (in Norwegian). 2006. 105 p.

9. Simonson C.J., Salonvaara M., Ojanen T. Improving indoor climate and comfort with wooden structures. Technical Research Center of Finland, ESPOO. Vuorimiehentie, 2001. 298 p.

10. Ma L., Shao N., Zhang, J., Zhao T. The Influence of Doors and Windows on the Indoor Temperature in Rural House // *Procedia Engineering*, 2015. Vol. 121. Pp. 621–627.

11. Mohammed A.A., Khudheyer A.F. Natural convection heat transfer inside enclosure with various geometries and enhancement methods a review // *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7 (4). Pp. 4892–4898.

12. Kamiyo O.M., Angeli D., Barozzi G.S., Collins M.W., Olunloyo V., Talabi S. A Comprehensive Review of Natural Convection in Triangular Enclosures // *Applied Mechanics Reviews*. 2010. Vol. 63(6). 13 p.

13. Rahimi A., Dehghan Saeed A., Kasaeipoor A., Hasani Malekshah E. A comprehensive review on natural convection flow and heat transfer: The most practical geometries for engineering applications // *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2019. Vol. 29 (3). Pp. 834–877. Doi 10.1108/HFF-06-2018-0272.

14. Awbi H.B., Hatton A. Natural convection from heated room surfaces // *Energy and Buildings*. 1999. Vol. 30(3). Pp. 233–244.

15. Ramesh N., Venkateshan S.P. Effect of Surface Radiation on Natural Convection in a Square Enclosure // *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 1999. Vol. 13 (3). Pp. 299–301.

16. Dimassi N., Dehmani L. Natural Convection of a Solar Wall in a Test Room under Tunisian Climate // *International Scholarly Research Network ISRN Renewable Energy*. 2012. Vol. 2012. 9 p.

17. Zohuri B., Fathi N. Natural or Free Convection // *Thermal-Hydraulic Analysis of Nuclear Reactors*, 2015. Pp. 287–309. doi: 10.1007/s12209-019-00208-9.
18. Incropera F.P., DeWitt D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer (4th edition). NY: John Wiley & Sons, 1996.
19. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. М.: Высшая школа, 1982. 414 с.
20. Wood handbook: wood as an engineering material. General technical report FPL; GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 463 p. doi: 10.2737/FPL-GTR-113.
21. Архив погоды на 21 июля в г. Воронеж [Электронный ресурс]. Систем. требования: Internet Explorer. URL: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/voronezh/14-july/> (дата обращения: 01.03.2022)
22. Jayamaha S.E.G., Wijesundera N.E., Chou S.K. Measurement of the heat transfer coefficient for walls // *Building and Environment*. 1996. Vol. 31(5). Pp. 399–407. Doi: 10.1016/0360-1323(96)00014-5.
23. Мершиев А.А., Шепс Р.А., Лобанов Д.В., Шашин А.В. Определение величины потока прямого солнечного излучения, направленного на горизонтальную поверхность // *Региональная архитектура и строительство*. 2020. №4. С. 137–143.
24. Басок Б.И., Новиков В.Г., Давыденко Б.В., Беляева Т.Г., Новицкая М.П., Сороковой Р.Я. Радиационно-конвективный теплообмен здания с окружающей средой при воздействии солнечного излучения // *ИФЖ*. Том 93. № 1. 2020. С. 48–57.
25. Lienhard J.H., Lienhard J.H. A heat transfer textbook. Phlogiston Press, Cambridge Mass., 2006. 749 p.
26. Полежаев В.И., Вerezуб Н.А., Простомолотов А.И. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса. М.: Наука. 1987. 272 с.
27. Складов К.А., Мелькумов В.Н., Климентов А.В. Математическая модель вентиляционных процессов в помещениях сложной конфигурации // *Вестник ВГТУ. Сер. Энергетика*. 2006. Т.2 (6). С. 53–55.
28. Мелькумов В.Н., Кузнецов С.Н., Павлюков С.П., Кузнецов Р.Н. Формирование конвективных воздушных потоков при действии в помещении источника тепла // *Вестник ВолГАСУ. Сер.: Стр-во и архит.* 2008. Вып. 12 (31). С. 76–80.
29. Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Шеремет М.А. Естественная конвекция в замкнутом параллелепипеде при наличии локального источника энергии // *Прикладная механика и техническая физика*. 2013. Т. 54. №4. С. 86–95.
30. Мартюшев С.Г., Шеремет М.А. Математическое моделирование ламинарного режима сопряженного конвективного теплообмена в замкнутой полости с источником энергии в условиях поверхностного излучения // *Инженерно-физический журнал*. 2013. Т.86. №1. С. 107–115.
31. Унаспеков Б.А., Сабденов К.О., Ерзада М., Ауелбеков С.Ш., Таубалдиева А.С., Сейтказиев О.Д. Исследование свободного конвективного движения воздуха в отапливаемом помещении // *ИФЖ*. 2020. Том 93. № 1. С. 170–177.
32. Zhou L., Liu J., Huang Q. Analysis of Combined Natural Convection and Radiation Heat Transfer in a Partitioned Rectangular Enclosure with Semitransparent Walls // *Trans. Tianjin Univ.* 2019. Vol. 25. Pp. 472–487.
33. Пикулин В.П., Похожаев С.И. Практический курс по уравнениям математической физики. М.: МЦНМО, 2004. 208 с.
34. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: МГУ, 1999. 798 с.
35. Минко В.А., Подпоринов Б.Ф., Семиренко А.С. Комплексное проектирование установок центрального водяного отопления зданий жилищно-гражданского назначения // Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. 203 с.
36. Böckh P., Wetzel T. Heat Transfer. Basics and Practice. Springer, Karlsruhe, 2012. 276 p.
37. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Изд-во ЛКИ, 2007. 240 с.
38. Gustavsen A., Jelle B.P., Arasteh D., Kohler C. State of the Art Highly Insulating Window Frames // *Research and Market Review. United States: N.p.*, 2007.
39. Харкнесс Е., Мехта М. Регулирование солнечной радиации в зданиях. М.: Стройиздат, 1984. 176 с.
40. Методическое пособие. Расчеты теплопотуплений в здание от проникающей солнечной радиации за отопительный период. Москва, 2017. 111 с.
41. СП 345.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования тепловой защиты». М.: Минстрой России, 2017. 51 с.
42. Погосян Х.П. Воздушная оболочка Земли. Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1962. 294 с.
43. Mendes N., Gustavo H.C., de Araújo O. H. Building thermal performance analysis by using matlab/simulink // *Seventh International IBPSA Conference Rio de Janeiro, Brazil*. 2001. Pp. 473–480.

44. Самарин О.Д. О коэффициенте конвективного теплообмена на поверхностях огражде-

ний помещений при периодическом тепловом режиме // Энергоснабжение и энергоподготовка. 2010. №1 (63). С. 48–49.

Информация об авторах

Мерщев Александр Александрович, старший преподаватель кафедры жилищно-коммунального хозяйства. Воронежский государственный технический университет. E-mail: sasha__1990@mail.ru. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

Головинский Павел Абрамович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры инноватики и строительной физики. E-mail: golovinski@bk.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

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

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

Поступила 02.03.2022 г.

© Мерщев А.А., Головинский П.А., Свирин М.В., Семиненко А.С., 2022

^{1,*}*Merschiev A.A.*, ¹*Golovinski P.A.*, ²*Svirin M.V.*, ²*Semenenko A.S.*

¹*Voronezh state technical University*

²*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

^{*}*E-mail: sasha__1990@mail.ru*

SIMULATION OF A NON-STATIONARY THERMAL MODE OF PREMISE WITH THE WOOD ENCLOSING STRUCTURES

Abstract. *A non-stationary approach to the calculation of periodic thermal regimes of low-rise buildings with enclosing structures made of wooden beams equipped with double-glazed windows is considered. The application of the proposed method allows to determine the non-stationary thermal load of the air conditioning system for this type of house, as well as the required compensating capacities during the day. The conditions of applicability of plane-layered thermophysical calculation schemes in the presence of spatially inhomogeneous heating are analyzed. A refinement of the procedure for averaging convective heat transfer coefficients for vertical walls by periodic temperature fluctuations is carried out. An algorithm for calculating the periodic thermal regime based on the representation of time dependencies in the form of a Fourier series is proposed. The role of solar radiation flow through double-glazed windows in the heat exchange and energy efficiency of a wooden house is shown. The proposed mathematical model of room heat exchange takes into account the effects of the delay in the propagation of the temperature field in the walls when the ambient temperature changes and the dynamic change in heat flux from light flows outside and inside the room. It is determined that protection from direct sunlight entering the room through the window opening allows reducing peak air conditioning costs in the summer by a third for peak air conditioning modes.*

Keywords: *wooden house, environmental friendliness, non-stationary heat transfer, periodic thermal regime, energy efficiency.*

REFERENCES

1. Donn M.R., Thomas G., Joyce R., Hawkins T., Brown L. Designing comfortable homes: Guidelines on the use of glass, mass and insulation for energy efficiency. Cement & Concrete Association of New Zealand. Wellington, 2001. 78 p.
2. Fitton R., Swan W., Hughes T., Benjaber M. The thermal performance of window coverings in a whole house test facility with single-glazed sash windows. Energy Efficiency. 2017. Vol. 10. Pp.1419–1431. DOI: 10.1007/s12053-017-9529-0.

3. Boriskina I.V. Buildings and structures with translucent facades and roofs [Zdaniya i sooruzheniya so svetoprozrachnymi fasadami i krovlyami. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya svetoprozrachnykh konstrukcij]. Engineering Information Center of Window Systems, St. Petersburg, 2012. 400 p. (rus)

4. Dabaieh M., Elbably A. Ventilated Trombe wall as a passive solar heating and cooling retrofit-

ting approach; a low-tech design for off-grid settlements in semi-arid climates. *Solar Energy*. 2015. Vol. 122. Pp. 820–833.

5. Canadian wood-frame house construction. Ottawa - Ontario: Canada Mortgage and Housing Corporation, 2013. 335 p.

6. Bisegna F., Mattoni B., Gori P., Asdrubali F., Guattari C., Evangelisti L., Sambuco S., Bianchi, F. Influence of Insulating Materials on Green Building Rating System Results. *Energies*, 2016. No. 9. Pp. 712–728. doi:10.3390/en9090712.

7. Mitterpach J., Štefko J. An Environmental Impact of a Wooden and Brick House by the LCA Method KEM, 2016. Vol. 688. Pp. 204–209.

8. Dokka T.H., Hemstad K. Energy efficient residential buildings for the future – a handbook for designing passive houses and low energy residential buildings. IEA SHC Task 28/ECBCS Annex 38 Sustainable Solar Housing (in Norwegian). 2006. 105 p.

9. Simonson C.J., Salonvaara M., Ojanen T. Improving indoor climate and comfort with wooden structures. Technical Research Center of Finland, ESPOO. Vuorimiehentie, 2001. 298 p.

10. Ma L., Shao N., Zhang, J., Zhao T. The Influence of Doors and Windows on the Indoor Temperature in Rural House. *Procedia Engineering*, 2015. Vol. 121. Pp. 621–627.

11. Mohammed A.A., Khudheyer A.F. Natural convection heat transfer inside enclosure with various geometries and enhancement methods a review. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7 (4). Pp. 4892–4898.

12. Kamiyo O.M., Angeli D., Barozzi G. S., Collins M. W., Olunloyo V., Talabi S. A Comprehensive Review of Natural Convection in Triangular Enclosures. *Applied Mechanics Reviews*, 2010. Vol. 63(6). 13 p.

13. Rahimi A., Dehghan Saeed A., Kasaeipoor A., Hasani Malekshah E. A comprehensive review on natural convection flow and heat transfer: The most practical geometries for engineering applications. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2019. Vol. 29 (3). Pp. 834–877. doi: 10.1108/HFF-06-2018-0272.

14. Awbi H.B., Hatton A. Natural convection from heated room surfaces. *Energy and Buildings*. 1999. Vol. 30(3). Pp. 233–244.

15. Ramesh N., Venkateshan S.P. Effect of Surface Radiation on Natural Convection in a Square Enclosure. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 1999. Vol. 13 (3). Pp. 299–301.

16. Dimassi N., Dehmani L. Natural Convection of a Solar Wall in a Test Room under Tunisian Climate. *International Scholarly Research Network ISRN Renewable Energy*. 2012. Vol. 2012. 9p.

17. Zohuri B., Fathi N. Natural or Free Convection. *Thermal-Hydraulic Analysis of Nuclear Reactors*. 2015. Pp. 287–309. doi: 10.1007/s12209-019-00208-9.

18. Incropera F.P., DeWitt D.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (4th edition). NY: John Wiley & Sons, 1996.

19. Bogoslovsky V.N. *Building Thermophysics* [Stroitel'naya teplofizika]. Moscow: Higher School, 1982. 414 p. (rus)

20. Wood handbook: wood as an engineering material. General technical report FPL; GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 463 p. doi:10.2737/FPL-GTR-113.

21. Weather archive for July 21 in Voronezh [Arhiv pogody na 21 iyulya v g. Voronezh]. Internet Explorer. URL: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/voronezh/14-july/> (date of treatment: 01.03.2022)

22. Jayamaha S.E.G., Wijesundera N.E., Chou S.K. Measurement of the heat transfer coefficient for walls. *Building and Environment*. 1996. Vol. 31(5). Pp. 399–407. doi: 10.1016/0360-1323(96)00014-5.

23. Mershchiev A.A., Sheps R.A., Lobanov D.V., Shashin A.V. Determination of the magnitude of the flux of direct solar radiation directed at the horizontal surface [Opredelenie velichiny potoka pryamogo solnechnogo izlucheniya, napravlenno na gorizonta'nuyu poverhnost']. *Regional Architecture and Construction*. 2020. No. 4. Pp. 137–143. (rus)

24. Basok B.I., Novikov V.G., Davydenko B.V., Belyaeva T.G., Novitskaya M.P., Sorokovoj R.Ya. Radiation and Convective Heat Exchange of a Building with the Environment under the Exposure to Solar Radiation [Radiacionno-konvektivnyj teplotobmen zdaniya s okruzhayushchej sredoj pri vozdejstvii solnechnogo izlucheniya]. *IFJ*. Vol. 93. No. 1. 2020. Pp. 48–57. (rus)

25. Lienhard J.H., Lienhard J.H. *A heat transfer textbook*. Phlogiston Press, Cambridge Mass., 2006. 749 p.

26. Polezhaev V.I., Verezub N.A., Prostopolotov A.I. Mathematical modeling of convective heat and mass transfer based on Navier-Stokes equations [Matematicheskoe modelirovanie konvektivnogo teplotmassoobmena na osnove uravnenij Nav'e-Stoksa]. Moscow: Nauka, 1987. 272 p. (rus)

27. Sklyarov K.A., Melkumov V.N., Klimentov A.V. Mathematical Model of Ventilation Processes in Complex Configuration Rooms [Matematicheskaya model' ventilyacionnyh processov v pomeshcheniyah slozhnoj konfiguracii]. *Vestnik VGTU. Ser. of Power Engineering*. 2006. Vol.2(6). Pp. 53–55. (rus)

28. Melkumov V.N., Kuznetsov S.N., Pavlyukov S.P., Kuznetsov R.N. The Formation of Convective Air Flows under the Action of a Heat Source in the Room [Formirovanie konvektivnykh vozdukhnykh potokov pri deystvii v pomeshchenii istochnika tepla]. VolgGASU Bulletin. Volgograd State University of Civil Engineering and Architecture. 2008. Vol. 12 (31). Pp. 76–80. (rus)
29. Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Sheremet M.A. Natural convection in a closed parallelepiped in the presence of a local source of energy [Estestvennaya konvekciya v zamknutom parallelepipedе pri nalichii lokal'nogo istochnika energii]. Applied mechanics and technical physics. 2013. Vol. 54. No. 4. Pp. 86–95. (rus)
30. Martyushev S.G., Sheremet M.A. Mathematical Modelling of Laminar Mode of Conjugate Convective Heat and Mass Transfer in a Closed Cavity with an Energy Source under Surface Radiation [Matematicheskoe modelirovanie laminarnogo rezhima sopryazhennogo konvektivnogo teplomassoperenosa v zamknutoj polosti s istochnikom energii v usloviyah poverhnostnogo izlucheniya]. Journal of Engineering and Physics. 2013. Vol. 86. No. 1. Pp. 107–115. (rus)
31. Unaspekov B.A., Sabdenov K.O., Erzada M., Auelbekov S.S., Taubaldieva A.S., Seitkaziev O.D. Study of free convective air movement in the heated room [Issledovanie svobodnogo konvektivnogo dvizheniya vozduha v otaplivaemom pomeshchenii]. IFJ. 2020. Vol. 93. No. 1. Pp. 170–177. (rus)
32. Zhou L., Liu J., Huang Q. Analysis of Combined Natural Convection and Radiation Heat Transfer in a Partitioned Rectangular Enclosure with Semitransparent Walls. Trans. Tianjin Univ. 2019. Vol. 25. Pp. 472–487.
33. Pikulin V.P., Pokhozhaev S.I. A Practical Course in the Equations of Mathematical Physics [Prakticheskij kurs po uravneniyam matematicheskoy fiziki]. Moscow: MSCI, 2004. 208 p. (rus)
34. Tikhonov A.N., Samarsky A.A. The equations of mathematical physics [Uravneniya matematicheskoy fiziki]. Moscow State University, 1999. 798 p. (rus)
35. Minko V.A., Podporinov B.F., Seminenko A.S. Integrated design of central water heating installations for residential and civil buildings [Kompleksnoe proektirovanie ustanovok central'nogo vodyanogo otopeniya zdaniy zhilishchno-grazhdanskogo naznacheniya]. Belgorod: BSTU, 2013. 203 p.
36. Böckh P., Wetzel T. Heat Transfer. Basics and Practice. Springer, Karlsruhe, 2012. 276 p.
37. Kharkevich A.A. Spectra and Analysis [Spektry i analiz]. Moscow: LKI Publishing House, 2007. 240 p. (rus)
38. Gustavsen A., Jelle B.P., Arasteh D., Kohler C. State of the Art Highly Insulating Window Frames. Research and Market Review. United States: N.p., 2007.
39. Harkness E., Mehta M. Regulation of Solar Radiation in Buildings [Regulirovanie solnechnoi radiacii v zdaniyah]. Moscow: Stroyizdat, 1984. 176 p. (rus)
40. Methodical Guide. Calculations of heat gain in the building from penetrating solar radiation during the heating period [Metodicheskoe posobie. Raschety teplopostuplenij v zdanie ot pronikayushchej solnechnoj radiacii za otopitel'nyj period]. Moscow, 2017. 111 p. (rus)
41. SP 345.1325800.2017 Residential and Public Buildings. Design rules for thermal protection [Zdaniya zhilye i obshchestvennye. Pravila proektirovaniya teplovoj zashchity]. Moscow: Minstroy Rossii, 2017. 51 p. (rus)
42. Pogosyan Kh.P. The Air Shell of the Earth [Vozdušnaya obolochka Zemli]. Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izdatel'stvo, 1962. 294 p. (rus)
43. Mendes N., Gustavo H.C., de Araújo O. H. Building thermal performance analysis by using matlab/simulink. Seventh International IBPSA Conference Rio de Janeiro, Brazil. 2001. Pp. 473–480.
44. Samarin O.D. On the Coefficient of Convective Heat Exchange on the Surfaces of Premises during Periodic Thermal Operation. [O koefficiente konvektivnogo teploobmena na poverhnostyah ograzhdenij pomeshchenij pri periodicheskom teplovom rezhime]. Energosnabzhenie i energopodgotovka. 2010. No. 1 (63). Pp. 48–49. (rus)

Information about the authors

Merschiev, Alexander A. Senior Lecturer, Department of Housing and Communal Services. Voronezh State Technical University. E-mail: sasha__1990@mail.ru. Russia, 394006, Voronezh, st. 20-letiya Oktyabrya, 84.

Golovinski, Pavel A. Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Innovation and Building Physics. E-mail: golovinski@bk.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, st. 20-letiya Oktyabrya, 84.

Svirin, Maksim V. Engineer E-mail: svirinmv@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Semenenko, Artem S. PhD. E-mail: semenenko.as@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 02.03.2022

Для цитирования:

Мершчиев А.А., Головинский П.А., Свиринов М.В., Семенов А.С. Моделирование нестационарного теплового режима помещения с деревянными ограждающими конструкциями // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 8. С. 35–49. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-35-49

For citation:

Merschiev A.A., Golovinski P.A., Svirin M.V., Semenenko A.S. Simulation of a non-stationary thermal mode of premise with the wood enclosing structures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 8. Pp. 35–49. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-35-49

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-50-59

Осипова Н.Н., Культяев С.Г.Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А***E-mail: osnat75@mail.ru*

НАКОПЛЕНИЕ СВОБОДНОЙ ВОДЫ В СИСТЕМАХ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ СЖИЖЕННЫМ ГАЗОМ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ БУТАНА

Аннотация. Наличие свободной воды негативно сказывается на эксплуатации систем газоснабжения, вызывая коррозию элементов, образование паровых пробок в трубопроводах, ледяных и гидратных пробок при низких температурах особенно при использовании сжиженных углеводородных газов с повышенным содержанием бутана.

Используя основные положения термодинамического равновесия паровой и жидкой фаз в резервуаре, условий обеспечения минимального избыточного давления паровой фазы для естественной регазификации продукта, условий подачи необходимого количества газа потребителю на все коммунально-бытовые нужды в холодный период времени года определены количественные характеристики эксплуатации систем газоснабжения на базе подземных резервуаров при использовании газа с повышенным содержанием бутана.

В результате проведенных исследований определено количество накопленной влаги в режиме хранения газа и эксплуатации резервуаров, обоснован минимальный уровень заполнения резервуаров жидкой фазой и количество заправок газа в год при обеспечении различных коммунальных нужд в зависимости от климатической зоны эксплуатации и характеристик газоснабжаемых объектов. Доказано, что при использовании сжиженных углеводородных газов с повышенным содержанием бутана с учетом накопления влаги в годовом цикле эксплуатации рекомендуется применение резервуаров объемом от 5,0 м³ при использовании газа на все коммунально-бытовые нужды, резервуаров объемом от 1,0 м³ при использовании газа только на цели пищеприготовления.

Ключевые слова: сжиженный углеводородный газ, свободная вода, накопление, эксплуатация систем газоснабжения, минимальный уровень заполнения резервуаров газом, количество заправок в год.

Введение. При эксплуатации систем снабжения сжиженными углеводородными газами (СУГ) одним из негативных факторов является наличие свободной воды в резервуарах. Научными исследованиями установлено, что на образование воды в свободном виде, льда и гидратов значительное влияние оказывают такие факторы как температура, давление, состав и фазовое состояние сжиженного углеводородного газа [1–4]. Влага, содержащаяся в жидкой и паровой фазах сжиженного углеводородного газа, вызывает ряд негативных явлений при эксплуатации систем газоснабжения: коррозию элементов, формирование паровых пробок в трубопроводах, образование конденсата, а при низких температурах образование ледяных и гидратных пробок в элементах систем и регуляторах давления [5–7]. В качестве мероприятий по предотвращению конденсации паровой фазы и образования ледяных и гидратных пробок в трубопроводах и редуцирующих устройствах предусматривают, обогрев редуцирующих головок резервуаров и трубопроводов [8, 9], нанесение тепловой изоляции на участки системы газоснабжения [10, 11]. Однако, данные мероприятия не применимы к резервуарам сжиженного газа, в которых осуществляются процессы изменения состояния газа, обеспечивается термодинамическое равновесие паровой и

жидкой фаз и происходит основное накопление воды в свободном виде.

Необходимо отметить также, что проводимые научные исследования ориентированы на повышенное содержание пропана в смеси, что в целом не характерно для реально используемого газа в коммунально-бытовом обеспечении [1, 3, 12, 13].

Принимая во внимание, что обеспечение потребителей газовым топливом, кроме пропана технического, осуществляется газом марок «пропан-бутан технический» и «бутан технический» с повышенным содержанием бутана, целью исследований является определение условий накопления свободной влаги в резервуарах и разработка констатирующих положений по применению децентрализованных систем газоснабжения на базе резервуаров различного объема при наличии в газе повышенного содержания бутана.

Задачи, раскрывающие суть исследований, заключаются в изучении накопления влаги в резервуарах в режиме хранения и в режиме годового газопотребления в зависимости от компонентного состава газа, климатических условий, режимов использования СУГ на различные коммунально-бытовые нужды, в определении необходимого количества заправок резервуаров газом, при ограничении минимального давления в сосудах.

В качестве объектов исследований были приняты резервуары, в наиболее распространённом размерном ряду, массово применяемых для газификации индивидуальных жилых домов, выпускаемых отечественными производителями КонверсАтомЭнергоМонтаж (Россия, г. Москва), ХимМаш (Россия, г. Пенза) и зарубежными производителями Antonio Merloni (Италия, представительство г. Москва), Chemet (Польша, представительство г. Санкт-Петербург).

Материалы и методы. Учитывая, что жидкая и паровая фаза в резервуаре в режиме хранения СУГ находятся в термодинамическом равновесии, балансовое уравнение состояния имеет вид:

$$y_{\text{пр}} P_{\text{см}} = x_{\text{пр}} P_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где $y_{\text{пр}}$, $x_{\text{пр}}$ – концентрация пропана в паровой и жидкой фазах, соответственно, мол, %; $P_{\text{см}}$, $P_{\text{пр}}$ – давление смеси и паров пропана, соответственно, МПа.

Молярная концентрация пропана в жидкой фазе смеси пропан-бутана определится по выражению:

$$x_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{см}} - P_{\text{б}}}{P_{\text{пр}} - P_{\text{б}}}, \quad (2)$$

Парциальное давление насыщенных паров компонентов сжиженного углеводородного газа пропана и бутана, могут быть определены в соответствии с корреляцией Антуана:

$$P(t) = 10^{A - \frac{B}{C+t}}, \quad (3)$$

где A , B , C – константы уравнений, принимаемые в зависимости от рассматриваемого углеводорода.

Подставляя (3) в (2) получим выражение для определения молярной концентрации пропана в жидкой фазе:

$$x_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{см}} - 10^{A_{\text{б}} - \frac{B_{\text{б}}}{C_{\text{б}}+t}}}{10^{A_{\text{пр}} - \frac{B_{\text{пр}}}{C_{\text{пр}}+t}} - 10^{A_{\text{б}} - \frac{B_{\text{б}}}{C_{\text{б}}+t}}}. \quad (4)$$

Согласно выражению (1) содержание пропана в паровой фазе определится по выражению:

$$y_{\text{пр}} = \frac{\left(P_{\text{см}} - 10^{A_{\text{б}} - \frac{B_{\text{б}}}{C_{\text{б}}+t}} \right) 10^{A_{\text{пр}} - \frac{B_{\text{пр}}}{C_{\text{пр}}+t}}}{\left(10^{A_{\text{пр}} - \frac{B_{\text{пр}}}{C_{\text{пр}}+t}} - 10^{A_{\text{б}} - \frac{B_{\text{б}}}{C_{\text{б}}+t}} \right) P_{\text{см}}}. \quad (5)$$

В режиме использования СУГ для устойчивой регазификации жидкой фазы сжиженного углеводородного газа необходим постоянный приток тепла из окружающей среды, что максимально полно реализуется при подземной установке резервуаров. В этом случае, обеспечение потребителей газовым топливом, реализуется с использованием схемы с естественной регазификацией жидкой фазы газа [14-20].

Реализация схемы с естественной регазификацией газа в резервуаре происходит до наличия минимального давления паровой фазы для корректной работы регулирующего оборудования, которое определяется в соответствии с условием:

$$P_{\text{рез}}(t) \geq P_{\text{рег}} + H_{\text{ж}}, \quad (6)$$

где $P_{\text{рег}}$ – необходимое избыточное давление газа перед регулирующим клапаном «паровая - жидкая фаза», минимально 0,069 МПа; $H_{\text{ж}}$ – величина избыточного давления необходимого для подъема жидкой фазы из резервуара и подачи ее систему газоснабжения. Для самых неблагоприятных условий эксплуатации (минимальный уровень жидкой фазы СУГ в резервуаре) составляет $H_{\text{ж}}=0,01$ МПа.

Учитывая неравномерность потребления газа децентрализованными системами газоснабжения в течение года, накопление свободной жидкости в подземных резервуарах СУГ в режиме эксплуатации необходимо определять с учетом количества заправок сжиженным углеводородным газом в годовом цикле эксплуатации.

Как показали научные исследования, количество заправок резервуара газом зависит от многочисленных факторов, к которым относят: способ регазификации жидкой фазы СУГ, направленность использования газа на коммунально-бытовые нужды, энергопотребление объектов газоснабжения на нужды отопления, климатическая зона эксплуатации системы газоснабжения [21, 22].

Полезный объем газа, используемого потребителем, определяется между максимальным уровнем при заполнении резервуара и минимальным уровнем, обеспечивающим устойчивую регазификацию продукта для подачи потребителю [23]. При искусственном испарении жидкой фазы газа минимальный уровень газа в резервуаре ограничивается уровнем 15 %, что обусловлено работой испарителей СУГ. В режиме естественной регазификации продукта минимальный уровень заполнения резервуара газом определяется формированием избыточного давления паров СУГ для выполнения условия выражения (6).

Годовое количество заправок резервуара сжиженным газом определяется по формуле:

$$n = \frac{G_{\text{см}}}{V_p \cdot (\varphi_n - \varphi_{\text{min}}) \cdot \rho_{\text{см}}}, \quad (7)$$

где $G_{\text{см}}$ – годовой расход газа потребителем, кг/год; V_p – объем резервуара, м³; φ_n – начальный уровень заполнения резервуара; φ_{min} – минимальный уровень заполнения резервуара перед очередной заправкой; $\rho_{\text{см}}$ – плотность жидкой фазы, кг/м³.

Необходимо отметить, что максимальное потребление газа происходит в холодный период в связи с необходимостью отопления жилых зданий. Минимальное потребление наблюдается в теплый период года за счет снижения потребности на горячее водоснабжение и изменения рациона питания населения. Таким образом, при определении количества заливок необходимо ориентироваться на наиболее неблагоприятную ситуацию с максимальным потреблением газа в холодный период года с учетом сезонной неравномерности потребления.

Основная часть.

Определение накопления свободной воды в системах газоснабжения сжиженным газом с повышенным содержанием бутана на базе подземных резервуаров проводилось при следующих исходных данных:

- минимальное давление паровой фазы в резервуаре по условию (6);
- объекты газоснабжения – жилые здания площадью 64; 100; 256 м²;

- климатическая зона эксплуатации – умеренно-теплая, умеренно-холодная и холодная зона.

- направление использования газа: пищеприготовление; пищеприготовление, горячее водоснабжение и отопление.

- объем резервуаров $V_p=1,0$ м³; 3,0 м³; 5 м³.

Выбор площадей газоснабжаемых жилых зданий (64 м², 100 м², 256 м²) был произведен на основании научных исследований, проведенных в работе [24]. Авторами предложена математическая модель теплопотерь здания, учитывающая различные варианты соотношений длины и ширины сторон жилого здания, требования к высоте зданий по СП 55.13330 и остекленности фасадов по СП 50.13330, на основании которой была получена оптимальная конфигурация жилого здания в виде квадратного параллелепипеда, обладающего минимальным газопотреблением в холодный период.

В соответствии с выражениями (1–5) было определено содержание компонентов сжиженного углеводородного газа в паровой фазе в зависимости от температуры, давления и состава жидкой фазы (таблица 1). Для расчета принято самое неблагоприятное (максимальное) содержание бутана в марках газа «пропан-бутан технический» и «бутан-технический».

Принимая во внимание содержание растворенной влаги в 1 кг жидкой и паровой фаз углеводородов по [12, 13, 21, 25], в таблице также представлено содержание влаги в растворенном виде в компонентах смеси.

Таблица 1

Молярная концентрация компонентов, содержащих растворенную влагу в термодинамическом равновесии системы «жидкость-пар»

Температура жидкой фазы СУГ, °С	Давление паровой фазы, МПа	Содержание компонентов в паровой фазе, мол. %		Содержание растворенной влаги г на 1 кг смеси	
		Пропан (C ₃ H ₈)	Бутан (C ₄ H ₁₀)	жидкая фаза	паровая фаза
Состав жидкой фазы СУГ C ₃ H ₈ =40 %, C ₄ H ₁₀ =60 % (пропан-бутан технический)					
+35	0,7	70	30	3,1	18
+25	0,5	70	30	2,02	13,2
+15	0,4	75	25	1,16	9
+5	0,3	78	22	0,61	6,56
-5	0,2	78	22	0,28	4,2
-15	0,15	80	20	0,15	2,26
-25	0,1	80	20	0,1	1,36
Состав жидкой фазы СУГ C ₃ H ₈ =10 %, C ₄ H ₁₀ =90 % (бутан технический)					
+35	0,4	25	75	2,43	13,5
+25	0,3	25	75	1,56	10,5
+15	0,2	28	72	0,89	6,4
+5	0,15	30	70	0,48	4,48
-5	0,1	30	70	0,23	3,56

Результаты расчетов показали, что мольные составы паровой и жидкой фаз сжиженного углеводородного газа имеют различное содержание компонентов в виде пропана и бутана. В то же время содержание воды в растворенном виде в газовой фазе в режиме хранения СУГ в резервуаре значительно превышает таковое в жидкой. Данное обстоятельство отражается на насыщении жидкой и паровой фаз влагой при хранении и использовании газа, при этом понижение температуры паровой фазы приводит к обратному выпадению влаги в жидкость в виде конденсата по мере приближения паров к горловине резервуара.

Согласно неравенству (6), для регазификации газа и подачи его потребителю, избыточное давление паровой фазы в резервуаре должно быть не менее $P_{рез}=0,08$ МПа, что соответствует температуре минус 25 °С при составе смеси

«пропан-бутан технический» и минус 5 °С при составе смеси «бутан технический» (таблица 1).

Анализ климатических условий эксплуатации подземных резервуаров СУГ, показал, что температура на оси заложения подземного резервуара, обеспечивает достаточный теплоприток из грунтового массива для формирования необходимого избыточного давления паровой фазы в резервуаре. Принимая во внимание, что изменение температуры сжиженного газа происходит от температуры производства СУГ (+40- +35 °С) до температуры его хранения в зимний период времени года, определяемой на оси заложения резервуара в грунтовом массиве в соответствии с климатическими зонами эксплуатации в Российской Федерации, общее накопление воды в свободном виде в резервуарах СУГ представлено в таблице 2.

Таблица 2

**Количество свободной воды выделяющейся из жидкой фазы при остывании
в режиме хранения**

Климатическая зона эксплуатации	Город	Количество свободной воды в резервуаре в режиме хранения в расчете на одну заправку, кг					
		марка сжиженного углеводородного газа					
		пропан-бутан технический			бутан технический		
		объем резервуара, м³					
		1,0	3,0	5,0	1,0	3,0	5,0
Умеренно-теплая	Краснодар/ Сочи	1,19	3,55	5,93	0,98	2,92	4,87
Умеренно-холодная	Воронеж	1,25	3,68	6,14	1,01	2,99	4,98
Холодная	Иркутск	1,36	4,01	6,7	1,1	3,25	5,42

Анализ таблицы 2 показывает, что при понижении температуры сжиженного газа в резервуарах происходит выпадение влаги из жидкой фазы в виде свободной воды. Принимая во внимание, что пропан является более влагоемким компонентом газа, количество свободной воды при использовании марки газа «пропан-бутан технический» выделяется в большем количестве, чем при использовании марки газа «бутан технический». Так как, грунт в районе днища резервуара во всех климатических зонах имеет положительную температуру в диапазоне от плюс 0,5 °С до плюс 7 °С, вода будет находиться в жидком состоянии. Таким образом, в подземном резервуаре при хранении газа происходит выделение воды из смеси и ее скопление в свободном виде в нижней части емкости.

Минимальный уровень заполнения резервуара газом при наличии газопотребления для обеспечения условия (6) определяется содержанием компонентов пропана и бутана в смеси СУГ в соответствии с выражениями (4–5) с учетом формируемого давления в емкости определяемого по выражению (3) по правилу аддитивности для компонентов смеси СУГ.

Определение необходимого минимального уровня заполнения резервуара жидкой фазой газа при его эксплуатации в режиме естественной регазификации проводилось с учетом наихудших условий по обеспечению избыточного давления в сосуде с ориентацией на бутан.

Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3

Расчет минимального уровня заполнения резервуаров газом

Направление использования газа в жилых зданиях		Минимальное заполнение резервуара газом, %, при объеме V_p , м ³		
		1,0	3,0	5,0
умеренно-теплая климатическая зона эксплуатации				
Пищеприготовление		19	15	15
Пищеприготовление, горячее водоснабжение и отопление (площадь здания, м ²)	64	89	33	19
	100	–	42	24,5
	256	–	73	42,5
умеренно-холодная климатическая зона эксплуатации				
Пищеприготовление		21	15	15
Пищеприготовление, горячее водоснабжение и отопление (площадь здания, м ²)	64	–	47	27
	100	–	58	33,5
	256	–	–	58
холодная климатическая зона эксплуатации				
Пищеприготовление		29	15	15
Пищеприготовление, горячее водоснабжение и отопление (площадь здания, м ²)	64	–	79	45,5
	100	–	–	56
	256	–	–	–

Примечание: знак «-» означает, что при данных условиях естественная регазификация невозможна, т.е. в резервуаре формируется вакуум.

Как видно из таблицы 3 при использовании газа на все коммунально-бытовые нужды целесообразно применение резервуара не менее 5,0 м³. Применение резервуаров меньшего объема обеспечит расчетный уровень газопотребления только при наличии значительного остаточного уровня заполнения до 79 % в холодной климатической зоне эксплуатации, что является не целесообразным с экономической точки зрения. При использовании газа на цели пищеприготовления в любой климатической зоне эксплуатации возможно использование резервуаров от 1,0 м³ и более.

В целом системы газоснабжения на бутане требуют значительного минимального уровня заполнения резервуаров газом, что обеспечивает высокую эксплуатационную стоимость указанных систем.

Таким образом, для обеспечения испарения бутана и снижения минимального уровня заполнения резервуара рекомендуется применять комбинированную схему регазификации газа, включая искусственное испарение жидкой фазы, с максимальным использованием естественной испарительной способности самих расходных резервуаров [26, 27].

В соответствии с выражением (7), с учетом данных таблицы 3, было определено количество заправок резервуаров в годовом цикле эксплуатации с учетом климата местности и направления использования газа на коммунально-бытовые

нужды в зданиях. Результаты представлены в таблице 4.

Как показал анализ таблиц 3 и 4, высокие значения минимального уровня заполнения приводят к увеличению количества заправок резервуаров в год. Данное обстоятельство обуславливает увеличение количества свободной воды в подземных резервуарах. В соответствии с ГОСТ 20488, объемная доля жидкого остатка при использовании марки «пропан-бутан технический» не должна превышать 1,6 % по объему, при использовании марки «бутан технический» 1,8 %. В пересчете на жидкий остаток в резервуаре объемом 3,0 м³ должно быть не более 23,3 кг при использовании марки «пропан-бутан технический» и 26,2 кг при использовании марки газа «бутан технический». Для резервуаров объемом 5,0 м³ соответственно 38,9 кг и 43,8 кг жидкого остатка. Как видно из таблицы 4, потребление газа на все коммунально-бытовые нужды с применением подземных резервуаров объемом 3,0 м³ является нецелесообразным в силу большого количества заправок СУГ в течение года и накоплению влаги в резервуарах в количестве, превышающем требования ГОСТ, в умеренно-теплой климатической зоне при газификации жилых домов площадью от 256 м², в умеренно-холодной зоне с площадью домов от 100 м², в холодной климатической зоне при использовании газа на нужды отопления и горячего водоснабжения при любой площади жилого дома.

Таблица 4

**Годовое количество заправок резервуара и накопление воды в резервуарах
в годовом цикле эксплуатации**

Направление использования газа в жилых зданиях	Количество заправок резервуара в год, раз			Количество свободной воды, кг		
	объем резервуара, V _р , м ³					
	1,0	3,0	5,0	1,0	3,0	5,0
Умеренно-теплая климатическая зона эксплуатации						
Пищеприготовление	0,62	0,56	0,55	1,2/1,0	3,6/2,9	5,9/4,9
Пищеприготовление, горячее водоснабжение и отопление (площадь здания 64 м ²)	—	2,04	0,81	—	7,1/5,8	5,9/4,9
100 м ²	—	2,96	1,08	—	10,7/8,8	5,9/4,9
256 м ²	—	14,4	2,48	—	49,7/40,9	11,9/9,7
Умеренно-холодная климатическая зона эксплуатации						
Пищеприготовление	0,64	0,55	0,55	1,25/1,01	3,7/3,0	6,1/5,0
Пищеприготовление, горячее водоснабжение и отопление (площадь здания 64 м ²)	—	4,26	1,44	—	14,7/12	6,1/5,0
100 м ²	—	7,06	1,97	—	25,8/20,9	12,3/10
256 м ²	—	—	5,80	—	—	36,8/30
Холодная климатическая зона эксплуатации						
Пищеприготовление	0,73	0,55	0,55	1,4/1,1	4,0/3,3	6,7/5,4
Пищеприготовление, горячее водоснабжение и отопление (площадь здания 64 м ²)	—	23,9	2,75	—	96,2/78	20,1/16,3
100 м ²	—	—	4,42	—	—	26,8/21,4
256 м ²	—	—	—	—	—	—

Примечание: в числителе количество свободной воды в резервуаре при использовании газа марки «пропан-бутан технический», в знаменателе при использовании марки газа «бутан технический».

Увеличение площади жилого здания также приводит к увеличению количества заправок и к увеличению количества свободной воды в резервуарах СУГ любого объема. В то же время применение резервуаров объемом 5 м³ для газоснабжения потребителей обеспечивает накопление свободной воды в регламентируемых ГОСТ значениях, возможно во всех климатических зонах, при любой площади жилого здания при использовании газа на все коммунально-бытовые нужды.

Выводы.

1. В результате проведенных исследований определено количество растворенной влаги в жидкой и паровой фазе марок сжиженного углеводородного газа с повышенным содержанием бутана, рассчитано количество свободной воды в резервуаре СУГ в режиме хранения на одну заправку сжиженным углеводородным газом.

2. Определен минимальный уровень заполнения резервуаров сжиженным газом для обеспечения естественной регазификации продукта при различном газопотреблении жилыми зданиями в зависимости от климатической зоны эксплуата-

ции и направления использования газа на коммунально-бытовые нужды при использовании газа с повышенным содержанием бутана.

3. Определено количество заправок сжиженным газом резервуаров СУГ и суммарное накопление воды в свободном виде в годовом цикле эксплуатации. Установлено, что при использовании на все коммунально-бытовые нужды сжиженных углеводородных газов с повышенным содержанием бутана рекомендуется применение резервуаров объемом от 5,0 м³, при использовании газа только на цели пищеприготовления возможно использование резервуаров объемом от 1,0 м³.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shahnazar S., Hasan N. Gas hydrate formation condition // Review on experimental and modeling approaches. Advanced Simulation Laboratory, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia. 2014. Vol. 379. Pp. 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2014.07.012>
2. Todd W., Drennan P.E. Protect Tanks from Overpressure and Vacuum // Baker Engineering and

Risk Consultants. American Institute of Chemical Engineers (AIChE). CEP: December 2019, Pp. 24–30

3. Uchida T., Miyoshi H., Sugibuchi R., Suzuta A., Yamazaki K., Gohara K. Contribution of Ultra-Fine Bubbles to Promoting Effect on Propane Hydrate // Formation. 2020. Vol. 81. Article 480. pp. 1-10

4. Fazlali A., Ghalekhondabi V., Ranjbaran T. Prediction of liquid propane hydrate formation conditions in the presence of light hydrocarbons (C2-C5) // Experimental investigation and thermodynamic modeling, Fluid Phase Equilibria 2021. Vol. 529. Pp. 1–11

5. Carroll J. Natural gas hydrates. Technopress. Moscow. 2007. 290 p.

6. Капыш В.В., Кулемин Н.В., Истомин В.А. Предупреждение гидратообразования в газопроводах-отводах и на газораспределительных станциях // Вести газовой науки: науч.-технич. сб. 2013. № 4 (15). С. 125–131.

7. Adeniyi K.I., Deering C.E., Marriott R.A. Hydrate Decomposition Conditions for Liquid Water and Propane // J. Chem. Eng. 2017. Vol. 62 (7). Pp. 2222–2229.

<https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b00343>

8. Курицын Б.Н., Осипова Н.Н., Максимов С.А. Разработка и обоснование технических решений по предупреждению гидратообразования в системах резервуарного снабжения сжиженным газом // Приволжский научный журнал. 2013. №1 (25). С.73–80.

9. Стандарт организации. Предупреждение образования ледяных и гидратных пробок в системах резервуарного снабжения сжиженным газом: СТО 03321549-021-2012 / Б.Н. Курицын и др. Саратов: ОАО Росгазификация, ОАО Гипронгаз. 2012. 19 с.

10. Бычкова И.М. Предложения по устранению источников поступления и накопления влаги в резервуарах сжиженных углеводородных газов // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2020. №4(43). С. 283–287.

11. Осипова Н.Н., Бычкова И.М. Обоснование применения подземной камеры редуцирования в системах снабжения сжиженным углеводородным газом // Научный журнал строительства и архитектуры. 2021. № 1 (61). С. 28–39. doi: 10.36622/VSTU.2021.61.1.003.

12. Adeniyi K.I., Deering C.E., Grynja E., Marriott R.A. Water content and hydrate dissociation conditions for carbon dioxide rich fluid // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2020. Vol. 101. Pp. 1–11

13. Усачев А.П., Шурайц А.Л., Феоктистов А.А. Системный анализ возникновения источни-

ков свободной воды и ее накопления в подземных резервуарных установках сжиженного углеводородного газа // Нефтегазовое дело. Уфа. 2009. Т.7. №1. С. 98–101.

14. Курицын Б.Н., Осипова Н.Н., Максимов С.А. Моделирование теплообмена при хранении сжиженного газа в подземных резервуарных установках под воздействием естественных температур грунта и наружного воздуха // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. Строительство и архитектура. 2012. Вып.2 (26). С. 35–46.

15. Osipova N., Kuznetsov S., Kultyaev S. Development of gas supply systems using butane-based gas-and-air mixtures // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. EMMFT 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol 1259. Pp 247–257. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_21

16. Бычкова И.М., Поберий А.А. К определению коэффициента теплопередачи при теплообмене горловины подземного резервуара с окружающим грунтовым массивом // Ресурсо-энергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2018. № 9. С. 282–288.

17. Усачев А.П., Рулев А.В., Усачев М.А. Разработка математической модели теплообмена в подземных вертикальных резервуарах-испарителях при одновременном использовании искусственных теплоносителей и естественной теплоты окружающего грунта // Промышленная энергетика. 2016. №1. С. 28–33.

18. Бахмат Г.В., Кислицын А.А., Шастунова У. Ю. Методика расчета теплового режима резервуара типа РВС в зимнее время во время эксплуатации // Материалы Международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной 20-летию создания ООО НПО «Фундаментстрой-аркос». Тюмень: Сити-Пресс. 2011. С. 301–306.

19. Шастунова У.Ю., Дмитриевская Д.А. Физико-математическое моделирование теплового режима резервуара в зимнее время // Материалы IX Школы-семинара молодых ученых «Теплофизика, теплотехника, гидрогазодинамика. Инновационные технологии». Тюмень. 2016. С. 236–242.

20. Курицын Б.Н., Кузнецов С.С. Исследование тепломассообмена в подземных резервуарах сжиженного газа // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2012. № 2. С. 112–115.

21. Стаскевич Н.Л., Вигдорчик Д.Я. Справочник по сжиженным углеводородным газам.

Л.: Недра. 1986. 543 с.

22. Культияев С.Г. Формирование условий для создания избыточного давления в подземной емкости технического бутана // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2020. №4 (43). С. 302–309.

23. Осипова Н.Н., Дьяченко К.В. Обоснование уровня заполнения подземных резервуаров техническим бутаном // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2019. №11. С. 473–476.

24. Osipova N.N., Grishin B.M., Kultyaev S.G. Mathematical Modeling of the Annual Consumption of Gas-Air Mixture on the Basis of Technical Butane for Household Needs of Individual Residential Buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753, No. 1. doi:10.1088/1757-899X/753/2/022015

Информация об авторах

Осипова Наталия Николаевна, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и нефтегазовое дело». E-mail: osnat75@mail.ru. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Россия, г. Саратов, улица Политехническая 77

Культияев Святослав Геннадиевич, ассистент кафедры «Теплогазоснабжение и нефтегазовое дело». E-mail: svyatoslav@kultyaev.ru. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Россия, г. Саратов, улица Политехническая 77

Поступила 05.04.2022 г.

© Осипова Н.Н., Культияев С.Г., 2022

**Osipova N.N., Kultyaev S.G.*

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**E-mail: osnat75@mail.ru*

ACCUMULATION OF FREE WATER IN GAS SUPPLY SYSTEMS WITH LIQUEFIED GAS WITH INCREASED BUTANE CONTENT

Abstract. The presence of free water adversely affects the operation of gas supply systems, causing corrosion of elements, the formation of vapor locks in pipelines, ice and hydrate locks at low temperatures, especially when using liquefied hydrocarbon gases with a high content of butanes. The quantitative characteristics of the operation of gas supply systems based on underground tanks when using gas with a high butane content are determined using the main provisions of the thermodynamic equilibrium of the vapor and liquid phases in the reservoir, the conditions for ensuring the minimum overpressure of the vapor phase for natural regasification of the product, the conditions for supplying the required amount of gas to the consumer for all domestic needs during the cold season. In result, the amount of accumulated moisture in the gas storage mode and the operation of tanks is determined. The minimum level of filling the tanks with the liquid phase and the number of gas refills per year are substantiated, while providing various utility needs depending on the climatic zone of operation and the characteristics of the gas supplied facilities. It is proven, when using liquefied hydrocarbon gases with a high butane content, taking into account the accumulation of moisture in the annual cycle of operation, it is recommended to use tanks with a volume of 5.0 m³ or more when using gas for all household needs, tanks with a volume of 1.0 m³ or more when using gas only for the purpose of food preparation.

Key words: liquefied hydrocarbon gas, free water, accumulation, operation of gas supply systems, minimum level of filling of reservoirs with gas, number of refuelings per year.

REFERENCES

1. Shahnazar S., Hasan N. Gas hydrate formation condition: Review on experimental and modeling approaches. Advanced Simulation Laboratory, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia.

25. Buleiko V.M., Vovchuk G.A., Grigoryev B.A., Experimental investigation of the thermodynamic properties of hydrates of n-alkane hydrocarbons // Vesti gazovoy nauki: Actual problems of studies of hydro carbon field bedded systems. 2012. Vol. 3(11). Pp. 283–299.

26. Постарнак Д.А., Курицын Б.Н. Применение бутано-этановых смесей в системах баллонного газоснабжения // Математические методы в технике и технологиях. ММТТ. 2013. №13-1(59). С. 220–221.

27. Кузнецов С.С., Никонорова З.Н. Применение комбинированной регазификации для целей энергосбережения при снабжении потребителя сжиженным углеводородным газом // Урбанистика: опыт исследований, современные практики, стратегия развития городов. Саратов. 2017. С. 222–223.

2014. Vol. 379. Pp. 72–85. doi:10.1016/j.fluid.2014.07.012

2. Todd W., Drennan P.E. Protect Tanks from Overpressure and Vacuum Baker Engineering and Risk Consultants. American Institute of Chemical

Engineers (AIChE). 2019. <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2019/december/protect-tanks-overpressure-and-vacuum>

3. Uchida T, Miyoshi H, Sugibuchi R, Suzuta A, Yamazaki K and Gohara K. Contribution of Ultra-Fine Bubbles to Promoting Effect on Propane Hydrate Formation. 2020. *Front. Chem.* 8:480. doi: 10.3389/fchem.2020.00480

4. Fazlali A., Ghalekhondabi V., Ranjbaran T. Prediction of liquid propane hydrate formation conditions in the presence of light hydrocarbons (C2-C5). Experimental investigation and thermodynamic modeling, *Fluid Phase Equilibria*. 2021. Vol. 529. doi:10.1016/j.fluid.2020.112756

5. Carroll J. Natural gas hydrates. Technopress. Moscow. 2007. 290 p.

6. Kapysh V.V., Kulemin N.V., Istomin V.A. Prevention of hydrate formation in gas pipelines and gas distribution stations [Preduprezhdenie gidratoobrazovaniya v gazoprovodakh-otvodakh i na gazoraspredeletel'nykh stantsiyah]. *Vesti gazovoy nauki: nauch.-tekhnich. Sat.* 2013. No. 4 (15). Pp. 125–131. (rus)

7. Adeniyi K.I., Deering C.E., Marriott R.A. Hydrate Decomposition Conditions for Liquid Water and Propane J. *Chem. Eng.* 2017. Vol. 62 (7). Pp. 2222–2229. doi:10.1021/acs.jced.7b00343

8. Kuritsyn B.N., Osipova N.N., Maksimov S.A. Development and justification of technical solutions for the prevention of hydrate formation in systems of tank supply with liquefied gas [Razrabotka i obosnovanie tekhnicheskikh reshenij po preduprezhdeniyu gidratoobrazovaniya v sistemah rezervuarnogo snabzheniya szhizhennym gazom]. *Privolzhsky scientific journal*. 2013. No. 1 (25). Pp.73–80. (rus)

9. Standard of the organization. Prevention of the formation of ice and hydrate plugs in liquefied gas tank supply systems [Standart organizatsii. Preduprezhdenie obrazovaniya ledyanykh i gidratnykh probok v sistemah rezervuarnogo snabzheniya szhizhennym gazom]: STO 03321549-021-2012. B.N. Kuritsyn and others. Saratov: JSC Rosgazifikatsiya, JSC Giproniigaz, 2012. 19 p. (rus)

10. Bychkova I.M. Proposals to eliminate sources of moisture inflow and accumulation in reservoirs of liquefied hydrocarbon gases [Predlozheniya po ustraneniyu istochnikov postupleniya i nakopleniya vlagi v rezervuarakh szhizhennykh uglevodородnykh gazov]. Technical regulation in transport construction. 2020. No. 4(43). Pp. 283–287. (rus)

11. Osipova N.N., Bychkova I.M. Rationale for the use of an underground reduction chamber in liquefied hydrocarbon gas supply systems [Obosnovanie primeneniya podzemnoy kamery reduciro-

vaniya v sistemah snabzheniya szhizhennym uglevodородnym gazom]. *Scientific Journal of Construction and Architecture*. 2021. No. 1 (61). Pp. 28–39. doi: 10.36622/VSTU.2021.61.1.003. (rus)

12. Adeniyi K.I., Deering C.E., Grynia E, Marriott R.A. Water content and hydrate dissociation conditions for carbon dioxide rich fluid. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2020. Vol. 101. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103139>

13. Usachev A.P., Shurayts A.L., Feoktistov A.A. System Analysis of the Origin of Free Water Sources and its Accumulation in Underground Reservoir Installations of Liquefied Hydrocarbon Gas [Sistemnyy analiz vozniknoveniya istochnikov svobodnoy vody i ee nakopleniya v podzemnykh rezervuarnykh ustanovkakh szhizhennogo uglevodородного gaza]. *Oil and Gas Business*. Ufa. 2009. Vol. 7. No. 1. Pp. 98–101. (rus)

14. Kuritsyn B.N., Osipova N.N., Maksimov S.A. Modeling of heat transfer during storage of liquefied gas in underground reservoir installations under the influence of natural temperatures of soil and outdoor air [Modelirovanie teploobmena pri hranenii szhizhennogo gaza v podzemnykh rezervuarnykh ustanovkakh pod vozdeystviem estestvennykh temperatur grunta i naruzhnogo vozduha]. *Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Ser. construction and architecture*. 2012. Vol. 2 (26). Pp. 35–46. (rus)

15. Osipova N., Kuznetsov S., Kultyaev S. Development of gas supply systems using butane-based gas-and-air mixtures *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. EMMFT 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. Vol 1259. Pp 247–257. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_21

16. Bychkova I.M., Poberii A.A. On the determination of the heat transfer coefficient during heat exchange of the neck of an underground reservoir with the surrounding soil mass [K opredeleniyu koeffitsienta teploperedachi pri teploobmene gorlovinny podzemnogo rezervuara s okruzhayushchim gruntovym massivom]. *Resource and Energy Efficient Technologies in the Building Complex of the Region*. 2018. No. 9. Pp. 282–288. (rus)

17. Usachev A.P., Rulev A.V., Usachev M.A. Development of a mathematical model of heat transfer in underground vertical evaporator tanks with the simultaneous use of artificial heat carriers and the natural heat of the surrounding soil [Razrabotka matematicheskoy modeli teploobmena v podzemnykh vertikal'nykh rezervuarakh-isparitelyakh pri odnovremennom ispol'zovanii iskusstvennykh teplonositelej i estestvennoy teploty okruzhayushchego grunta]. *Industrial Energy*. 2016. No. 1. Pp. 28–33. (rus)

18. Bakhmat G.V., Kislitsyn A.A., Shastunova U.Yu. Methodology for calculating the thermal regime of a RVS tank in winter during operation [Metodika rascheta teplovogo rezhima rezervuara tipa RVS v zimnee vremya vo vremya ekspluatatsii]. NPO "Fundamentstroy-arkos". Tyumen: City-Press. 2011, Pp. 301–306. (rus)
19. Shastunova U.Yu., Dmitrievskaya D.A. Physical and mathematical modeling of the reservoir thermal regime in winter [Fiziko-matematicheskoe modelirovanie teplovogo rezhima rezervuara v zimnee vremya]. Proceedings of the IX School-seminar of young scientists "Thermal physics, heat engineering, hydrogas dynamics. Innovative technologies". Tyumen. 2016, Pp. 236–242. (rus)
20. Kuritsyn B.N., Kuznetsov S.S. Study of heat and mass transfer in underground liquefied gas tanks [Issledovanie teplomassoobmena v podzemnykh rezervuarakh szhizhennogo gaza]. Resource and energy efficient technologies in the construction complex of the region. 2012. No. 2. Pp. 112–115. (rus)
21. Staskevich N.L., Vigdorchik D.Ya. Handbook of Liquefied Petroleum Gases [Spravochnik po szhizhennym uglevodorodnym gazam]. L.: Nedra. 1986. 543 p. (rus)
22. Kulyaev S.G. Formation of conditions for creating excess pressure in the underground tank of technical butane [Formirovanie uslovij dlya sozdaniya izbytochnogo davleniya v podzemnoj emkosti tekhnicheskogo butana]. Technical regulation in transport construction. 2020. No. 4 (43). Pp. 302–309. (rus)
23. Osipova N.N., Dyachenko K.V. Substantiation of the filling level of underground reservoirs with technical butane [Obosnovanie urovnya zapolneniya podzemnykh rezervuarov tekhnicheskim butanom]. Resource and energy efficient technologies in the construction complex of the region. 2019. No. 11. Pp. 473–476. (rus)
24. Osipova N.N., Grishin B.M., Kulyaev S.G. Mathematical Modeling of the Annual Consumption of Gas-Air Mixture on the Basis of Technical Butane for Household Needs of Individual Residential Buildings. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. No. 1. doi:10.1088/1757-899X/753/2/022015
25. Buleiko V.M., Vovchuk G.A., Grigoryev B.A., Experimental investigation of the thermodynamic properties of hydrates of n-alkane hydrocarbons. Vesti gazovoy nauki: Actual problems of studies of hydrocarbon field bedded systems. 2012. Vol. 3 (11). Pp. 283–299.
26. Postarnak D.A., Kuritsyn B.N. Application of butane-ethane mixtures in balloon gas supply systems [Primenenie butano-etanovykh smesey v sistemakh ballonnogo gazosnabzheniya]. Mathematical methods in engineering and technology. MMTT. 2013. No. 13-1 (59). Pp. 220–221. (rus)
27. Kuznetsov S.S., Nikonorova Z.N. The use of combined regasification for energy saving purposes when supplying a consumer with liquefied hydrocarbon gas [Primenenie kombinirovannoy regazifikatsii dlya celej energosberezheniya pri snabzhenii potrebitelya szhizhennym uglevodorodnym gazom]. Urban studies: research experience, modern practices, urban development strategy. Saratov, 2017. Pp. 222–223. (rus)

Information about the authors

Osipova, Nataliya N. DSc, Assistant professor. E-mail: osnat75@mail.ru. Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, 410054, Saratov, st. Politechnicheskaya, 77.

Kulyaev, Svyatoslav G. Senior lecturer. E-mail: svyatoslav@kulyaev.ru. Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, 410054, Saratov, st. Politechnicheskaya, 77.

Received 05.04.2022

Для цитирования:

Осипова Н.Н., Культяев С.Г. Накопление свободной воды в системах газоснабжения сжиженным газом с повышенным содержанием бутана // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 8. С. 50–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-50–59

For citation:

Osipova N.N., Kulyaev S.G. Accumulation of free water in gas supply systems with liquefied gas with increased butane content. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 8. Pp. 50–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-50–59

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-60-70

Митякина Н.А., *Старченко К.М., Доценко В.А., Вишнякова А.А., Дворяшина М.С.*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: konstantin.starchenko.99@mail.ru*

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ УЧЕБНОЙ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СТУДЕНТОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОБЩЕСТВЕННОГО КОВОРКИНГОВОГО ПРОСТРАНСТВА НА ТЕРРИТОРИИ КАМПУСА ВУЗА

Аннотация. В статье проведен анализ социальной востребованности создания коворкинг-пространства на территории университетского кампуса, удовлетворяющего современным требованиям открытости и интеграции с городской средой. Предложено проектное решение локального объекта общественного пространства кампуса БГТУ им. В.Г. Шухова, способного обеспечить условия как для обучения, так и для социальных взаимодействий, привлечения и вовлечения не только студентов и сотрудников университета, но и потенциальных абитуриентов, а также жителей близлежащих районов города. Симбиоз этих процессов ведет к повышению общественного имиджа университета, и, как следствие, формированию нового городского центра притяжения. Представлены некоторые инструменты реализации командной проектной деятельности магистрантов кафедры «Архитектурные конструкции» в рамках дисциплины «Проектное обучение». Построена бизнес-модель отражающая связи между участниками рынка для реализации идеи, и возможные перспективы развития на базе сотрудничества с потенциальными партнерами. Описаны особенности внешнего облика пространства, продиктованные окружающей архитектурой средой. Четкие прямоугольные формы повторяют пилоны основных корпусов БГТУ им. В.Г. Шухова. В качестве основного арт-объекта созданы символические латинские буквы «BSTU» (Belgorod State Technological University), выполняющие не только ограждающую функцию, но и создающие дополнительные посадочные места.

Ключевые слова: университетский кампус, общественное пространство, коворкинг-пространство, плейсмейкинг, open-air зона, архитектурно-конструктивные элементы, проектное обучение, командная деятельность, дерево работ

Введение. Создание сети университетских кампусов, удовлетворяющих современным требованиям открытости и интеграции с городской инфраструктурой, является сегодня одной из глобальных задач российской высшей школы. Для ее реализации необходимы не только инициативные действия вузов, но и вовлечение большого количества других заинтересованных сторон, таких как федеральные, региональные и муниципальные органы власти, а также некоммерческие организации, способные участвовать в софинансировании проектов [1].

К ключевым факторам, характеризующим эффективное общественное пространство относятся [2]: доступность и связанность; комфорт и облик места; многофункциональность; ощущение безопасности и дружелюбности. Для того чтобы создать проект общественного коворкинг-пространства, которое может стать точкой формирования и развития студенческого кампуса, наиболее подходящей является ориентация на применение метода плейсмейкинга – создания общественного пространства с активным включением в процесс разработки и реализации проекта всех заинтересованных сторон, будущих пользователей пространства, активных жителей города, где главный акцент делается на процесс создания, на действие.

Материалы и методы. Основными методами проведенного анализа результатов организации реальной проектной деятельности студентов является оценка социальной востребованности подобных разработок и изучение ключевых факторов, характеризующих эффективное общественное пространство. Объект исследования – общественное коворкинг-пространство на территории кампуса вуза. Цель анализа – выявление инструментов реализации командной проектной деятельности студентов, нацеленной на создание комфортной кампусной среды, отвечающей запросам современного студенческого сообщества. Основные задачи – разработка основных организационных подходов вовлечения студентов в реальную деятельность по улучшению городских общественных пространств и формирование профессиональных представлений об этапах архитектурно-конструктивного воплощения проектной идеи социальной направленности.

Территория кампуса БГТУ им. В.Г. Шухова является уникальной и значимой в структуре города Белгорода в и, в особенности, на территории района Харьковской горы. Занимающий площадь 35 га, густо озелененный студенческий городок с обширной сетью пешеходных дорожек объективно имеет высокую популярность не только у студентов и сотрудников вуза, но и у горожан. В настоящее время жители близлежащих

жилых домов выбирают для прогулок в свободное время именно студенческий кампус, защищенный от городского шума и суеты. Здесь детские площадки, а также различные арт-объекты редко остаются без посетителей на протяжении всего дня. Вечером в студенческом городке наибольшее количество посетителей и разные категории граждан находят себе занятия по интересам: пешие прогулки по территории с прекрасным видом на город; велосипедные прогулки по выделенной полосе движения; финская ходьба; фитнес на открытом воздухе; воркаут на специально оборудованных площадках и др. К гостям кампуса можно отнести различные группы населения, он интересен не только взрослым людям, но и детям разных возрастов.

Однако потенциал развития и совершенствования кампусного пространства не исчерпал себя. Ведущий технический вуз Белгородской области может и должен стать еще более доступной общественной зоной для горожан, привлекающей внимание, связывающей поколения и наглядно рекламирующей БГТУ им. В.Г. Шухова для потенциальных абитуриентов.

Магистрантами кафедры «Архитектурные конструкции» в рамках факультативной дисциплины «Проектное обучение» [3] было разработано несколько вариантов проектных решений локальных объектов доступного общественного пространства кампуса БГТУ им. В.Г. Шухова, легко функционирующих в непосредственной близости, а зачастую и дополняющих друг друга. В результате командной работы над проектом были предложены инструменты создания коворкинг-пространства, способного обеспечить условия как для обучения, так и для социальных взаимодействий, привлечения и вовлечения не только студентов и сотрудников университета, но и потенциальных абитуриентов, а также жителей близлежащих районов города. Ключевой целью каждого из проектов является одновременно как сохранение существующих уникальных качеств территории, так и реновация проблемных участков. Один из проектов, "УНИВЕРСАЛЬНАЯ OPEN-AIR ЗОНА НА ТЕРРИТОРИИ КАМПУСА БГТУ ИМ. В.Г. ШУХОВА", более подробно представлен в данной статье.

Функционирование команды проекта с самого старта велось на основе опыта внедрения проектного обучения и менторства (наставничества) над проектами в российскую систему образования [3]. Для обеспечения эффективной деятельности в команде были распределены роли, зоны ответственности и планируемая активность между ее участниками в виде дерева работ, которое отражает основную функциональную ответ-

ственность исполнителей: генпланист, архитектор, визуализатор, он же графический дизайнер и координатор (рис. 1), а также определены компетенции наставника в зависимости от специфики его профессиональной и педагогической подготовки. Организованное на этом этапе взаимодействия с куратором, тьютором, экспертами и потенциальными стейкхолдерами призвано подготовить студентов к возможным предстоящим проблемам, чтобы изменения, вносимые в проект в ходе реализации, не сломили первоначальный оптимизм, а все проектные решения были обоснованы в процессе защиты работы.

Для разработки проекта были сформулированы основные цели (табл. 1). Кроме социальной составляющей, влияющей непосредственно на пользователей площадки, где в бесплатном обращении доступны лекториумы и выставки, организованы коворкинг-зона, зона для работы с источниками питания электрической энергии и буккроссинг, запроектированное общественное пространство имеет и коммерческий потенциал – через взимание арендной платы за проведение вебинаров, семинаров и мастер-классов, показ кинофильмов, а также продажи продуктов питания через вендинговые автоматы (табл. 2).

Рынок во многом зависит от тех, кто заинтересован в использовании и покупке услуг и товаров, предлагаемых в зоне действия площадки, поэтому важным элементом является учет интересов представителей целевой аудитории проекта (рис. 2).

Построенная бизнес-модель отражает связи между участниками рынка для реализации идеи, и возможные перспективы развития на базе сотрудничества с потенциальными партнерами, которые могут выступать не только как стейкхолдеры, но и как пользователи площадки (рис. 3).

Первый этап разработки проектной идеи началась с выбора места расположения площадки для общественного пространства на территории кампуса. Важнейшим условием здесь является доступность объекта по отношению к учебным корпусам, чтобы пользователи могли добираться до участка пешим ходом не более, чем за 3–5 минут (рис. 4).

Кроме того, участок для проектирования выбран с учетом наименьшего воздействия на существующее благоустройство территории без дополнительной вырубке зеленых насаждений (рис. 5). Удобный подъезд для ограниченного круга лиц, а также обширная существующая сеть пешеходных дорожек обеспечивают беспрепятственный доступ к объекту с любой точки кампуса, а также от главного въезда на территорию университета.



Рис. 1. Распределение функциональных зон ответственности среди участников команды (дерево работ)

Таблица 1

Цели и результаты проекта

3.1 Основание для инициации проекта	Общественное пространство студенческого кампуса обеспечивает контекст как для обучения, так и для социальных взаимодействий, привлечения и вовлечения не только студентов и сотрудников университета, но и потенциальных абитуриентов, а также жителей близлежащих районов города. Наличие доступного, комфортного и привлекательного кампусного пространства способствует созданию общегородской социально-культурной среды, где непрерывно происходит образовательный, экономический, межнационального обмен и, как следствие, повышению общественного имиджа Университета
3.2 Цели проекта	плейсмейкинг архитектурно-пространственной среды общественного кампусного пространства; обеспечение условий для единовременного пребывания на выбранной локации не менее 130 пользователей из числа целевой аудитории; использование современных инновационных аналогов и информационного моделирования; привлечение ресурсного потенциала кампусного пространства для достижения общественной эффективности; обеспечение периода начала эксплуатации объекта не более 14 дней после реализации разработанных проектных решений.
3.3 Способы достижения целей:	Разработка эскизного проекта универсальной площадки для работы и отдыха студентов, сотрудников ВУЗа, жителей города
3.4 Результаты проекта:	Экспозиция эскизного проекта
3.5 Период реализации проекта	май – сентябрь 2022 г.
3.6 Пользователи результата проекта:	Абитуриенты, студенты, сотрудники вуза, организаторы и участники вебинаров, мастер-классов, различные социальные группы населения города.
3.7 Внешние участники проекта (партнеры):	Привлеченные инвесторы
3.8 Рынки сбыта:	Белгородские образовательные и отраслевые профессиональные сообщества

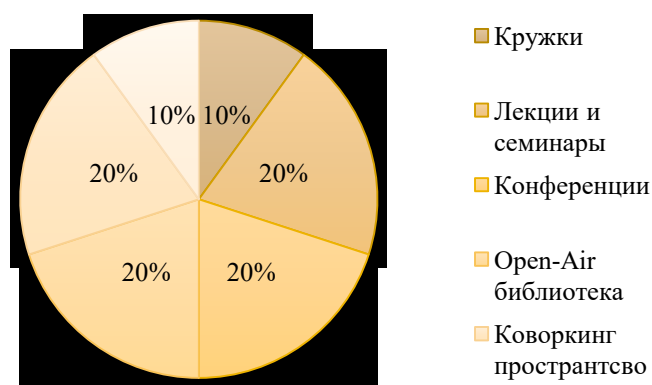
Таблица 2

План активации

	Партнеры и организации-соисполнители	Коммерческий потенциал	Период функционирования
Событийная программа и мероприятия			
Лекториумы	Сотрудники и студенты БГТУ	Бесплатно	В теплый период года
Выставки	Местные культурные организации	Бесплатно	
Вебинары	Представители различных отраслей деятельности	10000–15000	
Показ кинофильмов	Организации, обладающие соответствующей лицензией	Бесплатно/ 10000–15000	
Семинары, мастер-классы	Эксперты в определенных практических движениях	10000–15000	
Коворкинг-зона	Коммерческие и некоммерческие организации, органы местного самоуправления, объединенный совет обучающихся БГТУ	Бесплатно	
Зона для работы с источникам питания электрической энергии		Бесплатно	
Буккроссинг (обмен книгами)	Локальные библиотеки	Бесплатно	
Продажа продуктов питания через вендинговые автоматы		15000/мес. с одного автомата	



а)



б)

Рис. 2. Рыночные отношения представителей целевой аудитории в процентном отношении среди:
а) потребителей; б) проводимых мероприятий



Рис. 3. Взаимодействие автора, инвестора, производителя и заказчика



Рис. 4. Общий вид на территорию кампуса, иллюстрирующий минимальную отдаленность проектируемого объекта от учебных корпусов БГТУ им. В.Г. Шухова



Рис. 5. Фотосъемка с места предполагаемой площадки для размещения объекта



а)

б)



в)

г)



д)

е)

Рис. 6. Видовые кадры основных функциональных участков OPEN-AIR зоны:

- а) презентационная зона с зрительскими местами; б) транзитная зона; в) общая зона коворкинга;
г) компьютерный клуб; д) внешняя граница площадки с вертикальным озеленением;
е) фотозона с ночной подсветкой

Рельеф выбранного участка имеет уклон на восток. Общий перепад высот, составляющий около 1 м, был учтен при разработке доступности объекта для всех социальных групп населения, а также при выполнении отвода ливневых вод с участка. В презентационной зоне предусмотрен пандус, имеющий уклон 1:20.

На этапе создания концепции OPEN-AIR были учтены потребности имеющих в университете потенциальных пользователей, прежде всего для осуществления командного взаимодействия, и выделены следующие функциональные зоны (рис. 6):

– многопрофильное пространство, предназначенное для проведения мастер-классов, демонстраций фильмов, онлайн-лекториумов, презентаций продукции и услуг, тренингов, лекций, фестивалей, состоящее из зрительских мест в виде трибун на 80 посадочных мест и презентационного сектора – выделенной из общего объема площадки, оборудованной проектором, столом и скамьей, где роль экрана выполняет наружная ограждающая стена, окрашенная в белый цвет;

– транзитная зона, к которой относится лестница и пандус, необходимые для перемещения между разноуровневыми зонами летней площадки;

– общее коворкинговое пространство, предназначенное для общения, чтения книг, настольных игр, работы и отдыха, с местами для группового обсуждения, оборудованное нестандартными скамьями для сидения (20 посадочных мест) и столом, полками для книг и журналов;

– компьютерный клуб, вместимостью 48 мест с возможностью работы в командах на портативных устройствах, оборудованный скамьями, столами, розетками, сетью Wi-Fi с доступом в интернет, освещением.

Внешний облик OPEN-AIR пространства продиктован окружающей архитектурой средой. Четкие прямоугольные формы повторяют пилоны основных корпусов БГТУ им. В.Г. Шухова. В качестве основного арт-объекта созданы символические латинские буквы «BSTU» (Belgorod State Technological University), выполняющие не только ограждающую функцию, но и создающие дополнительные посадочные места. Надпись просматривается с центральной пешеходной дороги, ведущей от главного въезда на территорию университета к центральной площади, что позволяет привлечь внимание к объекту, а также устроить тематическую фотозону. Деревянная отделка теневого навеса, дополненная точечным и вертикальным озеленением, создаёт тесную взаимосвязь проектируемого объекта с окружающей средой. Главный посыл летней площадки – возможность групповой работы и обучения на открытом воздухе, воплощен в полном объеме.

Для того, чтобы отгородить объект от существующей парковочной зоны была выполнена декоративная стена, имеющая проем в зоне зрительских мест для удобной выгрузки необходимого оборудования на сцену.

В целом проектируемый объект имеет прямоугольную форму в плане. Габаритные размеры в осях 27,5×10,5 м. Наибольшая высота объекта – 5,7 м (в зоне расположения зрительских мест).

Важным этапом при реализации функции объекта является грамотный подбор материалов для архитектурно-конструктивных элементов. Так платформа представляет собой настил из OSB-плит, по которому устроена гидроизоляция с последующей укладкой деревянных щитов. Стены и кровля выполнены из семи- и трехслойных CLT-плит соответственно. Клей, использованный в массиве плит, не содержит формальдегидов и растворителей, не токсичен и не имеет

запаха, поэтому безопасен для здоровья находящихся на площадке людей.

Выводы. Основные положения и архитектурно-конструктивные разработки описываемого проекта были представлены профессиональному сообществу преподавателей кафедры «Архитектурные конструкции» БГТУ им. В.Г. Шухова и получили одобрение. Проект стал победителем внутривузовского конкурса «Кубок молодых инноваторов» в номинации "Социальные проекты", а также вошёл в тройку лидеров всероссийского конкурса «Идеальный клворкинг» на федеральной платформе «Россия – страна возможностей». Учитывая объективную актуальность и определённое успешное продвижение проекта, явившегося результатом проведённых исследований, допустимо сделать следующие заключения.

1. Организация проектной деятельности студентов в формате профессионального командного взаимодействия с оптимальным распределением ролей и ответственности дала возможность создать конкурентоспособный продукт, отвечающий социальной востребованности, повышающий общественный имидж университета и, как следствие, формирующий на территории кампуса БГТУ им. В.Г. Шухова новый городской центр притяжения.

2. Профессиональные компетенции, сформированные у студентов, позволили эффективно и рационально организовать процесс доведения проектной идеи плейсмейкинга пространственной среды общественного кампусного пространства до уровня графической проработки архитектурно-конструктивных решений в форме эскизного проекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Университетские кампусы и город: кооперация ради конкурентоспособности // Центр стратегических разработок. 2021. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <https://www.csr.ru/upload/iblock/3f0/kbpm276p3tau6knldla3d6ozz0fve0e.pdf> (дата обращения: 30.01.2022).

2. Токарев И., Павлова В., Иванов Д., Смей В. Руководство по созданию общественных пространств университетов. Агентство стратегических инициатив. М.: Центр городских компетенций АСИ, 2019. 40 с.

3. Евстратова Л.А., Исаева Н.В., Лешуков О.В. Проектное обучение: практики внедрения в университетах. М.: Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", 2018. 152 с. doi: 10.17323/978-5-7598-1916-5.

4. Баранов А.В. Котлярова О.В. Практические исследования креативных городских пространств: региональный аспект // Вестник экспертного совета. 2020. №2–3 (21–22). С. 3–10.

5. Васильев А.С., Дубей О.Я. Особенности сбора исходных данных при подготовке проекта общественного пространства на основе современных концепций умного города // Вестник ПГУ им. Шолом-Алейхема. 2020. №4 (41). С. 20–28. doi:10.24412/2227-1384-2020-4-20-28.

6. Дмитрийчук Н.М., Денисова Ю.В. Проектирование городских парковых комплексов // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2019. №6. С. 70–77. doi: 10.34031/article_5d07a0f2693984.29257494.

7. Казун А.П., Пастухова Л.С. Практики применения проектного метода обучения: опыт разных стран // Образование и наука. 2018. №2. С. 32–59. doi: 10.17853/1994-5639-2018-2-32-59.

8. Коршунов Г.В., Ведерникова И.О., Дубиковский С.Ю. Университет в среде небольшого города: флюиды кампусного уклада // Высшее образование в России. 2019. Т. 28. №2. С. 134–143. doi:10.31992/0869-3617-2019-28-2-134-143.

9. Кочеткова Т.В., Алейникова Н. В. Комфортность городской среды // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 66–72. doi: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-66-72.

10. Кружки 2.0. Научно-технические кружки в экосистеме практик будущего. Инструкция по сборке. 2018. 17 с.

11. Ласточкина О.С. Плейсмейкинг – подход для развития общественных пространств современных городов (обзор зарубежного и российского опыта) // Society and Security Insights. 2021. Т. 4. № 2. С. 89–105. doi:10.14258/ssi(2021)2-07.

12. Лукашевич О.Д., Орешникова А.Д., Горлова К.В. Плейсмейкинг как средство создания комфортной городской среды // Проблемы экономики и управления строительством в условиях экологически ориентированного развития: Материалы VIII ON-LINE международной научно-практической конференции. ТГАСУ. 2021. С. 247–257.

13. План мероприятий "Дорожная карта" "Кружковое движение" Национальной техно-

логической инициативы // Правительство Российской Федерации. 2017. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <http://static.government.ru/media/files/4UnfuTWKc5LejBS49BAmAoXRE6WJ6qNs.pdf> (дата обращения: 30.01.2022)

14. Рекомендации по организации общественного участия в реализации проектов комплексного благоустройства городской среды // Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. 2017. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/ad6/prezentatsiya-rekomendatsii-po-organizatsii-obshchestvennogo-uchastiya-v-realizatsii-proektov-kompleksnogo-blagoustroystva-sredy.pdf> (дата обращения: 30.01.2022)

15. Сакова В.А., Дворяшина М.С., Старченко К.М. Разработка и анализ рекреационного пространства кампуса университета // Образование. Наука. Производство: XIII Международный молодежный форум БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. С. 483–490.

16. Смирнов С.А. Город-кампус, или образовательное пространство города. Методологический конструкт // Высшее образование в России. 2019. №4. С. 44–59. doi: 10.31992/0869-3617-2019-28-4-44-59.

17. Стандарт комплексного развития территорий. Каталог элементов и узлов открытых пространств. М.: Дом.РФ, КБ Стрелка, 2019.

18. Трищенко Д.А. Опыт проектного обучения: попытка объективного анализа достижений и проблем // Образование и наука. 2018. №4. С. 132–152. doi: 10.17853/1994-5639-2018-4-132-152.

19. Хамидулин В.С. Модернизация модели проектно-ориентированного обучения в вузе // Высшее образование в России. 2020. №1. С. 135–149. doi: 10.31992/0869-3617-2020-29-1-135-149.

20. Щепкина Э.Л., Островерхова Ю.С. Влияние предпроектного анализа на дальнейшие стадии проектирования // Избранные доклады 65-й Юбилейной университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. Сборник докладов. ТГАСУ. 2019. С. 606–609.

Информация об авторах

Митякина Наталья Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры архитектурных конструкций. E-mail: natmit2010@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Старченко Константин Михайлович, магистрант кафедры архитектурных конструкций. E-mail: konstantin.starchenko.99@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Доценко Вита Александровна, магистрант кафедры архитектурных конструкций. E-mail: sakova_vita@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Вишнякова Анастасия Андреевна, магистрант кафедры архитектурных конструкций. E-mail: 4erry98@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дворяшина Мария Сергеевна, магистрант кафедры архитектурных конструкций. E-mail: masha1_199897@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 28.02.2022 г.

© Митякина Н.А., Старченко К.М., Доценко В.А., Вишнякова А.А., Дворяшина М.С., 2022

Mityakina N.A., *Starchenko K.M., Docenko V.A., Vishnyakova A.A., Dvoryashina M.S.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: konstantin.starchenko.99@mail.ru*

SOME ASPECTS OF EDUCATIONAL PROJECT ACTIVITY OF STUDENTS IN THE DEVELOPMENT OF A PUBLIC COWORKING SPACE ON THE TERRITORY OF THE UNIVERSITY CAMPUS

Abstract. The article discusses the main current trends in the development of modern university campuses and their interaction with the existing features of urban infrastructure. A design solution for a local object of accessible public space on the BSTU campus is proposed. It is able to provide conditions for both learning and social interactions, attracting and involving not only students and university staff, but also potential applicants, as well as residents of nearby areas of the city. The symbiosis of these processes leads to an increase in the public image of the university, and, as a result, the formation of a new urban center of attraction. Some tools for the implementation of team design activities of undergraduates of the department "Architectural structures" within the framework of the discipline "Project-based learning" are presented. A business model has been built reflecting the connections between market participants for the implementation of the idea, and possible development prospects based on cooperation with potential partners. The features of the external appearance of the space dictated by the surrounding architectural environment are described. Clear rectangular shapes repeat the pilasters of the main buildings of the BSTU named after V.G. Shukhov. Symbolic Latin letters "BSTU" (Belgorod State Technological University) have been created as the main art object, performing not only an enclosing function, but also creating additional seating.

Keywords: university campus, public space, coworking space, placemaking, open-air zone, architectural and structural elements, project training, team activity, work tree.

REFERENCES

1. University campuses and the city: cooperation for competitiveness [Universitetskie kampusy i gorod: kooperatsiya radi konkurentosposobnosti]. Center for Strategic Research. 2021. [Proektirovanie tekhnologii obshchestvoitel'nyh rabot]. Adobe AcrobatReader. URL: <https://www.csr.ru/upload/iblock/3f0/kbpm276p3tau6knlzdl3d6ozz0fve0e.pdf> (date of treatment: 30.01.2022). (rus)
2. Baranov A.V. Kotlyarova O.V. Practical studies of creative urban spaces: a regional aspect [Prakticheskie issledovaniya kreativnyh gorodskih prostranstv: regional'nyy aspekt]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 2–3 (21–22). Pp. 3–10. (rus)
3. Kazun A.P., Pastuhova L.S. Practices of application of the project method of teaching: experience of different countries [Praktiki primeneniya proektnogo metoda obucheniya: opyt raznyh stran],

Education and science. 2018. No. 2. Pp. 32–59. doi: 10.17853/1994-5639-2018-2-32-59. (rus)

4. Vasil'ev A.S., Dubej O.YA. Features of the collection of initial data in the preparation of a public space project based on modern concepts of a smart city [Osobennosti sbora iskhodnyh dannyh pri podgotovke proekta obshchestvennogo prostranstva na osnove sovremennyh koncepcij umnogo goroda]. Bulletin of PGU named after Sholom-Alejhema. 2020. No. 4 (41). Pp. 20–28. doi: 10.24412/2227-1384-2020-4-20-28. (rus)

5. Dmitriy chuk N.M., Denisova Yu.V. Design of urban park complexes [Proektirovanie gorodskih parkovykh kompleksov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 6. Pp. 70–77. doi: 10.34031/article_5d07a0f2693984.29257494. (rus)

6. Evstratova L.A., Isaeva N.V., Leshukov O.V. Project-Based Learning: Implementation Practices at Universities [Proektnoe obuchenie: praktiki vnedreniya v universitetah]. National Research University "Higher School of Economics". Moscow, 2018. 152 p. doi: 10.17323/978-5-7598-1916-5. (rus)
7. Korshunov G.V., Vedernikova I.O., Dubikovskij S.YU. University in a Small City Environment: Campus Vibes [Universitet v srede nebol'shogo goroda: flyuidy kampusnogo uklada]. Higher education in Russia. 2019. Vol. 28. No. 2. Pp. 134–143. doi: 10.31992/0869-3617-2019-28-2-134-143. (rus)
8. Kochetkova T.V., Alejnikova N.V. Comfort of the urban environment [Komfortnost' gorodskoj sredy]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 66–72. doi: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-66-72. (rus)
9. Mugs 2.0. Scientific and technical circles in the ecosystem of practices of the future. Assembly instructions [Kruzhki 2.0. Nauchno-tekhnicheskie kruzhki v ekosisteme praktik budushchego. Instrukciya po sborke]. 2018. 17 p. (rus)
10. Lastochkina O.S. Placemaking – an approach for the development of public spaces in modern cities (a review of foreign and Russian experience) [Plejsmejking – podhod dlya razvitiya obshchestvennykh prostranstv sovremennykh gorodov (obzor zarubezhnogo i rossijskogo opyta)]. Society and Security Insights. 2021. Vol. 4. No. 2. Pp. 89–105. DOI: 10.14258/ssi(2021)2-07. (rus)
11. Lukashovich O.D., Oreshnikova A.D., Gorlova K.V. Playmaking as a means of creating a comfortable urban environment [Plejsmejking kak sredstvo sozdaniya komfortnoj gorodskoj sredy]. Problems of economics and construction management in the context of environmentally oriented development: Proceedings of the VIII ON-LINE international scientific and practical conference. TGASU. 2021. Pp. 247–257. (rus)
12. Action Plan "Roadmap" "Circle Movement" of the National Technology Initiative [Plan meropriyatij "Dorozhnaya karta" "Kruzhkovoe dvizhenie" Nacional'noj tekhnologicheskoy iniciativy]. Government of the Russian Federation. 2017. [Proektirovanie tekhnologii obshchestroitel'nyh rabot]. AdobeAcrobatReader. URL: <http://static.government.ru/media/files/4UnfuT-WKc5LejBS49BAmAoXRE6WJ6qNs.pdf> (date of treatment: 30.01.2022). (rus)
13. Recommendations for the organization of public participation in the implementation of projects for the integrated improvement of the urban environment [Recommendations for the organization of public participation in the implementation of projects for the integrated improvement of the urban environment]. Ministry of Construction, Housing and Communal Services of the Russian Federation. 2017. [Proektirovanie tekhnologii obshchestroitel'nyh rabot]. AdobeAcrobatReader. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/ad6/prezentatsiya-rekomendatsii-po-organizatsii-obshchestvennogo-uchastiya-v-realizatsii-proektov-kompleksnogo-blagoustroystva-sredy.pdf> (date of treatment: 30.01.2022). (rus)
14. Sakova V.A., Dvoryashina M.S., Starchenko K.M. Development and analysis of the recreational space of the university campus [Razrabotka i analiz rekreacionnogo prostranstva kam-pusa universiteta]. Education. The science. Production: XIII International Youth Forum of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. Pp. 483–490. (rus)
15. Smirnov S.A. City-campus, or educational space of the city. Methodological construct [Gorod-kampus, ili obrazovatel'noe prostranstvo goroda. Metodologicheskij konstrukt]. Higher education in Russia. 2019. No. 4. Pp. 44–59. doi: 10.31992/0869-3617-2019-28-4-44-59. (rus)
16. Standard for integrated development of territories. Catalog of elements and nodes of open spaces [Standard for integrated development of territories. Catalog of elements and nodes of open spaces]. Dom.RF, KB Strelka. Moscow, 2019. (rus)
17. Tokarev I., Pavlova V., Ivanov D., Smej V. Guidelines for creating university public spaces. Agency for Strategic Initiatives [Rukovodstvo po sozdaniyu obshchestvennykh prostranstv universitetov. Agentstvo strategicheskikh iniciativ]. City Competence Center ASI. Moscow, 2019. 40 p. (rus)
18. Trishchenko D.A. Project-Based Learning Experience: An Attempt to Objectively Analyze Achievements and Problems [Opyt proektnogo obucheniya: popytka ob"ektivnogo analiza dostizhenij i problem]. Education and science. 2018. No. 4. Pp. 132–152. doi: 10.17853/1994-5639-2018-4-132-152. (rus)
19. Hamidulin V.S. Modernization of the model of project-based learning at the university [Modernizaciya modeli proektno-orientirovannogo obucheniya v vuze]. Higher education in Russia. 2020. No. 1. Pp. 135–149. doi: 10.31992/0869-3617-2020-29-1-135-149. (rus)
20. Shchepkina E.L., Ostroverhova Yu.S. Influence of pre-design analysis on further design stages [Vliyanie predproektnogo analiza na dal'nejshie stadii proektirovaniya]. Selected reports of the 65th Anniversary University Scientific and Technical Conference of Students and Young Scientists. Collection of reports. TGASU. 2019. Pp. 606–609. (rus)

Information about the authors

Mityakina, Natal'ya A. PhD, Assistant professor. E-mail: natmit2010@bk.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Starchenko, Konstantin M. Master student. E-mail: konstantin.starchenko.99@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Docenko, Vita A. Master student. E-mail: sakova_vita@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Vishnyakova, Anastasiya A. Master student. E-mail: 4erry98@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Dvoryashina, Mariya S. Master student. E-mail: masha1_199897@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 28.02.2022

Для цитирования:

Митякина Н.А., Старченко К.М., Доценко В.А., Вишнякова А.А., Дворяшина М.С. Некоторые аспекты учебной проектной деятельности студентов при разработке общественного коворкинг-пространства на территории кампуса ВУЗа // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 8. С. 60–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-60-70

For citation:

Mityakina N.A., Starchenko K.M., Docenko V.A., Vishnyakova A.A., Dvoryashina M.S. Some aspects of educational project activity of students in the development of a public coworking space on the territory of the university campus. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 8. Pp. 60–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-60-70

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-71-84

^{1,*}Перькова А.Ю., ^{2,3}Перькова М.В., ¹Ладик Е.И.,¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого³Российский университет дружбы народов

*E-mail: alex.perkova2000@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЙ. ЗАРУБЕЖНЫЙ И ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ

Аннотация. Городские агломерации демонстрируют различные модели и сценарии развития. Исследование направлено на описание, сравнение и комплексный анализ различных моделей развития городских агломераций исходя из зарубежного опыта. Целью исследования является выявление особенностей развития зарубежных и российских городских агломераций. В исследовании выделены основные градостроительные проблемы и модели управления городскими агломерациями (одно- и двухуровневые). Рассматриваются различные характеристики агломераций Европы, Азии и Америки, Российской Федерации: этапы формирования и закономерности развития урбанизации и агломераций; функциональные структуры и отношения; движущие силы; социальные и демографические характеристики (миграция, структура жилого фонда, рабочие места); особенности развития транспортной инфраструктуры (дорожная сеть, системы общественного транспорта и пр.); выявляются причины возникновения и тенденции развития джентрификации. На примере Белгородской агломерации проведен анализ креативного потенциала территорий и выявлено ее позиция относительно других субъектов Российской Федерации по которым производилась аналогичная оценка. Проведенный анализ развития городских агломераций в зарубежных странах позволил выявить возможные направления развития городских агломераций, а также сформировать базу для разработки региональных моделей решения проблем агломерационного развития в регионах Российской Федерации.

Ключевые слова: урбанизация, городская агломерация, джентрификация, субурбанизация, транспортная нагрузка, трансрегиональный трафик.

Введение. На сегодняшний день стремительное развитие агломерационных процессов требует внедрения новых подходов и методов, направленных на эффективную работу всей градостроительной системы и улучшения транспортной, социальной, инфраструктуры в городах-спутниках и пригородных территориях. Это говорит об актуальности вопросов, касающихся стратегического городского планирования городских агломераций.

Целью данного исследования является выявление особенностей развития зарубежных и российских городских агломераций и агломерированных территорий. **Объект исследования** – городские агломерации Западной Европы, Латинской Америки, США и Российской Федерации. **Предмет исследования** – особенности и тенденции развития агломерационных процессов в различных регионах.

Изначально развитие агломерации как понятия и как формы расселения берёт свои истоки именно в Европе. Там, развитие городских агломераций можно назвать следствием формирования «агломерационного мышления». Термин агломерация на сегодняшний день трактуется по-разному. Наиболее распространенным термином является городская агломерация.

Развитие агломераций в контексте стратегического подхода к территориальному планированию систем расселения и населенных мест рассматривал в своих трудах Е.Н. Перчик. Он описывал городские агломерации как «систему территориально сближенных и экономически взаимосвязанных населенных мест, объединенных устойчивыми трудовыми, культурно-бытовыми и производственными связями, общей социальной и технической инфраструктурой» [1]. В исследовании дано описание демилитаризации границ агломерации: «...границы городской агломерации подвижны во времени благодаря изменению важнейшего параметра агломерации – дальности ежедневных передвижений от места жительства к местам приложения труда: в рамках пространственной самоорганизации этих передвижений их дальность растет пропорционально увеличению скорости средств транспорта, а затраты времени увеличиваются незначительно...» [1].

Городская агломерация играет важную роль в организации системы расселения в странах с высоким уровнем урбанизации. Это качественно новый принцип расселения, имеющий ряд особенностей связанных с населением, природой и различной деятельностью людей и имеющий существенные преимущества в экономической и

социальной сферах. Распространение сети агломерационных территорий объясняется новыми тенденциями концентраций производственных сил и форм общества.

В данной статье примем, что городская агломерация – это «...компактная пространственная группировка населенных пунктов (главным образом городских), объединенных многообразными устойчивыми интенсивными взаимовыгодными связями (производственными, трудовыми, культурно-бытовыми, рекреационными и др.) в сложную многокомпонентную динамическую систему» [2]. При условии, что вокруг города сформировалась агломерированная территория, она изменит деятельность города в социальном и экономическом отношении. Относительная внутренняя связанность поселений в агломерации и на агломерированных территориях обусловлена коммуникационным каркасом при их административной и пространственной автономности. В связи с этим агломерацию можно рассматривать как систему расселения. Агломерация не имеет четких границ, в отличие от города, ее границы подвижны.

Материалы и методы. В исследовании применен комплексный подход. Проанализирован процесс формирования и развития городских агломераций на трёх континентах методом статистического анализа данных. Так же применялись графоаналитические методы исследования, индикативные методы оценки при анализе состояния социальной и транспортной инфраструктуры. С использованием адаптированной методики оценки, разработанной американским исследователем Р. Флорида, была проведена оценка креативности региона на примере Белгородской области.

Особенности формирования и развития урбанизированных территорий являются предметом научных исследований последних десятилетий. Аспектам формирования и развития городских агломераций посвящены исследования Перцика Е.Н., Лаппо Г.Н., Федоровской Г.Н и других отечественных ученых. За рубежом изучением проблем формирования и развития субурбанизированных территорий занимались Джексон К. Т., С. Парнел и С. Олдфилд, Р. Харрес, американская компания «Duanu», «Plater-Zyberk», Д. Робинсон, работы которой призвали к более широкому освещению опыта городского развития в странах Южной Америки, Азии и Африки. Работы по изучению пригородов в странах бывшего социалистического лагеря проводил К. Станилов и С. Херт. Изучение агломерационных процессов проводили китайские исследователи: Зоу Ма, Фенг Зоу, Брай, Ву Ху Йех, Хуанг, Ли Ву и др.

В российской науке развитию пригородных территорий уделяли внимание Малоян Г.А., Трубина Е.Г., Григоричев К.В., Петри О.В., Аксенов К.Э. и Крутиков С.А., Зайкова Е. Ю., Зиятдинов З. З. Альтернативы пространственного развития и управления городов рассматривали Бабичев К. Н., Кафидов В. В., Любовный В. Я. Региональные аспекты формирования агломерированных территорий на примере Белгородской области были освещены в трудах Енина А.Е., Большакова А.Г., Перьковой М.В., Ладик Е.И., Иванькиной Н.А. и др.

Основная часть. По мнению ученых, процесс урбанизации в Европе и в большинстве других экономически развитых стран характеризуется тремя стадиями развития:

- 1) концентрация населения в крупных городах;
- 2) развитие субурбанизированных территорий в пригородах и, как следствие, формирование городских агломераций;
- 3) эффект возникновения «зеленой волны», так как горожане стремятся жить ближе к природе - в небольших городах или сельской местности с высоким качеством среды жизнедеятельности.

На сегодняшний день анализ мировых тенденций демонстрирует следующие показатели структуры урбанизации: мегаполисы – 46 %, большие города – 23 %, средние города – 3,6 %, малые города – 5,1 %, очень маленькие города – 11,6 %, сельские поселения – 6.4 % (рис. 1).

Рассмотрим некоторые особенности формирования и развития городских агломераций в ряде зарубежных стран.

Европа. После окончания второй Мировой войны наибольшее влияние на развитие агломерационных процессов в Западной Европе оказал научно-технический прогресс и приток рабочей силы. В настоящее время в Европе насчитывает более 400 городских агломераций. Наиболее крупными являются моноцентрические агломерации Лондона и Парижа. В 1901 году население Лондона возросло до 6,2 миллиона человек (при этом в пригородной территории жили 22 % населения) [3]. В 2011 г. в Большом Лондоне уже насчитывалось 8,2 млн человек, из которых 60 % жили за его административными границами [4].

Париж демонстрирует аналогичную динамику роста. В 1911 году в Париже и его пригородах проживало 4,5 миллиона человек, из них за пределами административных границ города – 35 %. В 2010 году население агломерации достигло 10 миллионов, из которых за пределами города жили 70 % (по Ф. Жюльену из INSEE) [5], на сегодняшний день почти в 30 раз больше, чем сам город.

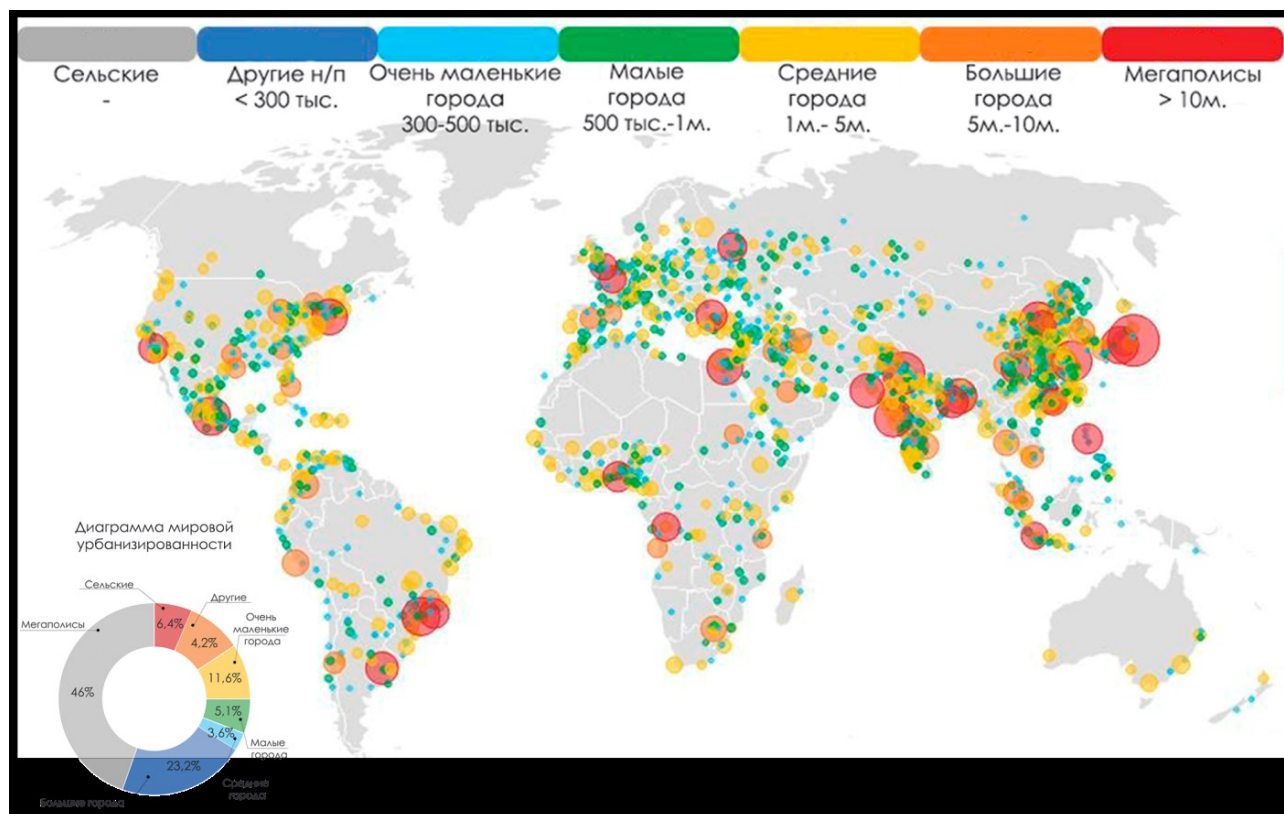


Рис. 1. Карта мировой урбанизации. Сост. Бутко О.В., Перькова М.В.

Регион Рейн-Рур является одним из крупных полицентричных мегаполисов с несколькими городами в качестве ядер без реального главного города, в котором проживает более 11 миллионов жителей и площадь которого составляет 7 110 кв. км. История динамики населения неточно задокументирована, поскольку рост региона основан на умеренном, но устойчивом росте средних и небольших центров [6]. Сегодня 10 городов среднего размера (с населением несколько 100 000 человек) являются частью столичного региона: Дортмунд, Бохум, Эссен, Дуйсбург (Рурская область), Менхенгладбах, Дюссельдорф, Вупперталь, Леверкузен, Кельн и Бонн (Рейнская область). На юге столичный регион Рейн-Майн превратился в более крупные города Франкфурта, Оффенбаха, Висбадена, Майнца и Дармштадта. В регионе развита транспортная инфраструктура, обслуживающая интенсивные пригородные потоки. Дальнейшие тесные связи были установлены с соседними агломерациями Рандстад и Брюссель [7].

Латинская Америка. За последние 60 лет в Латинской Америке произошли значительные структурные изменения в ее социальном, экономическом и пространственном измерениях. В результате чего структура расселения сменилась с рассредоточенной сельской местности на урбанизированную или агломерированную концентрацию (рис. 1). Сегодня 80 % населения Латин-

ской Америки сосредоточено в городских агломерациях, и эта доля только продолжает расти [8, 9].

Хотя процесс городской агломерации в регионе начался 65 лет назад, он продолжает расширяться со скоростью 20 м кв. в минуту [10]. В последние годы скорость развития стала снижаться.

Таким образом, несмотря на кажущееся замедление темпов притока, если «...в 1980-х годах миграция из сельской местности давала 36,6 % прироста городского населения в целом по региону, то в 1990-х годах эта доля упала до 33,7 %. процентов» [8], чистый прирост населения и физическое расширение продолжают расти.

Эмпирические данные из различных латиноамериканских городов показывают сходство моделей и процессов их пространственного развития, развивающейся диффузной периферийной фрагментации из-за развития неформальности и усиливающихся тенденций к разрастанию городов, а также социальная и пространственная фрагментация из-за закрытых сообществ [11,9].

Хотя явления разрастания городов и/или субурбанизации постоянно усиливаются в Латинской Америке, компактное горизонтальное расширение и уплотнение существующей застроенной среды продолжают оставаться наиболее распространенными моделями роста.

На самом деле Латинская Америка все еще более или менее компактна, застроенные районы

уплотнились и интенсифицируются, она используется на периферии в большей пропорции, чем в городских центрах в «...открытой фрагментированной пригородной ткани, где автономные элементы больше не относятся друг к другу...» [9].

Этот процесс неконтролируемой и фрагментарной экспансии наблюдался почти во всех странах континента, выходя за пределы административных муниципалитетов, поглощая и агломерируя другие близко расположенные населенные пункты и города в процессах агломерации.

Создание городских агломераций путем разрастания на самом деле является наиболее распространенной моделью городского развития в Латинской Америке и одной из причин полицентрической структуры латиноамериканского городского ландшафта. Столичные регионы в Латинской Америке создают новые проблемы на пространственном, устойчивом, планировочном и административном уровнях, поскольку практически отсутствуют механизмы интегрированного управления между различными муниципалитетами и территориальными учреждениями.

Перед агломерациями Латинской Америки стоят большие задачи по сокращению дистанции между социально-экономическими классами, улучшению условий жизни наиболее уязвимых сообществ и превращению реальных институтов в более эффективных активных участников развития. Политическая преемственность, или, лучше сказать, преемственность политики и проектов в области развития, также является ключевым элементом для выполнения серьезных усилий и планов развития, как это наблюдается в таких городах, как Куриitiba, Кито, Медельин и Богота в разные периоды.

Инновационные меры и проекты, связанные с городскими системами, такие как скоростное автобусное сообщение (BRT), канатные дороги, улучшение доступности районов неформального жилья, публичных библиотек, школ и детских садов, а также улучшение образования в этих городах, - стали серьезным шагом к улучшению жизни в городах и агломерациях в целом.

Однако, несмотря на эти очень важные достижения, регион по-прежнему сталкивается с большими проблемами, направленными на поиск устойчивых решений для комплексного обеспечения жильем, сокращение фрагментации и преобразование агломераций в более инклюзивную, устойчивую и здоровую городскую среду.

Северная Америка (США). В Северной Америке крупные городские агломерации можно наблюдать вдоль восточного побережья, где первые колониальные поселения превратились в торговые центры, а гавани — в транспортные

узлы «старого мира». Позже они были связаны с внутренними районами и западным побережьем железными дорогами. Эти населенные пункты с привлекательными факторами местоположения образуют ядра городов, которые неуклонно растут и сливаются в крупные полицентрические конурбации. На Среднем Западе можно также определить эту динамику и движущие силы — гавани на Великих озерах, торговые центры и транспортные узлы — т.е. конурбация Чикаго-Питтсбург («мегаполис Великого озера») как агломерация, охватывающая несколько городов, таких как Чикаго, Милуоки, Детройт, Кливленд и Питтсбург. Вдоль западного побережья динамика в начале была аналогична портовым городам, таким как Сиэтл, Сан-Франциско, Лос-Анджелес и Сан-Диего, позже связанным с внутренними районами и всей страной железнодорожными линиями, которые росли сначала через жилые районы, а затем через промышленные центры, где Кремниевая долина является самой известной. Поскольку эти города расположены на достаточном удалении, они не образуют полицентрических структур, а остаются моноцентрическими агломерациями сами по себе. Как отмечали Фанг и Ю, агломерации получаются как городские системы с самоподдерживающимися иерархическими структурами и функциями [8, 12]. Это можно наблюдать в агломерации Вашингтона, Балтимора, Филадельфии, Нью-Йорка и Бостона, где каждый город сам по себе имеет разные основные функции: Вашингтон, округ Колумбия, — политический и административный центр с историческим и культурным наследием, Филадельфия — производственный центр, Нью-Йорк — коммерческий, сервисный и банковский центр, а Бостон можно рассматривать как академический центр.

В 19 веке рост городов в Европе и Северной Америке ускорился, но достиг своего пика к середине 20 века. Западное побережье США значительно выросло за годы до 1990 года. Северная Америка в настоящее время является одним из наиболее урбанизированных регионов мира, где около 82 % людей проживает в городских районах [12].

Причиной уплотнения часто является ревитализация старых исторических центров тех городов, которые постоянно приходили в упадок, во второй половине XX века. Для восстановления зданий и мест для привлечения новых жителей требовались крупные государственные и частные инвестиции, но эти инвестиции часто приводят к значительному повышению цен на участки и снижению доступности, что приводит к джентрификации. Эта динамика также оказывает новое давление на транспортный сектор и

увеличивает спрос на энергию [13]. Поддержка жилья в основном оказывалась для расширения и улучшения уже существующих единиц, что привело к отсутствию соответствующих принципов проектирования, вызывающих такие проблемы, как перенаселенность или низкая конфиденциальность. Эти жилые единицы также очень уязвимы для экологических бедствий. Это вызывает важную проблему, как улучшить социальные и пространственные условия жизни в уже консолидированных поселениях с улучшенным дизайном.

Джентрификация – широко обсуждаемый вопрос в США, который ведет к сегрегации по месту жительства. Недавнее исследование, проведенное в 2015 году, показало, что джентрификация как национальная проблема на самом деле

менее распространена, нежели кажется. Но в городских агломерациях джентрификация является серьезной проблемой, где рост стоимости жилья вынуждает слои населения с низкими доходами переезжать в более дешевые и менее привлекательные районы. В недавних исследованиях обсуждается, что тенденции к джентрификации являются лишь частью динамики. Омоложение, растущее присутствие молодых людей в данном районе, также можно рассматривать как тенденцию в городах Северной Америки.

Исходя из анализа зарубежной практики, возможны 2 формы управления городскими агломерациями (рис.2): централизованная и децентрализованная. Модели управления городскими агломерациями можно подразделить на одно- и двухуровневые [14].



Рис. 2. Модели управления городскими агломерациями [14]

Регион и городские агломерации представляют собой интенсивно взаимосвязанные функциональные зоны, обеспечивающие взаимодополняющие функции различных для обеспечения потребностей населения— от жилищной функции до рабочих мест, сферы образования, торговли и услуг [15]. Для использования этих функций требуется активное перемещение между территориями предоставления функций.

Ссылаясь на теорию центральных мест В. Кристаллера, объясняющую пространственное расположение, размер и функциональное обеспечение поселений, существует иерархия и структура малых и крупных городов, которые в зависимости от размера предоставляют набор услуг для города и населения. Простые бытовые услуги, такие как продовольственные магазины, детские сады и начальные школы, можно найти в

низкоранговых центральных местах: поселениях, обслуживающих местное население и окрестности на небольшом расстоянии. Иногда востребованные специализированные службы – больницы, колледжи, администрация провинции – расположены в центральных местах с более высоким рейтингом: в средних и крупных городах, обслуживающих население большей территории. В центральных местах с самым высоким рейтингом находятся крупные города с высоким уровнем обслуживания – специализированные клиники, университеты, национальные музеи, министерства и центральные органы власти, — которые снабжают население большей территории [16]. Городские агломерации позволяют эффективно предоставлять услуги на всех иерархических уровнях.

В мегаполисах большего внимания требует организация транспортной инфраструктуры, миграционных потоков (покупки, обучение, поездки на работу, переезд и т. д.), деловых связей (цепочек поставок, товарных потоков, розничной торговли, услуг) и инфраструктуры для обеспечения этих взаимодействий: дорожной и коммуникационной, инфраструктура энергетических и технических услуг и общие социальные и административные услуги [17,18]. Плотность застройки и, следовательно, функциональная плотность могут значительно сократить трафик, поскольку близко расположенные функции обеспечивают достаточное количество снабжения на небольшом расстоянии, что позволяет передвигаться пешком за покупками, местами отдыха, образовательными учреждениями вместо того, чтобы использовать личный автотранспорт [19].

Особенности развития городских агломераций Российской Федерации. В России в последние десятилетия уровень урбанизации растет быстрыми темпами, хотя обширность территории страны не позволяет развитию урбанизации по всей территории держаться на одном уровне. В условиях нашей страны, с учетом ее обширных территорий вопросы развития городских агломераций представляются особенно актуальными [20]. Крупные агломерационные образования способны формировать экономическую активность на прилегающих территориях и становиться центрами инвестиционной привлекательности в регионах. Процесс урбанизации проявляется в виде различных форм территориальной концентрации, ускорении разрастания крупных городов и на их основе формирования городских агломераций. Распределение городских агломераций по территории Российской Федерации неравномерно, что связано с природно-климатическими и антропокультурными факторами.

Высокая доля городского населения среди экономических районов России наблюдается в Северо-Западном районе – около 87 % и в Центральном районе – 80 %. Эти территории являются наиболее развитыми с точки зрения урбанизации. Ее интенсификация началась здесь еще в конце XIX в, когда появился массовый поток сельских жителей в города, прежде всего в Москву и Санкт-Петербург. В настоящее время здесь расположены самые крупные городские агломерации России – Московская и Петербургская. Началось формирование Центрального мегалополиса (Москва – Нижний Новгород – Ярославль). Также, говоря об урбанизационных процессах в России (рис.3), следует рассмотреть основные особенности структуры развития территории:

1. Для современной России актуальна *проблема монофункциональных городов*, особенно многочисленны узкоспециализированные промышленные центры. Самыми характерными представителями являются: центры нефте- и газодобычи в Тюменской области, центры текстильной промышленности в Ивановской области, центры добычи угля на Кузбассе. Основная часть таких городов была образована в период СССР. Даже при крупных размерах подобные центры нельзя считать сформировавшимися городами. Это скорее поселки. Такие «сельские города» скрывают под городским статусом свою сельскую основу. Развивая городские функции, они не отказываются и от прежних сельских. Таким образом, 1/5 часть малых городов России «не дотягивала» до установленного законодательно городского критерия населенности. В результате своей недосформированности, а также узконаправленной деятельности такие города не могут стать ядрами городских агломераций, тем самым мешая выходу окружающих территорий на новый уровень организации социальной, экономической и других структур.

2. *Формирование агломераций.* Для России, как страны с обширными территориями, возникновение сети городских поселений на базе крупного города дает значительный экономический эффект, характерный возможностью замкнуть в пределах территориально ограниченных агломерационных ареалов значительную часть производственных, экономических и иных связей. Агломерации становятся ключевой формой территориальной организации производительных сил и расселения.

3. *Формирование опорного каркаса системы расселения.* Опорный каркас представляет собой генерализованный урбанистический «портрет» страны или региона. Он образован совокупностью узловых (города, агломерации) и линейных

(магистралей, полимагистралей) элементов. Там, где они достаточно сближены и территория оказывается перекрытой зонами их непосредственного влияния, формируются урбанизированные районы. Опорный каркас расселения России находится в процессе формирования, а он необходим для равномерного развития не только центральных агломераций, но и агломераций регионального значения. Примером плохо развитого каркаса может служить территория вдоль магистрали Москва - Санкт-Петербург. Эта территория испытывает экономический застой и отток населения.

Следующей позицией развития являются региональные центры и субцентры. Из-за обширной территории и не возможности тотального централизованного контроля возрастает роль региональных центров. Целесообразно ускоренное по сравнению с другими региональными центрами развитие городов-лидеров Дальнего Востока. Формирование и развитие Владивостокской агломерации, как одного из первых пунктов противовеса западной и центральной плеяде агломераций России, привело к сокращению оттока населения с Дальнего Востока, росту производственных сил и укреплению границ в экономической и социальной сферах с перспективой дальнейшего наращивания сотрудничества с Японией и другими возможными партнерами.

Региональные лидеры формируют основу опорного каркаса, своего рода суперкаркас расселения. Не последнюю роль в качестве опор роста играют города-научные и научно-производственные центры. Их в России около 70–80 и они являются важным дополнением городов-лидеров, располагаясь в большинстве случаев поблизости от них.

Изучая агломерацию как явление не только экономическое, но и социальное нельзя не обращать внимания на такое проявление его функционирования как маятниковая миграция. Понятие маятниковой миграции очень обширно, его зачастую понимают, как ежедневные перемещения людей на работу из пригорода в город с возвращением к месту проживания, но агломерационная маятниковая миграция приняла более обширное и важное значение, поскольку от этой связи между компонентами агломерации зависит ее существование как таковое.

Е. Н. Перцик давая определение понятию агломерации в отличие от многих других исследователей ввел термин «маятниковая миграция» или «маятниковое передвижение» в само понятие агломерации как неотъемлемой и определяющей его составляющей.

Рассматривая маятниковые миграции как составную часть агломерации можно выделить различные критерии, определяющие масштаб и характер миграционных потоков. Среди основных можно выделить следующие критерии: плотность городского населения и непрерывность застройки; величина города-центра; дальность размещения городов-спутников; удельный вес несельскохозяйственных рабочих; доля работающих вне места жительства; количество городских поселений - спутников и интенсивность их связей с городом-центром и др. Каждый из этих параметров определяющий плотность и характер маятниковых передвижений определяет еще и индивидуальную пространственную структуру отдельно взятой агломерации.

Рассматривая принципы маятниковых миграций необходимо также обратить внимание на транспортную инфраструктуру в целом. Транспортные системы поддерживают мобильность всего городского населения, обеспечивая ежедневную активность. Территориальная структура городской агломерации делится на 4 основных элемента: город-центр (или ядро), поселения-спутники, пояс спутников (или пригородная зона), а также объединяющие все эти элементы транспортной инфраструктуры.

Основная концентрация высокоразвитых городских агломераций России сосредоточена в Европейской части страны (Тульская, Ростовская, Волгоградская, Ярославская и др.). Наряду с развитием столичной агломерации формируются и развиваются агломерации в региональных центрах субъектов Российской Федерации: Екатеринбургская, Нижегородская, Ростовская, Казанская и др.

Европейская территория России характеризуется не только высокоразвитыми агломерациями, но и в целом густой относительно организованной сетью городских агломераций. Центральный Федеральный округ, а именно основная масса столиц субъектов стали ядрами агломераций. Главной причиной этого стало хорошо развитые транспортные связи, достаточная территориальная близость и доступность наиболее развитых центров, к тому же природные, климатические условия благоприятно влияют на величину потока населения на данные территории.

Однако, практически все отечественные урбанизированные территории сталкиваются с рядом проблем при градостроительном планировании: недостаточность терминологической базы; несформированность единых либо вариантных методических подходов к определению границ форм урбанизированного расселения территорий; неразработанность единого формата градо-

строительной документации для агломерационных территорий; отсутствие комплекса требова-

ний к структуре и содержанию проектно-планировочной документации для урбанизированных территорий.

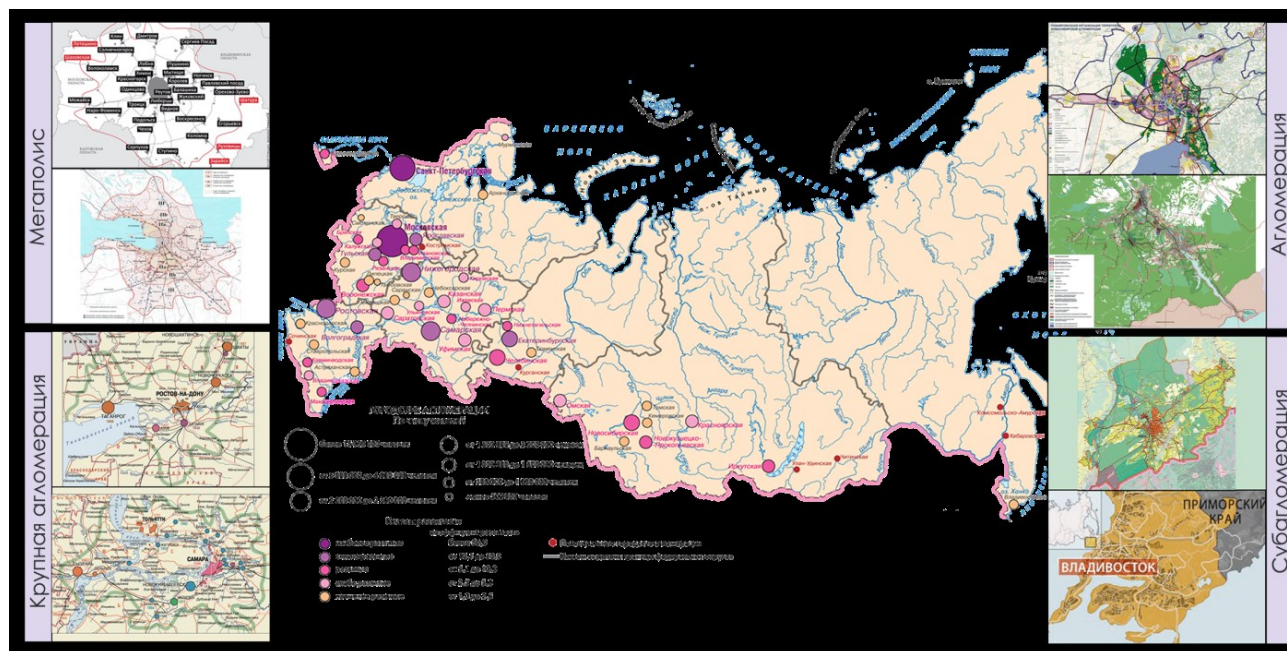


Рис. 3. Городские агломерации на территории РФ

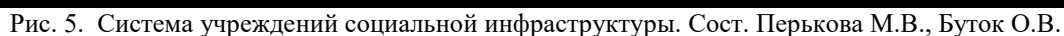
Рассмотрим региональные процессы урбанизации в регионах Российской Федерации на примере Белгородской области. Современная система расселения Белгородской области сложилась под влиянием различных региональных факторов: природных, историко-культурных, социальных, экономических, демографических и др. [21]. В развитии процессов урбанизации Белгородской области участвовали 4 типа городов: малые, средние, большие и крупные города с преобладанием малых. Анализ структуры Белгородской агломерации указывает на основные тенденции в ее развитии: увеличение доли населения пригородной зоны за счет сельского расселения и поселков городского типа, стабилизацию доли города-ядра в структуре агломерации и дифференциацию пригородных районов по темпам роста населения. На современном этапе агломерация продолжает интенсивно развиваться с тенденцией уплотнения ядра, усложнения структуры и расширения зоны влияния и территории (рис. 4.).

Транспортная инфраструктура Белгородской агломерации нуждается в реорганизации в связи с увеличением темпами автомобилизации населения, увеличением количества ежедневных маятниковых трудовых и социально-бытовых миграций «город-пригород» на агломерированной территории. Также одной из транспортных проблем является отсутствие дублирующих или

дополняющих главные направления движения, такие как северное (п. Северный, г. Строитель) и южное направление (п. Дубовое, Таврово, Никольское). Недостаточное развитие транспортной инфраструктуры наблюдается на всех уровнях Белгорода и Белгородской субурбии. Одной из специфической особенностью развития Белгородской субурбии является массовая застройка территорий, поддерживаемая на региональном уровне.

Состояние и развитость социальной инфраструктуры являются важным показателем степени готовности территории к переходу на новый уровень агломерационного развития. В этой связи важно проанализировать степень развитости сети учреждений социальной инфраструктуры (медицинские, образовательные, досуговые и др. учреждения). Исходя из анализа социальной инфраструктуры Белгородской агломерации с применением индикативного метода оценки выявлено, что учреждения социального обслуживания не могут в полной мере удовлетворить потребности жителей субурбанизированных территорий. Проблемы недостаточной развитости социальной инфраструктуры проявляются на территории 1 пояса Белгородской субагломерации – в формирующихся микрорайонах пригородных населенных пунктов – п. Дубовое, п. Северный, пгт, Разумное, п. Стрелецкое, с. Таврово, п. Майский, п. Новосадовый (рис. 5).

Рис. 4. Характеристика межселенных связей в структуре агломерации.
Сост. Перькова М.В., Буток О.В.



Территория Белгородской области находится в начальной степени урбанизированности, в этой связи актуальной является задача оценки ее социально-экономического потенциала. В рамках данной оценки следует отметить, что парадоксом конкуренции между территориями становится определение прогрессивной территории,

В рамках исследования, опираясь на методику оценки, разработанную американским исследователем Р. Флорида и адаптированную отечественными учеными А.Н. Пилясовым, О.В. Колесниковой, Ю.Г. Лавриковой и А.В. Суворовой авторы провели оценку креативности региона. Потенциал Белгородской субагломерации был оценен с использованием следующих показателей: индекс открытости территории (связанный с миграционным приростом численности населения); индекс человеческого потенциала (численность студентов высших учебных заведений на 10 000 человек); индекс человеческого капитала (доля специалистов, имеющих высшее образование %). Исходя из расчетов был получен коэффициент креативности (творческого потенциала) региона, который составил 0.16 и, исходя из этого проведен сравнительный анализ Белгородской агломерации с другими субъектами Российской Федерации по которым производилась аналогичная оценка (рис.6)

Рис. 6. Оценка показателей креативности. Сост. Перькова М.В., Бутко О.В.

вероамериканские, скандинавские или швейцарские агломерированные территории имеют зачастую мало общего. Успех развития таких систем расселения, вероятнее всего, основан на глубоком погружении в контекст того или иного места, сложившуюся действительность и разработку

точных решений для успешного развития. Контроль за непрерывными процессами, происходящими при взаимодействии/интеграции местных и локальных систем расселения. Связанность элементов агломерированных территорий может обеспечить успешное развитие рассматриваемых систем расселения, однако это является достаточно сложной задачей. Рассматривая зарубежную Европу как территорию зарождения агломераций, не стоит забывать о том, что развитие и путь формирования агломерационных образований зависит во многом от особенностей места ее расположения, поэтому для изучения агломераций Российской Федерации необходимо рассмотреть отечественные аналоги зарубежных агломераций. Это даст возможность выявить как различия, так и общие черты агломераций. Проанализировать возможности использования путей развития агломераций на основе аналогов, а также даст базу для разработки собственных путей решения проблем в городских агломерациях.

Формирование и функционирование агломераций в России и за рубежом характеризуется различием в способах их делимитации, социальном и экономическом устройстве территории. Сравнение этих процессов показало, что европейские страны опережают Россию в развитии территорий такого типа и какие мероприятия дают существенный толчок для объединения разрозненных территорий в сообщающуюся систему.

Особенности формирования социальной инфраструктуры агломераций на территории РФ заключаются в развитии трех основных сфер: образовательной, медицинской и культурно-досуговой.

В исследовании предложено понятие «субагломерации» как агломерированной территории, для которой характерны признаки сформировавшейся агломерации, в том числе маятниковые трудовые, рекреационные, культурно-бытовые, производственные миграции, с численностью населения менее 1.5 млн. человек. Общественный транспорт является серьезной проблемой, которая облегчает доступность функций, взаимодействие, поездки на работу и, следовательно, городскую жизнь. Поскольку размер агломерации увеличивает риск заторов, высокое качество услуг общественного транспорта становится тем более важным, чем крупнее городская агломерация.

Достаточные темпы жилищного строительства являются важным фактором, поскольку агломерации как правило демонстрируют иммиграционное давление и рост. Социальное жилье является необходимостью, позволяющей в пер-

спективе не допустить появления неблагополучных районов. Участие в процессах планирования помогает вырабатывать общие стратегические решения.

При формировании стратегий развития городских агломераций необходимо максимально избегать возможности социального расслоения не только за счет создания многофункциональных территорий, но и за счет образования и обеспечения равных возможностей для всех слоев населения, что в агломерациях проще, чем в малых городах. Квалифицированные кадры обеспечивают экономическое развитие агломерации, привлекая новые компании для создания производственных инновационных площадок и, таким образом, повышая экономическую активность.

Благодарность. Исследование подготовлено в рамках программы развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2021-2030 гг. «Приоритет 2030»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перцик Е.Н. География городов (Геоурбанистика). М.: Высшая школа, 1991. 282 с.
2. Алексеев А.Ю., Соколова С.В., Шапошников С.В. Современный опыт формирования городских агломераций // Вестник Университета. 2014. № 16. С 88–92.
3. Pevsner N., Bridget C. London I: The Cities of London and Westminster. Rev. edition. London: Penguin; 1973. 709 p.
4. Suffolk Community College. Urbanization – When, Where and Why Did Urbanization Occur in Europe? 2012. URL: <http://www2.sunysuffolk.edu/westn/urban.html> (date of treatment: 10.10.2017).
5. The Guardian. Cities in Numbers: How Patterns of Urban Growth Change the World. 2015. URL: <https://www.theguardian.com/cities/2015/nov/23/cities-in-numbers-how-patterns-of-urban-growth-change-the-world> (date of treatment: 30.09.2019).
6. Ortuzar J.D., Willumsen L.G. «Modelling Transport, Third Edition», John Wiley & Sons Ltd., England, 2001. 499 p.
7. Агаджанян А.В., Блудова С.Н. Анализ развития городских агломераций в зарубежных странах // Материалы международной научно-практической конференции. Издательство: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова" (Нальчик), 2019. С. 18–24.
8. Никифоров А.В. Рождение пригородной Америки. Социальные последствия и общественное восприятие процесса субурбанизации в США

(конец 40-х–50-х гг. XX в.). М.: Эдиториал УРСС, 2002. 356 с.

9. UN Habitat. The State of Latin American and Caribbean Cities 2012. Towards a New Urban Transition. United Nations Human Settlements (date of treatment: 15.09.2020).

10. Развитие городских агломераций. Аналитический обзор. Выпуск 2 [Электронный ресурс] URL: <http://giprogor.ru/sites/default/files/Развитие%20городских%20агломераций%20%20аналитический%20обзор.%20Выпуск%20.pdf>. (дата обращения: 12.05.2022)

11. Ёлшина А.А. Городские агломерации: теоретические проблемы и анализ зарубежного опыта // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 7. [Электронный ресурс] URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/07/56419> (дата обращения: 18.04.2022)

12. America2050.org. Megaregions. 2017. URL: <http://www.america2050.org/content/megaregions.html> (date of treatment: 30.09.2017).

13. Афонин М.В. Маятниковая миграция как фактор субурбанизации // Вестник социально-политических наук. 2012. №11 С. 14–19.

14. Паршуто Е.В., Галямов Ю.Ю. Теоретические аспекты возникновения и развития городских агломераций в России // Экономика и предпринимательство. 2014. №11. С. 22–28

15. Иванькина Н.А., Перькова М.В. Концепция нового урбанизма: предпосылки развития и основные положения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 8. С. 75–84.

16. Перькова М.В. Градостроительное развитие региональной системы расселения и ее элементов (на примере Белгородской области) // Диссертация на соискание ученой степени доктора архитектуры / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Санкт-Петербург, 2019.

17. Вучик В.Р. Транспорт в городах, удобных для жизни / пер. с англ. А. Калинина; под научн. ред. М. Блинкина. М.: Территория будущего, 2011. 576 с.

18. Горбун Ю.В., Бондарь А.С., Головкин М.В., Боровской А.Е. Исследование и формализация данных о характеристиках транспортных потоков//в сб: Логистический аудит транспорта и цепей поставок. материалы III междунар. научно-практич. конф. Тюмень, 2020. С. 50–58.

19. Перькова М.В., Иванькина Н.А., Боровской А.Е., Перькова А.Ю. Анализ функционирования транспортной инфраструктуры на территории межмуниципального природного парка в Шебекинском и Белгородском районах //Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 5. С. 53–63.

20. Лаппо Е.Г. Городские агломерации России. Электронная версия бюллетеня «Население и общество». 2010. [Электронный ресурс] URL: <https://polit.ru/article/2010/02/16/demoscope407/> (дата обращения 6.07.2022)

21. Ладик Е.И. Региональные особенности архитектурно-планировочной структуры туристско-рекреационных территорий Белгородской области: диссертация ... кандидата архитектуры: 05.23.22 / Ладик Елена Игоревна; [Место защиты: С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т]. Белгород, 2017. 167 с.

Информация об авторах

Перькова Александра Юрьевна, магистрант кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: alexandra.perkova2000@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46.

Перькова Маргарита Викторовна, доктор архитектуры, и.о. директора Высшей школы дизайна и архитектуры, профессор. E-mail: perkova.margo@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Российский университет дружбы народов, Россия, 1171198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6.

Ладик Елена Игоревна, кандидат архитектуры, член Союза архитекторов России. Исполняющая обязанности заведующего кафедрой архитектуры и градостроительства. E-mail: krushelnitskaya.lena@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46.

Поступила 12.05.2022 г.

© Перькова А.Ю., Перькова М.В., Ладик Е.И., 2022

^{1,*}Perkova A. Yu., ^{2,3}Perkova M.V., ¹Ladik E.I.¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov²St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great³Peoples Friendship University of Russia

*E-mail: alex.perkova2000@mail.ru

FORMATION AND DEVELOPMENT OF URBAN AGGLOMERATIONS. FOREIGN AND DOMESTIC EXPERIENCE. FOREIGN AND DOMESTIC EXPERIENCE

Abstract. Urban agglomerations of the implementation of various models and development scenarios. The study is aimed at describing, comparing and comprehensively analyzing various models for the development of urban agglomerations based on foreign experience. The purpose of the study is to identify the problems of development of foreign and Russian agglomerations. Methods of statistical data analysis, graphic-analytical methods, analysis of social infrastructure, use of interdisciplinary, quantitative, qualitative, historical and typological analysis were applied to identify and study certain aspects of the research problem. The study highlights the main urban planning problems and management models for urban agglomerations (one- and two-level). Various characteristics of the agglomerations of Europe, Asia and America, the Russian Federation are considered: the stages of formation and prospects for the development of urbanization and agglomerations; functional structures and relationships; driving forces; social and demographic characteristics (migration, housing stock structure, jobs); features of the development of transport security (road network, public transport systems, etc.); the reasons for the emergence and expected development of gentrification are identified. At the disclosure of the Belgorod agglomeration, an analysis of the creative property right was carried out and its position relative to other subjects of the Russian Federation by types of derivatives was revealed. The analysis of the development of African agglomerations in the countries of origin revealed the possible direction of the development of African agglomerations, as well as the scale of the base for developing a solution to the problems of agglomeration development in the regions of the Russian Federation.

Keywords: urbanization, urban agglomeration, gentrification, suburbanization, traffic load, transregional traffic.

REFERENCES

1. Percik E.N. Geography of cities (Geourbanistics) [Geografiya gorodov (Geourbanistika)]. M.: Vysshaya shkola, 1991. 282 p. (rus)
2. Alekseev A.YU., Sokolova S.V., SHaposhnikov S.V. Modern experience in the formation of urban agglomerations [Sovremennyj opyt formirovaniya gorodskih aglomeracij]. Vestnik Universiteta 2014. No. 16. Pp. 88–92. (rus)
3. Pevsner N., Bridget C. London I: The Cities of London and Westminster. Rev. edition. London: Penguin; 1973. 709 p.
4. Suffolk Community College. Urbanization – When, Where and Why Did Urbanization Occur in Europe? 2012. URL: <http://www2.sunysuffolk.edu/westn/urban.html> (date of treatment: 10.10.2017).
5. The Guardian. Cities in Numbers: How Patterns of Urban Growth Change the World. 2015. URL: <https://www.theguardian.com/cities/2015/nov/23/cities-in-numbers-how-patterns-of-urban-growth-change-the-world> (date of treatment: 30.09.2019).
6. Ortuzar J.D., Willumsen L.G. "Modelling Transport, Third Edition", John Wiley & Sons Ltd., England. 2001. 499 p.
7. Agadzhanian A.V., Bludova S.N. Analysis of the development of urban agglomerations in foreign countries [Analiz razvitiya gorodskih aglomer-

acij v zarubezhnyh stranah] Proceedings of the international scientific and practical conference. Publisher: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov" (Nalchik)? 2019. Pp. 18–24. (rus)

8. Nikiforov A.V. The birth of suburban America. Social Consequences and Public Perception of the Suburbanization Process in the USA (Late 1940s–1950s) [Rozhdenie prigorodnoj Ameriki. Social'nye posledstviya i obshchestvennoe vospriyatie processa suburbanizacii v SSHA (konets 40-h–50-h gg. XX v.)]. M.: Editorial URSS. 2002. 356 p. (rus)

9. UN Habitat. The State of Latin American and Caribbean Cities 2012. Towards a New Urban Transition. United Nations Human Settlements Program. Nairobi: Earthscan publications; 2012. 160 p. (date of treatment: 15.09.2020).

10. Development of urban agglomerations. Analytical review. Issue 2. URL: <http://giprogor.ru/sites/default/files/Development%20urban%20agglomerations%20%20analytical%20review.%20Issue%20.pdf> (date of treatment: 12.05.2022)

11. Yolshina A.A. Urban agglomerations: theoretical problems and analysis of foreign experience. Modern scientific research and innovation. 2015. No. 7. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/07/56419>

12. America 2050.org. Megaregions. 2017. URL: <http://www.america2050.org/content/megaregions.html> (date of treatment 30.09.2017).
13. Afonin M.V. Pendulum migration as a factor of suburbanization [Mayatnikovaya migraciya kak faktor suburbanizacii]. Bulletin of socio-political sciences. 2012. No. 11. Pp. 14–19. (rus)
14. Parshuto E.V., Galyamov Y.Y. Theoretical aspects of the emergence and development of urban agglomerations [Teoreticheskie aspekty vozniknoveniya i razvitiya gorodskih aglomeracij]. Economics and Entrepreneurship. Tomsk. 2014. No. 11. (rus)
15. Ivankina N.A., Perkova M.V. The concept of new urbanism: prerequisites for development and main provisions [Konceptiya novogo urbanizma: predposylki razvitiya i osnovnye polozheniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 8. Pp. 75–84. (rus)
16. Perkova M.V. Urban development of the regional settlement system and its elements (on the example of the Belgorod region) [Gradostroitel'noe razvitie regional'noj sistemy rasseleniya i ee elementov (na primere Belgorodskoj oblasti)]. Dissertation for the registration degree of Doctor of Architecture. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. St. Petersburg. 2019. (rus)
17. Vuchik V.R. Transport in cities convenient for life. Per. from English. A. Kalinina; under scientific ed. M. Blinkina. M.: Territory of the Future, 2011. 576 p.
18. Gorbun Yu.V., Bondar A.S., Golovkin M.V., Borovskoy A.E. Research and formalization of data on the characteristics of transport flows [Issledovanie i formalizaciya dannyh o harakteristikah transportnyh potokov]. in Sat: Logistic audit of transport and supply chains. Materials of the III Intern. scientific and practical. conf. Tyumen, 2020. Pp. 50–58. (rus)
19. Perkova M.V., Ivankina N.A., Borovskoy A.E., Perkova A.Y. Analysis of the functioning of the transport infrastructure on the territory of the inter-municipal natural park in the Shebekinsky and Belgorod regions [Analiz funkcionirovaniya transportnoj infrastruktury na territorii mezhmunicipal'nogo prirodnogo parka v Shebekinskom i Belgorodskom rajonah]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 5. Pp. 53–63. (rus)
20. Lappo E.G. Urban agglomerations of Russia [Gorodskie aglomeracii Rossii]. URL: <https://polit.ru/article/2010/02/16/demoscope407/> (rus) (date of treatment: 06.07. 2022).
21. Ladik E.I. Regional features of the architectural and planning structure of the tourist and recreational territories of the Belgorod region: dissertation ... candidate of architecture: 05.23.22. Ladik Elena Igorevna; [Place of protection: St. Petersburg. state architecture. builds. university]. Belgorod. 2017. 167 p. (rus)

Received 12.05.2022

Information about the authors

Perkova, Alexandra Y. Master student. E-mail: alexandra.perkova2000@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Perkova, Margarita V. Doctor of Architecture, Professor. E-mail: perkova.margo@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46, Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russia, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russia

Ladik, Elena I. PhD, Assistant professor. E-mail: krushelnitskaya.lena@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Для цитирования:

Перькова А.Ю., Перькова М.В., Ладик Е.И. Формирование и развитие городских агломераций. Зарубежный и отечественный опыт // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 8. С. 71–84. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-71-84

For citation:

Perkova A.Yu., Perkova M.V., Ladik E.I. Formation and development of urban agglomerations. Foreign and domestic experience. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 8. Pp. 71–84. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-71-84

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-85-91

¹Никулин С.С., ¹Батурина Е.В., ^{1,*}Власова Л.А., ¹Рудыка Е.А., ²Никулина Н.С.¹Воронежский государственный университет инженерных технологий²Воронежский институт повышения квалификации сотрудников ГПС МЧС России

*E-mail: vllar65@yandex.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭМУЛЬСИОННЫХ КАУЧУКОВ

Аннотация. Синтетические полимерные материалы пользуются повышенным спросом благодаря их исключительным свойствам. Основными их потребителями являются шинная и резинотехническая индустрии. При выпуске синтетических каучуков отмечается потеря полимера в виде мелкодисперсной крошки каучука, образующейся на завершающей стадии их производства. Удаление этой крошки из сточных вод цехов выделения каучука из латекса является актуальной проблемой современности. В работе представлены результаты исследования по извлечению мелкодисперсной крошки каучука. Поставленная задача решена за счет использования в технологии аппарата для разделения водных фаз, что позволяет более полно и рационально использовать дорогостоящие продукты химического и нефтехимического производства, повысить производительность и экологичность производства, что обуславливает повышение техносферной безопасности в целом. Определены оптимальные скорости потока водных фаз, пропускаемых через спиральную ленту фильтрующего элемента, которая составляет 15–25 м/с. Отделенный водный поток, содержащий концентрированную мелкодисперсную крошку каучука, возвращается на стадию коагуляции бутадиен-стирольного латекса, а очищенная водная фаза после фильтрующего элемента собирается в отдельном сборнике и используется для приготовления растворов коагулирующего и подкисляющего агентов. Дополнительное введение мелкодисперсной крошки каучука в состав образующегося коагулюма не привело к ухудшению основных физико-механических показателей получаемых каучуков и вулканизатов. Предложенный способ очистки промышленных сточных вод позволяет повысить безопасность в техносфере.

Ключевые слова: латекс, коагуляция, сточные воды, очистка, крошка каучука

Введение. Объемы изготовления синтетических каучуков нарастают с каждым годом в связи с расширением области их применения благодаря их уникальным свойствам [1–3]. К сожалению, внедрение последних инновационных решений при производстве эмульгирующих и иницирующих систем и технологий не позволяет эффективно решить возникающие экологические проблемы, что приводит к снижению уровня техносферной безопасности [4–7]. Одной из проблематичных стадий при выпуске каучука эмульсионной полимеризацией является стадия его извлечения из латекса. На этой стадии в сбрасываемых сточных водах кроме компонентов эмульсионной системы, присутствует и мелкодисперсная крошка каучука. Потеря каучука в виде мелкодисперсной крошки приводит не только к снижению производительности процесса, но и утрате ценного углеводородного сырья [8]. Кроме того, содержащаяся мелкодисперсная крошка каучука в сбрасываемых из цехов выделения эмульсионных полимеров водах, не задержанная на очистных сооружениях, поступает в природные водоемы, что приводит к повышению экологических рисков.

Поэтому с практической точки зрения повышение эффективности улавливания мелкодисперсной крошки каучука и рекуперация её в технологическом процессе позволит не только снизить потери каучука с серумом, промывными и отжимными водами, и как следствие уменьшить материальные вложения в сырьевую базу производства синтетических полимеров, сократить энергопотребление, но и решить вопросы экологического характера.

В источнике [9] было рекомендовано в технологии получения синтетического каучука, производимого эмульсионной полимеризацией, с целью повышения техносферной безопасности использовать очищенную от загрязнений эмульсионной составляющей и возвратной полимерной фракции промышленную воду, отводимую из технологического процесса синтеза каучука на очистку.

Извлечение частиц каучука осуществлялось пропусканием водной фазы через фильтрующее устройство с последующей рекуперацией потока серума, с концентрированной в нем извлеченной полимерной крошкой, на стадию коагуляции латекса, а отфильтрованный поток промывных-отжимных вод направлялся на промывку полимера.

Очистка сточных вод проводилась с выдерживанием турбулентности водяного потока в диапазоне 30000–180000 ед. Рейнольдса.

Неблагоприятными моментами данной технологии являются повышенные объемы умягченной воды при промывке каучука, потери компонентов стабилизирующей системы, недостаточно полное извлечение целевого продукта из латексной дисперсии.

В другой технологии производства эмульсионного синтетического каучука [10] было предложено проводить концентрирование крошки каучука, содержащейся в серумной, промывной и отжимной водах путем прокачки водных потоков через разделитель фаз. Серумную воду, обогащенную мелкодисперсной крошкой полимера, возвращают на стадию коагуляции, а фильтрат направляют на приготовление растворов коагулирующих агентов. Избыток воды сбрасывают на биологическую очистку. Однако нужно отметить существенный недостаток данной технологии: поры фильтра забиваются мельчайшими частицами крошки полимера и остатками компонентов эмульсионной системы, сокращая рабочий цикл между чистками (250–300 часов), что происходит в следствии снижения скорости потока воды в очистительном устройстве.

В данной работе представлено технологическое решение, позволяющее стабилизировать процесс извлечения мелкой крошки выделяемого каучука из латекса и повысить техносферную безопасность при производстве синтетических каучуков.

Основная часть. Поставленная цель достигается за счет использования в технологическом

процессе разделителя фаз, в котором происходит концентрирование крошки каучука и её возврат в технологический процесс. Очищенная от крошки водная фаза направляется на биологическую очистку. Наилучшие результаты достигаются при выдерживании скоростного режима концентрации 15–25 м/с в агрегате для отделения водной дисперсии сконцентрированной крошки каучука от очищенной воды [10].

Аппарат для концентрирования крошки каучука и отделения ее от серума и промывных вод представляет собой совокупность следующих элементов: цилиндрический корпус и установленный соосно фильтрующий элемент, входной и выходные патрубки, спиральная лента с шагом навивки уменьшающимся от входа к выходу (рис. 1).

В соответствии с предлагаемой технологией водная фаза, с присутствующей в ней мелкодисперсной крошкой каучука, вводится в патрубок 3 и омывает спиральную ленту с фильтрующим элементом с установленной скоростью. Фильтрующая перегородка представляет жесткий сетчатый стакан, наружная поверхность которого покрыта слоем фильтрующего элемента. При этом происходит отделение очищенной водной фазы, которая удаляется через патрубок 6, в приемную емкость и в дальнейшем рекуперируется на стадии подготовки растворов флокулирующего и подкисляющего агентов. Водная дисперсия крошки удаляется через патрубок 5 и направляется на стадию формирования крошки каучука для смешения с основной его массой.

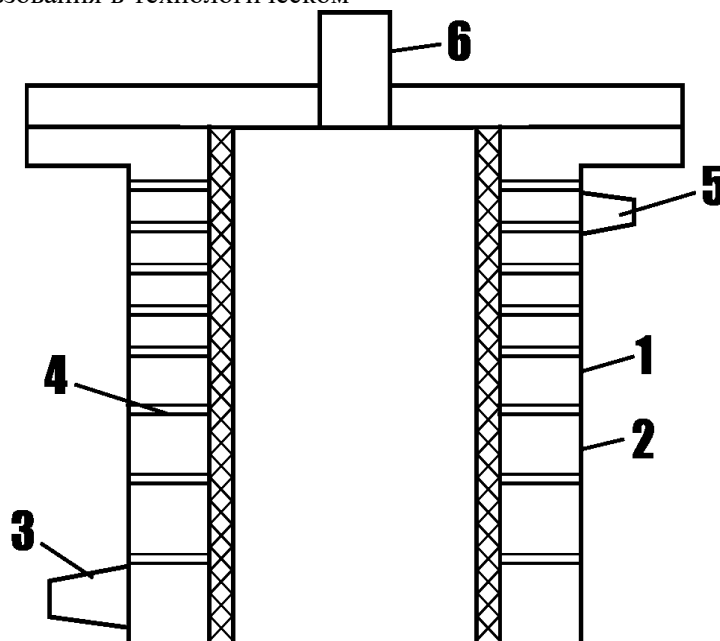


Рис. 1. Аппарат для разделения водных фаз

1 – цилиндрический корпус; 2 – фильтрующий элемент; 3, 5, 6 – патрубок; 4 – спиральная лента

На всем протяжении движения водной фазы сохраняется высокая требуемая скорость движения потоков, благодаря чему увеличивается рабочий цикл между чистками фильтра. Скорость движения потока сохраняется благодаря тому, что расстояние шага витков уменьшается от входа к выходу с учетом отвода очищенной воды через патрубок 6. Скорость потока контролируется расходомером, установленным после патрубка 5.

Благодаря высокой скорости потока увеличивается рабочий цикл между чистками фильтра до трех месяцев. При реализации способа по

изобретению N 2048476 необходимо вскрывать и подвергать очистке фильтры через каждые 10–15 дней. Это связано с резким уменьшением турбулентности и скорости очищаемого потока концентрата к выходу из устройства для разделения фаз, что приводит к прилипанию полимерной крошки на фильтрующий элемент, особенно в верхней его части.

Данные по влиянию скорости потока на продолжительность работы аппарата по разделению водных фаз в предложенном технологическом решении приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Влияние скорости потока серума на эффективность работы аппарата для разделения

Показатели	Скорость потока концентрата на выходе, м/с				
	10	15	20	25	30
Подача серума в разделитель фаз, м ³ /ч	30	45	60	75	90
Выход концентрата из разделителя фаз, м ³ /ч	20	30	40	50	60
Выход фильтрата из разделителя фаз, м ³ /ч	10	15	20	25	30
Массовое соотношение концентрат/фильтрат	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Продолжительность работы аппарата для разделения фаз до чистки, сутки	60	72	80	86	88

Таблица 2

Влияние скорости потока промывной воды на эффективность работы аппарата для разделения

Показатели	Скорость потока концентрата на выходе, м/с				
	10	15	20	25	30
Подача промывной воды в разделитель фаз, м ³ /ч	24	36	48	60	72
Выход концентрата из разделителя фаз, м ³ /ч	6	9	12	15	18
Выход фильтрата из разделителя фаз, м ³ /ч	18	27	36	45	54
Массовое соотношение концентрат/фильтрат	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Продолжительность работы разделителя фаз до чистки, сутки	66	80	83	86	90
Степень отмывки каучука от коагулянтов, %	90	90	92	88	89
Содержание золы в каучуке, %	0,37	0,39	0,40	0,38	0,41

На рис. 2 представлена технологическая схема выделения каучука из латекса с использованием предлагаемого устройства: исходная

эмульсия латекса, коагулянты и подкисляющий агент поступают на стадию коагуляции в аппарат 1.

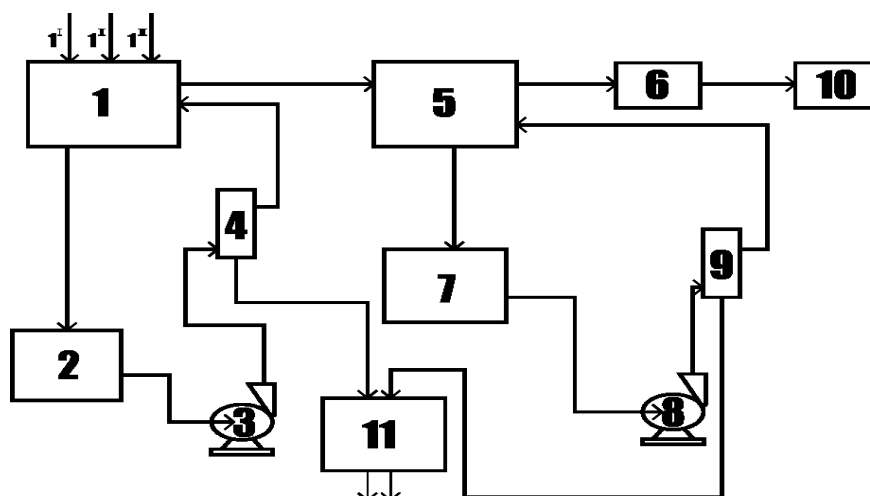


Рис. 2. Выделение каучука из латекса с использованием предлагаемого разделителя фаз

1 – аппарат коагуляции; 2, 7 – емкости для сбора серумной воды; 3, 8 – насосы; 4, 9 – аппараты для разделения водных фаз; 5 – аппарат для отмывки каучука; 6 – отжимная машина; 10 – ленточная сушилка; 11 – сборник очищенной воды

Образующаяся серумная вода поступает в емкость 2, откуда насосом 3 перекачивается в аппарат для разделения водных фаз 4. Далее водная дисперсия мелкой крошки каучука возвращается на коагуляцию в аппарат 1, а очищенная вода собирается в сборнике 11, откуда частично подается на приготовление водных растворов коагулянтов и серной кислоты, а частично направляется в химзагрязненную канализацию.

Сформированная крошка каучука поступает на отмывку в аппарат 5, после чего направляется на отжимную машину 6 и удаление оставшейся влаги в ленточную сушилку 10. Промывная вода, содержащая небольшое количество мелкодисперсной крошки каучука, собирается в сборник 7, откуда насосом 8 вводится в аппарат для разделения водных фаз 9. Затем очищенная вода направляется в сборник 11. Откуда по одному из потоков водная фаза направляется на пригото-

вление коагулирующих и подкисляющего агентов. Другой поток отводится в химзагрязненную канализацию.

Выделение каучука марок СКС-30 АРКП, СК(М)С-30 АРК осуществляют растворами белкового гидролизата, хлористого натрия, полимерных четвертичных солей аммония (ВПК-402, суперфлок и др.) [11–15].

В процессе обезвоживания полимера в отжимной машине образуется водная фаза в количестве 1,0 м³/т каучука. Производительность одной производственной линии по каучуку составляет 32 т/смену.

При использовании предложенного способа рекуперации мелкодисперсной крошки каучука требовалась провести оценку основных физико-механических показателей получаемого каучука и вулканизатов, приготовленных на его основе (табл. 3). Изготовление резиновых смесей и вулканизатов осуществляли по общепринятой рецептуре на стандартном оборудовании.

Таблица 3

Свойства каучуков и вулканизатов на основе каучука марки СКС-30 АРК

Показатели	1	2	Требования по ГОСТ 15627-2019
Вязкость по Муни каучука	51,0	52,0	45-58
Массовая доля органических кислот, %	6,2	6,1	5-7
Массовая доля мыл органических кислот, %	0,12	0,11	не более 0,3
Потеря массы при сушке, %	0,19	0,18	–
Массовая доля золы, %	0,25	0,23	не более 0,6
Условное напряжение при 300 % удлинении, МПа	13,1	13,3	не менее 13
Условная прочность при растяжении, МПа	24,9	25,8	не менее 22,5
Относительное удлинение при разрыве, %	530	550	не менее 420
Относительная остаточная деформация после разрыва, %	16	15	–
Коэффициент старения :по прочности / по относительному удлинению	0,69/0,42	0,65/0,50	–

Примечание : 1 – каучук без мелкодисперсной крошки каучука; 2 – каучук с мелкодисперсной крошкой каучука.

Результаты показали, что по всем основным показателям каучуки и вулканизаты соответствуют требованиям ГОСТ 15627-2019 «Каучуки синтетические бутадиен-метилстирольный СКМС – 30АРК и бутадиен-стирольный СКС-30АРК».

Таким образом, рекуперация мелкодисперсной крошки каучука в технологическом процессе не нарушает процесс производства эмульсионных каучуков и обеспечивает рациональное использование водных ресурсов за счет частичного возврата очищенной водной фазы для приготовления растворов коагулирующих и подкисляющих агентов. Учитывая тот факт, что в серуме присутствует хлорид натрия, используемый в качестве коагулирующего агента для снижения агрегативной устойчивости латексных дисперсий,

применение данной водной фазы будет способствовать снижению общего расхода солевого компонента в технологии выделения каучука из латекса.

Выводы. Применение аппарата для разделения водных потоков позволяет повысить технологическую безопасность при производстве эмульсионных каучуков, исключая попадание значительного количества мелкодисперсной крошки в природные водоемы.

Выдерживании скоростного режима концентрации на уровне 15–25 м/с в агрегате для разделения водных потоков обеспечивает уменьшение загрязнения фильтрующего элемента рекуперационной крошкой полимера, что в конечном итоге способствует повышению срока эксплуатации данного аппарата до трех месяцев между его очистками.

Дополнительное введение в крошку получаемого каучука рекуперированной мелкодисперсной каучуковой фракции не приводит к снижению показателей, получаемых вулканизатов.

Ввод в технологическую схему производства эмульсионных каучуков разделителя фаз, для очистки сбрасываемых из цехов выделения полимеров из латексов сточных вод, позволяет более полно и рационально использовать дорогостоящие продукты химического и нефтехимического производства, повысить производительность и экологичность производства, что обуславливает повышение техносферной безопасности в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С., Горбаткин Ю.А., Крыжановский В.К., Куперман А.М., Симонов-Емельянов И.Д., Халиулин В.И., Бунаков В.А. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология : учеб. пособие. СПб.: ЦОП «Профессия», 2011. 560 с.
2. Николаев А.Ф., Крыжановский В.К., Бурлов В.В. Технология полимерных материалов. СПб: ЦОП Профессия, 2011. 536 с.
3. Папков В.Н., Ривин Э.М., Блинов Е.В. Бутадиен-стирольные каучуки. Синтез и свойства. Воронеж: ВГУИТ, 2015. 315 с.
4. Аверко-Антонович Л.А., Аверко-Антонович Ю.О., Давлетбаева И.М., Кирпичников П.А. Химия и технология синтетического каучука. М.: Химия, КолосС, 2008. 357 с.
5. Дюмаев К.М., Никулин С.С., Туэрос Х.В.К., Пояркова Т.Н., Мисин В.М. Экологические и экономические аспекты внедрения полимерных коагулянтов в процесс выделения промышленных эмульсионных каучуков // Вода: химия и экология. 2013. № 5 (59). С. 40–44.
6. Никулин С.С., Корнехо туэрос Х.В., Пояркова Т.Н., Мисин В.М. Сточные воды производства эмульсионных каучуков с пониженным содержанием техногенных загрязнений // Промышленное производство и использование эластомеров. 2012. № 4. С. 43–45.
7. Шульгина Ю.Е., Никулин С.С. Физические и акустические воздействия в производстве каучуков : монография. Изд-во: LAP LAMBERT Akademik Publishing, 2017. 108 с.
8. Распопов И.В., Никулин С.С., Гаршин А.П., Рыльков А.А., Фазлиахметов Р.Г. Совершенствование оборудования и технологии выделения бутадиен-(альфа-метил) стирольных каучуков из латексов. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1997. 68 с.
9. Патент N 2048476 РФ, МКИ С 08 С 1/00, Способ выделения синтетического каучка из латекса. Николаев А.Г., Седых В.А., Анферов В.А., Распопов И.В., Инцков Е.В., опубл. 20.11.95. Бюл. № 32. 9 с.
10. Патент N 2144542 С1 РФ, МПК С 08 С 1/00. Способ выделения синтетических эмульсионных каучуков. Распопов В.И. Распопов И.В., Никулин С.С., опубл. 20.01.2000. Бюл. № 2. 8 с.
11. Шульгина Ю.Е. Экологический аспект получения эмульсионного бутадиен-стирольного каучука в присутствии четвертичных солей аммония // European social science Journal. 2014. Т. 2, № 3(42). С 539–543.
12. Nikulin S.S., Poyarkova T.N., Misin V.M. Coagulation of butadiene-styrene latex with poly-N,N -dimethyl-2-hydroxypropylenammonium chloride // Russian Journal of Applied Chemistry. 2004. Vol. 7. No 6. Pp. 983–987.
13. Nikulin S.S., Verezhnikov V.N., Poyarkova T.N., Shmyreva Z.V. 2,2,4 – trimethyl – 1,2-dihydroquinoline hydrochloride as coagulant for butadiene-styrene latex // Russian Journal of Applied Chemistry. 2003. Vol. 76. No 8. Pp. 1319–1322.
14. Misin V.M., Nikulin S.S. Technological and ecological aspects of the practical application of quaternary ammonium salts in Russia in production of synthetic emulsion rubbers. В книге: Monomers, oligomers, polymers, composites and nanocomposites research. USA. 2009. Pp. 351–359.
15. Nikulin S.S., CornejoTueros J.V., Poyarkova T.N. Specific features of rubber recovery from latex with poly -N,N-dimethyl-N,N- diallylammonium chloride in the presence of cotton fiber // Russian Journal of Applied Chemistry. 2012. Vol. 85. No 6. Pp. 984–987.

Информация об авторах

Никулин Сергей Саввович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии органических соединений, переработки полимеров и техносферной безопасности. E-mail: nikulin.nikuli@yandex.ru.

Батурина Елена Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии органических соединений, переработки полимеров и техносферной безопасности. E-mail: baturina1717@mail.ru. Воронежский государственный университет инженерных технологий. Россия, 39400, г. Воронеж, проспект Революции, д. 19.

Власова Лариса Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии органических соединений, переработки полимеров и техносферной безопасности. E-mail: vllar65@yandex.ru. Воронежский государственный университет инженерных технологий. Россия, 394000, г. Воронеж, проспект Революции, д. 19.

Рудыка Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии органических соединений, переработки полимеров и техносферной безопасности. E-mail: calidahieme@gmail.com. Воронежский государственный университет инженерных технологий. Россия, 39400, г. Воронеж, проспект Революции, д. 19.

Никулина Надежда Сергеевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры специальной подготовки. E-mail: nikulin.nikuli@yandex.ru Воронежский институт повышения квалификации сотрудников ГПС МЧС России. Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231.

Поступила 25.04.2022 г.

© Никулин С.С., Батурина Е.В., Власова Л.А., Рудыка Е.А., Никулина Н.С., 2022

¹Nikulin S.S., ¹Baturina E.V., ^{1,*}Vlasova L.A., ¹Rudyka E.A., ²Nikulina N.S.

¹Voronezh State University of Engineering Technologies

²Voronezh Institute of qualification improvement of employees of state fire service of EMERCOM of Russia

*E-mail: vllar65@yandex.ru

ENSURING TECHNOSPHERE SAFETY IN THE PRODUCTION OF EMULSION RUBBERS

Abstract. Synthetic polymer materials are in high demand due to their exceptional properties. Their main consumers are the tire and rubber industries. When producing synthetic rubbers, there is a loss of polymer in the form of fine crumb rubber, which is formed at the final stage of their production. Today, the removal of this crumb from the wastewater of latex rubber extraction plants is an urgent issue. The results of a study on the extraction of fine rubber crumbs are presented. The task is solved by using an apparatus for separating water phases in the technology, which allows more complete and rational use of expensive products of chemical and petrochemical production, increase productivity and environmental friendliness of production, which leads to an increase in technosphere safety in general. The optimal flow rates of aqueous phases passed through the spiral belt of the filter element, which is 15–25 m/s, have been determined. The separated water stream containing concentrated fine rubber crumb is returned to the styrene-butadiene latex coagulation stage. The purified water phase after the filter element is collected in a separate collector and used to prepare solutions of coagulating and acidifying agents. The additional introduction of finely dispersed rubber crumbs into the composition of the resulting coagulum do not lead to a deterioration in the basic physical and mechanical properties of the resulting rubbers and vulcanizates. The proposed method for industrial wastewater treatment improves safety in the technosphere.

Keywords: latex, coagulation, wastewater, cleaning, rubber crumb

REFERENCES

1. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S., Gorbatskiy Yu.A., Kryzhanovskiy V.K., Kuperman A.M., Simonov-Emelyanov I.D., Khaliulin V.I., Bunakov V.A. Polymer composite materials: structure, properties, technology [Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya]. St. Petersburg: PSC "Profession", 2011. 560 p. (rus)
2. Nikolaev A.F., Kryzhanovskiy V.K., Burlov V.V. Technology of polymer materials [Tekhnologiya polimernykh materialov]. SPb: PSC Profession, 2011. 536 p. (rus)
3. Papkov V.N., Rivin E.M., Blinov E.V. Styrene butadiene rubbers. Synthesis and properties [Butadien-stirol'nye kauchuki. Sintez i svoystva]. Voronezh: VSUIT, 2015. 315 p. (rus)
4. Averko-Antonovich L.A., Averko-Antonovich Yu.O., Davletbaeva I.M., Kirpichnikov P.A. Chemistry and technology of synthetic rubber [Himiya i tekhnologiya sinteticheskogo kauchuka]. Moscow: Chemistry, Kolos, 2008. 357 p. (rus)
5. Dyumaev K.M., Nikulin S.S., Tueros H.V.K., Poyarkova T.N., Misin V.M. Ecological and economic aspects of the introduction of polymeric coagulants into the process of isolation of industrial emulsion rubbers [Ekologicheskie i ekonomicheskie aspekty vnedreniya polimernykh koagulyantov v process vydeleniya promyshlennykh emul'sionnykh kauchukov]. Water: chemistry and ecology. 2013. No. 5 (59). Pp. 40–44. (rus)
6. Nikulin S.S., Cornejo tueros H.V., Poyarkova T.N., Misin V.M. Wastewater from the production of emulsion rubbers with a reduced content of technogenic pollution [Stochnye vody proizvodstva emul'sionnykh kauchukov s ponizhennym soderzhanietekhnogennykh za-gryaznenij]. Industrial production and use of elastomers. 2012. No. 4. Pp. 43–45. (rus)
7. Shulgina Yu.E., Nikulin S.S. Physical and acoustic influences in the production of rubbers: monograph [Fizicheskie i akusticheskie vozdejst-

viya v proizvodstve kauchukov: monografiya]. Publisher: LAP LAMBERT Akademik Publishing, 2017. 108 p. (rus)

8. Raspopov I.V., Nikulin S.S., Garshin A.P., Rylkov A.A., Fazliakhmetov R.G. Improvement of equipment and technology for the extraction of butadiene-(alpha-methyl) styrene rubbers from latexes [Sovershenstvovanie oborudovaniya i tekhnologii vydeleniya butadien-(al'fa-metil)stirool'nyh kau-chukov iz lateksov]. M.: TsNIITeneftkhim, 1997. 68 p. (rus)

9. Nikolaev A.G., Sedykh V.A., Anferov V.A., Raspopov I.V., Intskov E.V. Method for isolating synthetic rubber from latex. Patent RF, no. 2048476, 1995.

10. Raspopov V.I., Raspopov I.V., Nikulin S.S. Method for isolating synthetic emulsion rubbers. Patent RF, no. 2144542, 2000.

11. Shulgina Yu.E. Ecological aspect of obtaining emulsion styrene-butadiene rubber in the presence of quaternary ammonium salts [Ekologicheskij aspekt polucheniya emul'sionnogo butadien-stirool'nogo kauchuka v prisutstvii chet-vertichnyh solej ammoniya]. European social science Journal. 2014. Vol. 2, No. 3(42). Pp 539–543.

12. Nikulin S.S., Poyarkova T.N., Misin V.M. Coagulation of butadiene-styrene latex with poly-N,N-dimethyl-2-hydroxypropylenammonium chloride. Russian Journal of Applied Chemistry. 2004. Vol. 77. No. 6. Pp. 983–987. DOI:10.1023/B:RJAC.0000044128.92513.2E

13. Nikulin S.S., Verezhnikov V.N., Poyarkova T.N., Shmyreva Z.V. 2,2,4 – trimethyl – 1,2-dihydroquinoline hydrochloride as coagulant for butadiene-styrene latex. Russian Journal of Applied Chemistry. 2003. Vol. 76. No. 8. Pp. 1319–1322. DOI:10.1023/B:RJAC.0000008310.48483.79

14. Misin V.M., Nikulin S.S. Technological and ecological aspects of the practical application of quaternary ammonium salts in production of synthetic emulsion rubbers in Russia. In the book: Monomers, oligomers, polymers, composites and nanocomposites research. USA, 2009. Pp. 351–359. DOI:10.23939/CHCCT02.02.147

15. Nikulin S.S., Comejo Tueros J.V., Poyarkova T.N. Specific features of rubber recovery from latex with poly-N,N-dimethyl-N,N'-diallylammonium chloride in the presence of cotton fiber. Russian Journal of Applied Chemistry. 2012. Vol. 85. No. 6. Pp. 984–987. DOI:10.1134/S1070427212050962

Information about the author

Nikulin, Sergey S. DSc, Professor. E-mail: nikulin.nikuli@yandex.ru. Voronezh State University of Engineering Technologies. Military training and research center of the air force "air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Gagarin. Russia, 394036, Voronezh, Revolution Avenue, 19.

Baturina, Elena.V. PhD, Assistant professor. E-mail: baturina1717@mail.ru. Voronezh State University of Engineering Technologies. Russia, 394036, Voronezh, Revolution Avenue, 19. Voronezh state University of engineering technologies. 19 Revolyutsii Prospekt, Voronezh, 394036, Russia.

Vlasova, Larisa A. PhD, Assistant professor. E-mail: vllar65@yandex.ru. Voronezh State University of Engineering Technologies. Russia, 394036, Voronezh, Revolution Avenue, 19. Voronezh state University of engineering technologies. 19 Revolyutsii Prospekt, Voronezh, 394036, Russia.

Rudyka, Elena A. PhD, Assistant professor. E-mail: alidahieme@gmail.com. Voronezh State University of Engineering Technologies. Russia, 394036, Voronezh, Revolution Avenue, 19. Voronezh state University of engineering technologies. 19 Revolyutsii Prospekt, Voronezh, 394036, Russia.

Nikulina, Nadezhda S. PhD, senior lecturer. E-mail: noodi-on-sky@mail.ru. Voronezh Institute of qualification improvement of employees of state fire service of EMERCOM of Russia. 231 Krasnoznamennaya str., Voronezh, 394052, Russia.

Received 25.04.2022

Для цитирования:

Никulin С.С., Батурина Е.В., Власова Л.А., Рудыка Е.А., Никулина Н.С. Обеспечение техносферной безопасности при производстве эмульсионных каучуков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 8. С. 85–91. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-85-91

For citation:

Nikulin S.S., Baturina E.V., Vlasova L.A., Rudyka E.A., Nikulina N.S. Ensuring technosphere safety in the production of emulsion rubbers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 8. Pp. 85–91. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-85-91

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-92-102

Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Сычев Е.А., Обернихин А.А.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: anciferov.sergey@gmail.com*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СТАНИНЫ КОНУСНОЙ ДРОБИЛКИ

Аннотация. В данной статье рассмотрено состояние направления дробления материалов в горнорудной промышленности. Приведена методика статического расчета на прочность станины конусной дробилки КСД – 900 в двух положениях. Рассмотрено применение машины на различных этапах дробления. Проведено сравнение с другими дробилками горнорудной промышленности. Описана конструкция и принцип действия цифрового двойника конусной дробилки среднего дробления. Приведены достоинства и недостатки машины. Рассмотрен метод конечных элементов CAD/CAM/CAE-системы NX и модуль «Расширенная симуляция». Описана значимость инженерного анализа в настоящее время. Приведены расчётные схемы станины конусной дробилки в нескольких статических положениях: в момент поднятия неподвижного конуса и крышки, при попадании не дробимого материала и при опущенном неподвижном конусе и крышки конусной дробилки. Показана идеализация станины в CAD/CAM/CAE-системе NX и модуль «Расширенная симуляция» конусной дробилки для уменьшения нагрузки на расчётную машину, что приведёт к сокращению времени расчёта модели. Представлены таблицы внешних нагрузок под собственным весом рабочих узлов машины. Показан расчёт сравнения максимальных расчётных напряжений с допускаемыми для выбранного материала и определения коэффициента запаса прочности станины.

Ключевые слова: конусная дробилка, дробление, расширенная симуляция, расчётная схема, идеализация, симуляция, CAD/CAM/CAE-система NX, PLM-система Teamcenter, проектирование, сборка, жизненный цикл изделия, станина.

Введение. При производстве строительных материалов и изделий исходные материалы могут достигать размеров до 1500 мм, ввиду этого они подвергаются дроблению. Дробление подразделяется на три вида в зависимости от размеров исходного куска руды – крупное, среднее, мелкое [1].

Практически на всех этапах дробления широкое распространение получили конусные дробилки, в которых раздавливание материалов осуществляется между неподвижным и подвижным конусами. Конусные дробилки применяются для измельчения материалов любого типа: глинистых руд, со слоистым и плитчатым строением куска. Также одними из преимуществ конусных дробилок является возможность их работы «под завалом» (т.е. с рабочим объемом, полностью занятым горной породой, поступающей с расположенного выше бункера).

Конусные дробилки являются сложными техническими системами и для их проектирования применяются системы автоматизированного проектирования, на стадиях разработки, инженерного анализа и подготовки к изготовлению. Высокую значимость при проектировании конусных дробилок несет этап инженерного анализа, который осуществляется с помощью систем инженерного анализа (CAE-системы), в частности NX «Расширенная симуляция».

NX Расширенная симуляция – это модуль CAD/CAM/CAE-системы NX, позволяющий выполнять статические, кинематические, динамические расчеты механики деформируемого твердого тела, а также расчеты гидрогазодинамики. NX Расширенная симуляция использует численные методы анализа, основным из которых является метод конечных элементов, заключающийся в дискретизации геометрической модели изделия на конечные элементы и последующее решение системы дифференциальных уравнений [2, 3].

Большую значимость при выполнении инженерного анализа представляет статический линейный анализ, в ходе которого определяются напряжения, деформации, перемещения и реакции опор, возникающие в конструкции под действием нагрузок постоянных во времени [4].

Материал. Данная работа была выполнена в лицензионном программном обеспечении студенческой версии CAD/CAM/CAE-системы NX.

Конусная дробилка — это высокопроизводительная машина, которая широко применяется для измельчения сырья в горнорудной промышленности. Материал подаётся через питатель, который подаётся в рабочую камеру при помощи питающего бункера. Процесс измельчения материала проходит в камере дробления и сопровождается раздавливанием и частично истиранием его между двумя металлическими конусами: подвижный внутренний и неподвижный внешний.

После того, как материал достиг необходимого гранулометрического состава, он падает вниз под действием силы тяжести, в разгрузочное отверстие [5, 6].

По функциональным и техническим качествам выделяют следующие типы конусных дробилок: конусная дробилка крупного дробления (ККД), конусная дробилка среднего дробления (КСД) и конусная дробилка мелкого дробления

(КМД). Классифицировать машины данным типом принято исходя из крупности конечного продукта: мелкое – от 3-5 до 30 мм, среднее – от 30 до 300 мм, крупное – от 300 до 1500 мм [6].

При выполнении статического расчёта на прочность станины, методом конечных элементов, мы использовали цифровой двойник конусной дробилки КСД – 900.

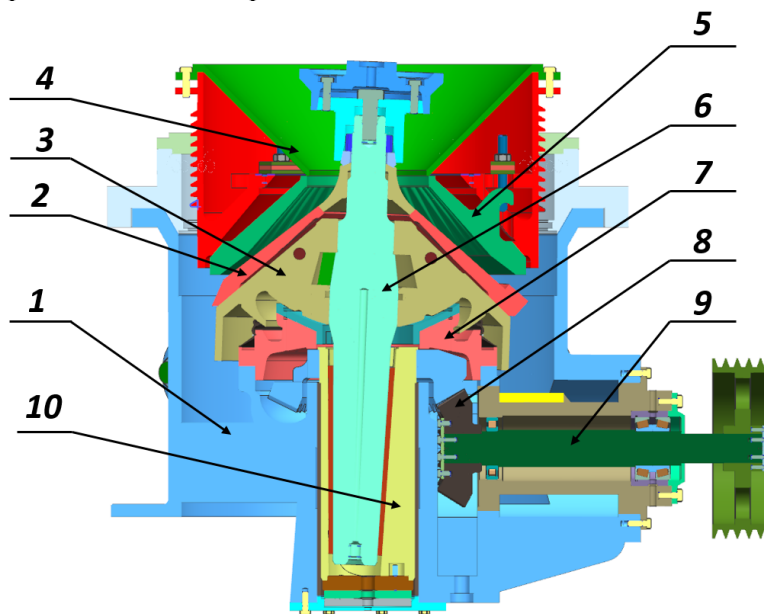


Рис. 1. Схема конусной дробилки:

- 1 – станина; 2 – броня конуса; 3 – дробящий конус; 4 – загрузочное отверстие; 5 – неподвижный конус; 6 – эксцентриковый вал; 7 – сферический подпятник; 8 – коническая зубчатая передача; 9 – приводной вал; 10 – эксцентриковый узел

Цифровой двойник конусной дробилки КСД – 900 состоит из следующих основных узлов станины (1) на которой в нижней части установлен эксцентриковый узел (10), в нём жёстко закреплён эксцентриковый вал (6). Также в нижней части станины (1) лежит сферический подпятник, который смазывает при работе жёстко закреплённый дробящий конус (3). На дробящем конусе (3) лежит броня конуса (2). В верхней части станины, закреплён неподвижный конус (5). Материал для дробления поступает в рабочую область машины через загрузочное отверстие (4). Приводом дробилки является электродвигатель, который приводит в действие шнек и приводной вал (9). На конце приводного вала находится коническая зубчатая передача (8), которая приводит в действие эксцентриковый узел (10).

Конусная дробилка в отличие от щёковой имеет ряд значительных преимуществ, в отличие от недостатков. Преимуществом конусной дробилки над щёковой является наличие холостого хода у второй. При дроблении, в момент того как рабочая щека дробилки отходит назад, машина не выполняет своей прямой функции дробления

в отличие от конусной дробилки, в которой дробление происходит постоянно [7, 8].

Если продолжать сравнивать эти две машины, то ещё одним главным преимуществом будет тот фактор, что у конусной дробилки будет наименьший расход энергии. Этот вывод вытекает из-за отсутствия холостого хода. Конусная дробилка потребляет при своей работе энергию постоянно, но это обуславливается её высоким КПД.

По мимо того, что конусная дробилка имеет более высокую производительность, она ещё отличается от щёковой более спокойным ходом при активной работе. Это сопровождается минимальными динамическими нагрузками так как дробление в рабочей камере осуществляется непрерывно в течении всего оборота подвижного конуса.

Одними из основных недостатков конусных дробилок является высокая металлоёмкость и сложность ремонта. Масса щёковой дробилки, как и металлоёмкость в отличие от конусной меньше, что ставит новые задачи инженерам-конструкторам. Уменьшить металлоемкость и

упростить ремонт машины, чтобы не снизить необходимые показатели для более высокой производительности машины.

Методика. Для выполнения поставленных целей инженеру конструктору необходимо применить высокоточные расчёты на прочность [9, 10]. Одним из таких является метод конечных элементов в CAD/CAM/CAE системе NX. При помощи данного метода возможно получить высокоточные результаты при расчёте. За счёт этого данный метод нашёл применение в механике для определения напряжений и деформаций.

Опишем этапы выполнения расчёта напряжения станины конусной дробилки:

1. Сбор информации о нагрузках;
2. Составление расчётной схемы в двух положениях, в соответствии с собранными нами нагрузками;
3. Идеализация геометрии станины;
4. Наложение материала для конечно элементной сетки
5. Наложение сетки на идеализированную геометрию станины;
6. Создание файла симуляции и приложение нагрузок на грани станины исходя из расчётной схемы
7. Выполнение расчёта
8. Анализ полученных данных расчёта.

Первым этапом для расчёта является сбор информации о нагрузках, действующих на станину конусной дробилки. Так как мы будем проводить расчёт в двух положениях, необходимо продумать какие нагрузки будут действовать на станину в двух положениях.

Вторым этапом для расчёта, является составление расчётной схемы. На ней необходимо показать соответствующие нагрузки и граничные условия. Расчетные схемы используются для создания моделей симуляции, результатом которых будет решение системы уравнений, которые описывают поведение модели при различных условиях её эксплуатации, то есть при заданных воздействиях и ограничениях [2, 11]. Расчетные модели создаются для двух случаев нагружения.

В первом положении, рассчитывается момент попадания в рабочую зону машины недробимого материала. При этом происходит поднятие предохранительным устройством узла неподвижного конуса и верхней крышки конусной дробилки. Для расчёта используются данные массы узлов, которые поднимает гидроцилиндры.

Во втором положении рассчитывается момент, когда гидроцилиндры принимают неактивное положение. В этот момент, учитывается нагрузка, воспринимаемая станиной под действием веса верхней крышки и неподвижного конуса дробилки.

Перед началом расчёта, необходимо составить расчётную схему станины конусной дробилки в положении в момент попадания недробимого материала в рабочую зону (рис. 2).

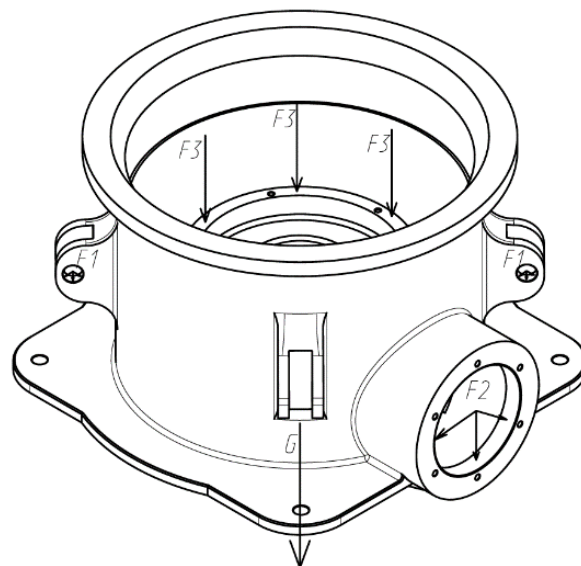


Рис. 2. Расчётная схема станины в первом положении

В данном расчете, в качестве внешних нагрузок были приняты (табл. 1): нагрузка, действующая на уши станины, передаваемая от предохранительного устройства $F_1 = 28477 \text{ Н}$; нагрузка от веса привода, приложенная в нижней части станины $F_2 = 5882 \text{ Н}$; нагрузка от веса подвижного конуса, действующая на постель $F_3 = 16012 \text{ Н}$; собственный вес рассчитываемой конструкции $G = 30900 \text{ Н}$.

Таблица 1

Значения внешних нагрузок

№ п/п	Наименование	Обозначение	Значение
1	Вес расчётной конструкции	G	30900 Н
2	Нагрузка на уши станины, передаваемая от предохранительного устройства	F_1	28477 Н
3	Нагрузка привода приложенная в нижней части станины	F_2	5882 Н
4	Нагрузка от подвижного конуса на постель	F_3	16012 Н

Далее составляется расчетная схема для второго положения, а именно в моменте, когда гидроцилиндры не активны (рис. 3).

В качестве внешних нагрузок в этом расчёте представлены (табл. 2): нагрузка, приложенная к верхней грани станины $F_1 = 28477 \text{ Н}$; нагрузка от веса привода, приложенная к нижней части станины $F_2 = 5882 \text{ Н}$; нагрузка от веса подвижного конуса, приложенная к постели $F_3 = 16012 \text{ Н}$; собственный вес рассчитываемой конструкции $G = 30900 \text{ Н}$.

После определения внешних нагрузок на станину дробилки необходимо подготовить расчётную модель конусной дробилки.

Следующим этапом необходимо произвести идеализацию геометрии модели станины. Идеализация геометрии – это удаление или замена элементов геометрии не оказывающих существенного влияния на конечный результат расчёта. Конечным результатом идеализации будет удаление фасок, скругления и неконструктивных

отверстий. Упрощение геометрии модели необходимо для сокращения времени расчета модели [12, 13].

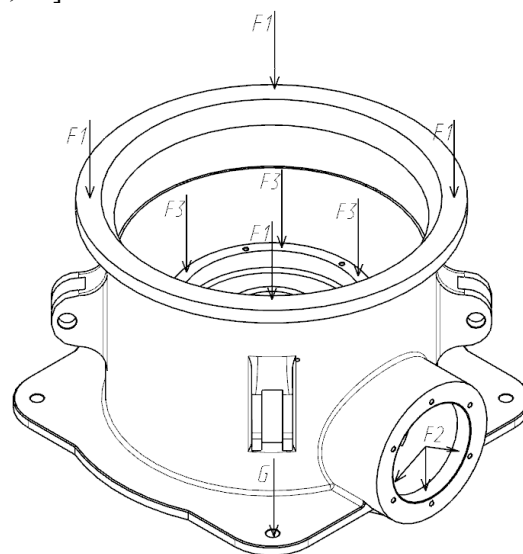


Рис. 3. Расчётная схема станины во втором положении

Таблица 2

Значение внешних нагрузок

№ п/п	Наименование	Обозначение	Значение
1	Вес расчётной конструкции	G	30900 Н
2	Нагрузка конструкции приложенный к верхней грани станины	F_1	28477 Н
3	Нагрузка привода приложенная в нижней части станины	F_2	5882 Н
4	Нагрузка от подвижного конуса на постель	F_3	16012 Н

Все действия, связанные с идеализацией геометрии, система NX проводит на ассоциативной копии мастер-модели – идеализированной модели. Это позволяет инженеру-конструктору в течении расчета множество раз изменять параметры идеализации с целью изменения конечного результата расчета

Перед проведением каких-либо действий в идеализированной модели, необходимо выполнить команду «Перенос» (рис. 4).

Результатом идеализации модели служит удаление скруглений и фасок со станины, которые не влияют на конечный результат расчёта (рис. 5).

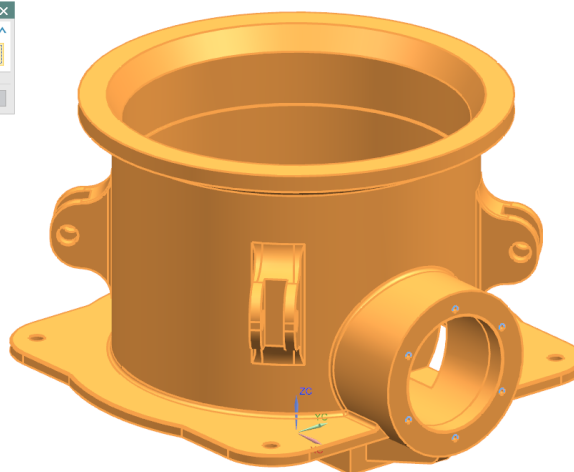
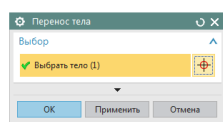


Рис. 4. Перенос геометрии станины перед идеализацией геометрии

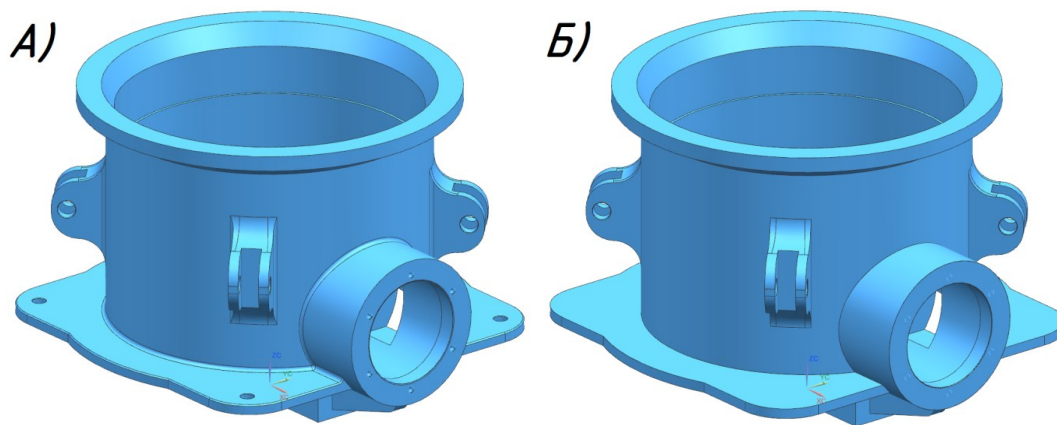


Рис. 5. Результат идеализации геометрии:
а – до идеализации геометрии; б – после идеализации геометрии

Перед непосредственным расчетом на прочность, для станины были заданы физические свойства на основе свойств материала, из которых выполнен и создан коллектор сеток. Ниже

приведена таблица материалов, из которых выполнена деталь.

Таблица 3

Физические свойств материалов заданной детали

№ п/п	Наименование детали	Материал	Характеристики материала
1	Станина	Сталь 110Г13Л ГОСТ 977-88	Плотность $\rho = 7830 \text{ кг/м}^3$; Модуль упругости $E = 2,12 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; Предел прочности при растяжении $\sigma_B = 490 \text{ МПа}$; Предел текучести $\sigma_T = 360-380 \text{ МПа}$. Твердость HB 186-229

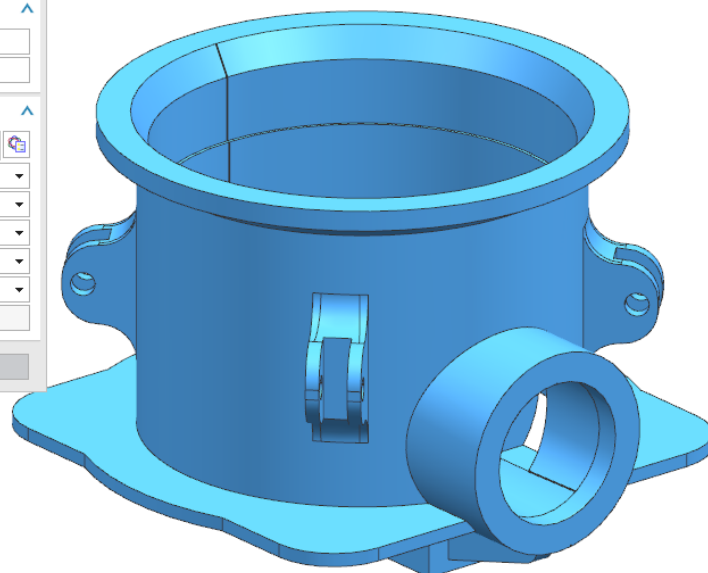
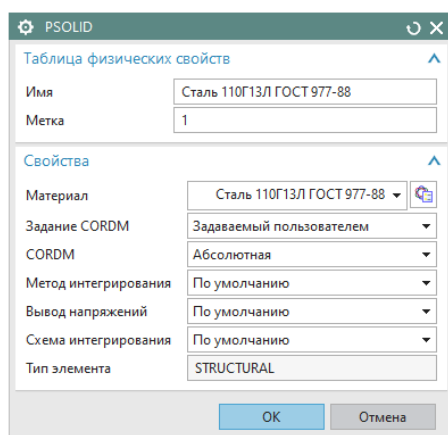


Рис. 6. Задание физических свойств сетки

От выбора сетки зависит точность конечного расчета. Также стоит отметить, что традиционно не существует строгого выбора типа

сетки. Все зависит от сложности геометрии рассчитываемой детали. Характеристика конечно-элементных моделей приведена в таблице 4.

Таблица 4

Характеристика конечно-элементных моделей

Имя детали	Тип КЭ сетки	Размер элемента
Станина	CTETRA(10)	(20)

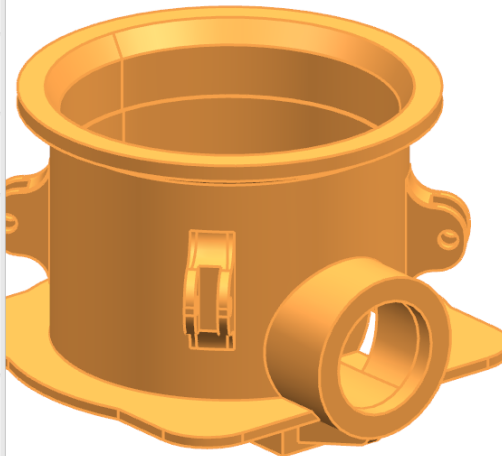
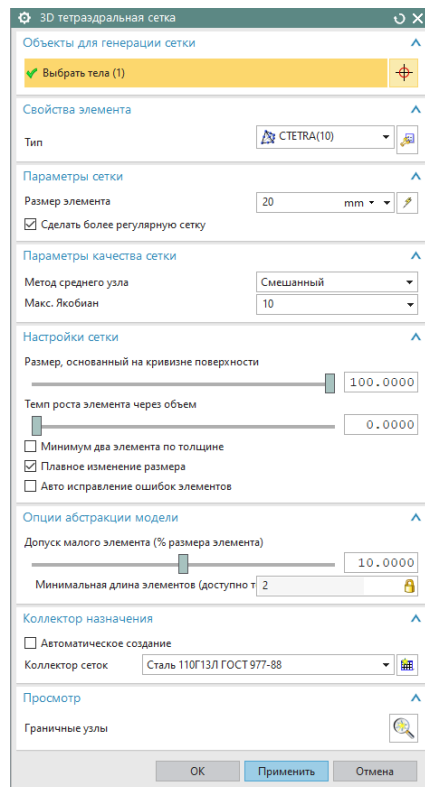


Рис. 7. Создание сетки конечных элементов

После создания КЭ сетки необходимо выполнить симуляцию в приложении для расчета NX Расширенная симуляция. Перед созданием симуляции в NX Расширенная симуляция необходимо открыть «Fem» файл модели станины и создать файл симуляции как показано на рисунке 8.

Следующим шагом будет задание ограничений и нагрузок, действующих на станину в двух

положениях в приложении NX Расширенная симуляция. Этот этап очень важен, так как от заданных условий будет зависеть конечный расчёт.

Опираясь на расчётные схемы необходимо задать к станине расчётные нагрузки и ограничения. На рисунке 9 показан итоговый результат задания нагрузок и ограничений.

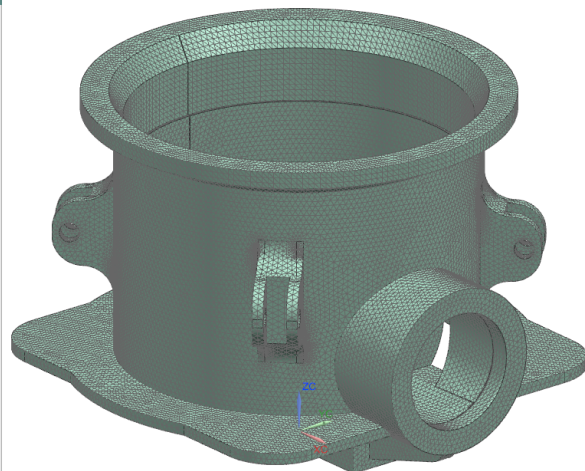
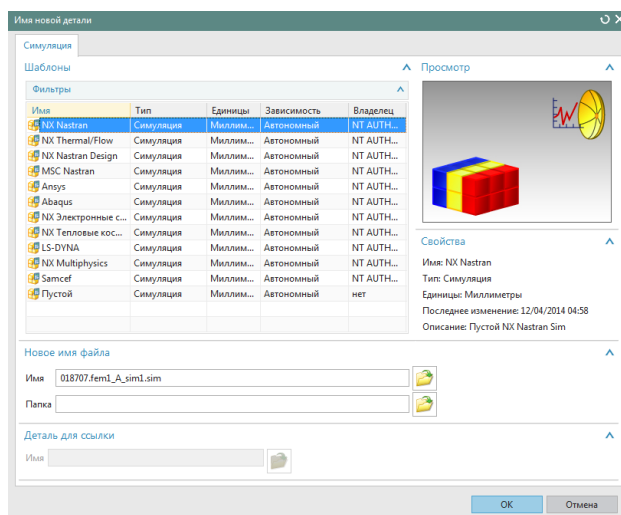


Рис. 8. Создание новой симуляции для решателя NX «Nastran»

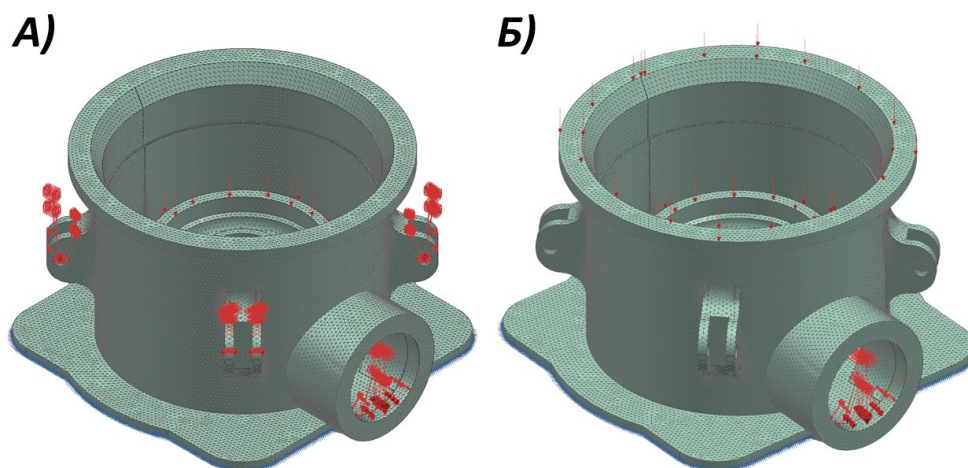


Рис. 9. Итоговый результат задания нагрузок и ограничений расчётной модели:
а – первое положение; б – второе положение

Итоговой целью расчетов служит определение в расчетной модели максимальных перемещений и напряжений, в двух положениях: в момент попадания в рабочую зону машины не дробимого материала и в момент, когда гидроцилиндры принимают неактивное положение.

В ходе выполнения расчета станины под действием внешних нагрузок были получены диаграммы распределения перемещений и напряжений для двух положений работы конусной дробилки (рис. 10–13)

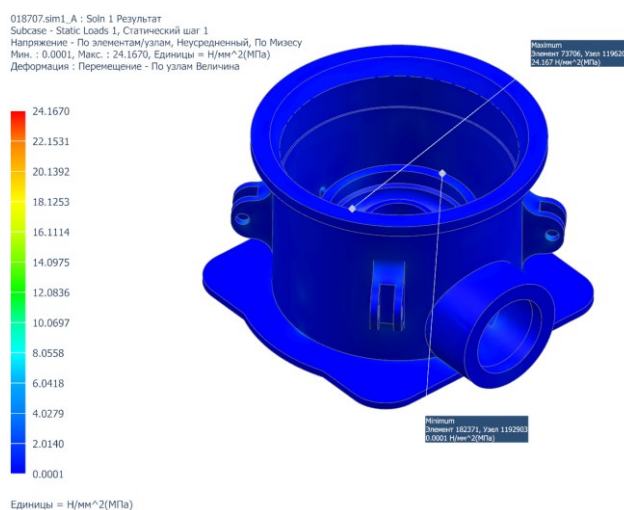


Рис. 10. Результат расчёта напряжений в первом положении

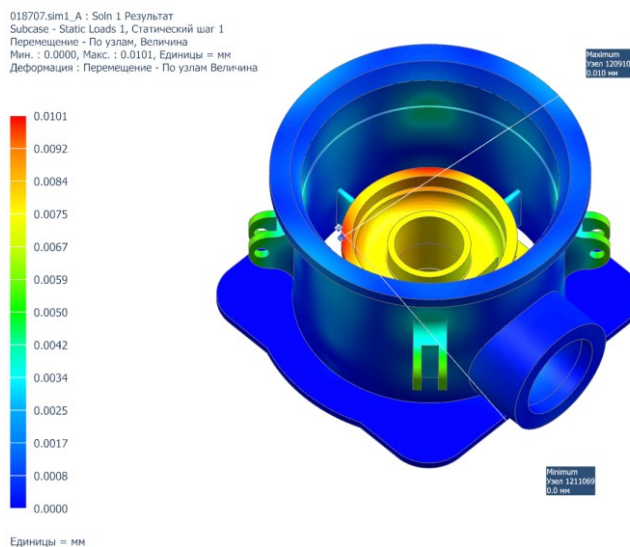


Рис. 11. Результат расчёта перемещений в первом положении

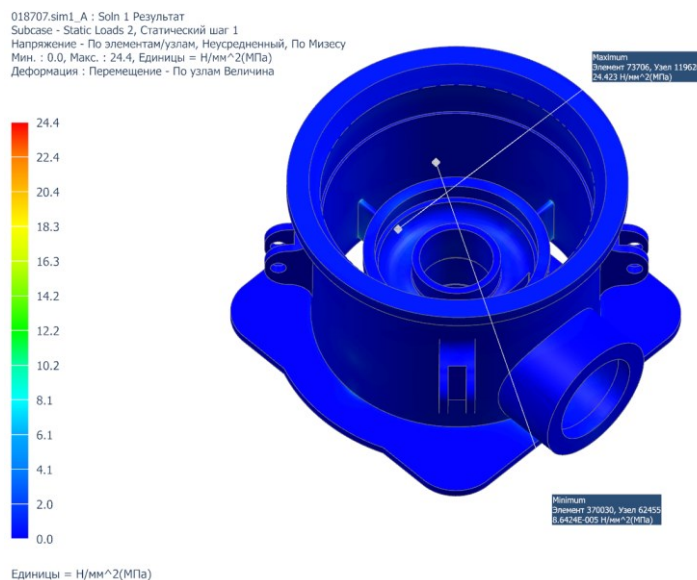


Рис. 12. Результат расчёта напряжений во втором положении

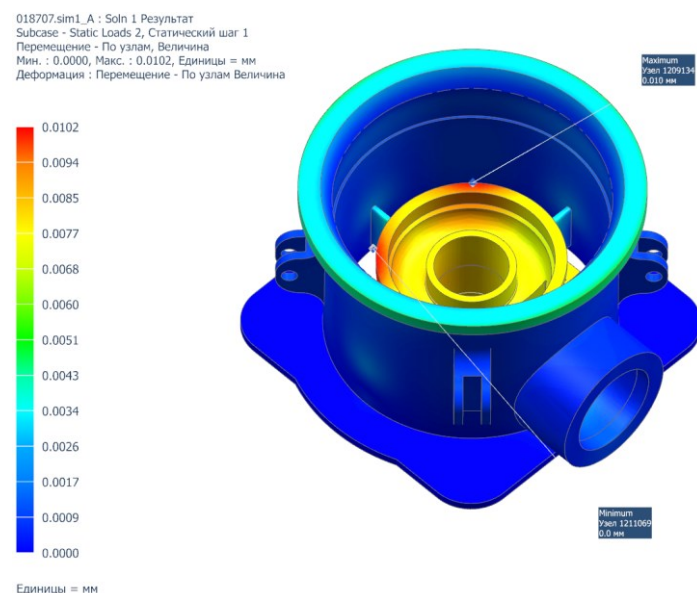


Рис. 13. Результат расчёта перемещений во втором положении

Последним этапом после получения результатов расчета, осуществляется проверка соблюдения условий прочности и жесткости станины. Для этого сравниваются численные значения полученных максимальных напряжений и перемещений с допускаемыми значениями.

Из полученных результатов расчета можно сделать вывод, что максимальные напряжения в двух положениях верхней крышки будут возникать в нижней части станины, около разгрузочного отверстия. Рассчитаем условия прочности для станины по формуле (1) [14, 15]:

$$n = \frac{[\sigma]}{\sigma_{max}} \geq [n], \quad (1)$$

где: n – коэффициент запаса прочности;

$[\sigma]$ – допускаемые напряжения для выбранного материала, МПа;

σ_{max} – максимальные расчетные напряжения, МПа;

$[n]$ – допускаемый коэффициент запаса прочности, $[n] = 5$

В первом и во втором положении положения:

$$n = \frac{245}{24.4} \geq 5$$

$$n = 10,4 \geq 5$$

Таким образом, условие прочности не выполняется.

Проверим условие жесткости для станины:

Условия жесткости, это сравнение максимальных перемещений с допускаемыми.

$$\delta_{max} \leq [\delta] \quad (2)$$

где δ_{max} – максимальные расчетные перемещения, δ_{max} , мм

$[\delta]$ – допускаемые перемещения, мм.

$$[\delta] = \frac{1}{250} \times a \quad (3)$$

где, a – максимальный габаритный размер, $a = 1520$ мм.

В первом положении:

Условия жесткости, это сравнение максимальных перемещений с допускаемыми.

$$[\delta] = \frac{1}{250} \times 1520$$

$$0,0101 \leq 6,08$$

Во втором положении:

$$[\delta] = \frac{1}{250} \times 1520$$

$$0,0102 \leq 6,08$$

Таким образом, условие жесткости выполняется

Результаты расчета напряжений и перемещений приведены в таблице 5, 6.

Таблица 5

Результаты расчёта напряжений

Положение	Деталь	Материал	Максимальные напряжения	Допускаемые напряжение	Коэффициент запаса прочности
Положение 1	Станина	Сталь 110Г13Л ГОСТ 977-88	24,4 МПа	295 МПа	12,9
Положение 2	Станина	Сталь 110Г13Л ГОСТ 977-88	24,4 МПа	295 МПа	12,9

Таблица 6

Результаты расчёта перемещений

Положение	Деталь	Материал	Максимальные перемещение	Допускаемые перемещения	Коэффициент запаса прочности
Положение 1	Станина	Сталь 110Г13Л ГОСТ 977-88	0,0101 МПа	6,02 мм	12,19
Положение 2	Станина	Сталь 110Г13Л ГОСТ 977-88	0,0102 МПа	6,02 мм	12,19

Таким образом с применением CAD/CAM/CAE-системы NX был выполнен анализ прочности станины конусной дробилки, воспринимающей нагрузку в двух вариантах нагружения. По результатам расчета было определено, что станина конусной дробилки обладает достаточной прочностью и выдерживает эксплуатационные нагрузки.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тороп Д.Н., Терликов В.В. Teamcenter. Начало работы. М.: Изд-во ДМП Пресс, 2011. 280 с
2. Гончаров П.С., М.Ю. Ельцов, С.Б. Коршиков, И.В. Лаптев, В.А. Осюк. NX для конструктора-машиностроителя. М.: Изд-во ДМК Пресс, 2010. 503 с.
3. Ельцов М.Ю., Козлов А.А., Седойкин А.В., Широкова Л.Ю. Проектирование в NX под управлением Teamcenter. М.: Изд-во ДМК Пресс, 2013. 752 с.
4. Богданов В.С., Шарапов Р.Р., Фадин Ю.М. Основы расчета машин и оборудования предприятий строительных материалов и изделий. Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2013. 680 с.

5. Богданов В.С., Булгаков С.Б., Федоров Г.Д. Технологические комплексы предприятий промышленности строительных материалов. Белгород: Изд-во «Везелица», 2007. 446 с.

6. Банит Ф.Г., Несвижский О.А. Механическое оборудование цементных заводов. М.: Машиностроение, 1975. 318 с

7. Овсянников В.Е., Шпитко Г.Н., Васильев В.И. Техническое и инженерно-психологические основы проектирования машин. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2014. 115 с.

8. Дробмаш [Электронный ресурс]. Дробильно-сортировочное оборудование. URL: [http:// www.drob mash.ru/](http://www.drob mash.ru/) (дата обращения: 20.05.2015)

9. Gao Y., Chang D., Chen C.-H., Xu Z. Design of digital twin applications in automated storage yard scheduling // Advanced Engineering Informatics. 2022. Vol. 51. Pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101477>

10. Xu X., Xiao G., Lou G., Lu J., Yang J., Cheng Z. Flexible parametric FEA modeling for product family based on script fragment grammar // Computers in Industry. 2019. Vol. 111. Pp. 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.06.003>

11. Данилов Ю., Артамонов.И. Практическое использование NX. М.: Изд-во ДМК Пресс, 2011. 332 с.

12. Ельцов М.Ю., Хахалев П.А. Основы расчета изделия на прочность в приложении NX Расширенная симуляция. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 207 с.

13. Гончаров П.С., Артамонов И.А., Халитов Т.Ф., Денисихин С.В., Сотник Д.Е. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ. М.: Изд-во ДМК Пресс, 2012. 504 с.

14. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машины М.: Изд-во Машиностроение, 1993. 640 с.

15. Абдулхаков К.А., Котляр В.М., Сидорин С.Г. Расчет на прочность элементов конструкций. Казань: Изд-во КНИТУ, 2012. 120 с.

Информация об авторах

Анциферов Сергей Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механическое оборудование». E-mail: anciferov.sergey@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова). Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Карачевцева Анастасия Владимировна, аспирант кафедры «Механическое оборудование». E-mail: karachevtseva.anastasiia@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова). Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Сычёв Евгений Андреевич, аспирант кафедры «Механическое оборудование». E-mail: evgeniy.sychov.015@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова). Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Обернихин Анатолий Александрович, магистр кафедры «Механическое оборудование». E-mail: obernikhin.tolya@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова). Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Поступила 17.03.2022 г.

© Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Сычев Е.А., Обернихин А.А., 2022

**Antsiferov S.I., Karachevtseva A.V., Sychev E.A., Obernikhin A.A.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

**E-mail: anciferov.sergey@gmail.com*

DETERMINATION OF THE STRENGTH OF A CONE CRUSHER STAND

Abstract. The state of the direction of crushing materials in the mining industry is considered. The method of static calculation for the strength of the frame of the cone crusher KSD – 900 in two positions is given. The application of the machine at various stages of crushing is demonstrated. The comparison with other crushers of the mining industry is carried out. The design and operating principle of the digital twin of the cone crusher of medium crushing are described. The advantages and disadvantages of the machine are given. The finite element method of the CAD/CAM/CAE system NX and the module “Advanced Simulation” are considered. Today’s significance of engineering analysis is described. The calculation schemes of the cone crusher stand in several static positions are given: at the moment of lifting the stationary cone and lid, when non-crushing material enters and when the stationary cone and lid of the cone crusher are lowered. The idealization of the frame in the CAD/CAM/CAE NX system and the “Advanced Simulation” module of the cone crusher are shown to reduce the load on the calculating machine. It leads to a reduction in the calculation time of the model. Tables of external loads under the own weight of the working units of the machine are presented. The calculation of comparing the maximum design stresses with those allowed for the selected material and determining the safety factor of stand is shown.

Keywords: cone crusher, crushing, advanced simulation, design scheme, idealization, simulation, CAD/CAM/CAE-NX system, PLM-Teamcenter system, design, assembly, product life cycle, stand.

REFERENCES

1. Torop D.N., Terlikov V.V. Teamcenter. [Teamcenter]. Getting started: textbook. Allowance. Moscow: DМК Press Publishing House, 2011. 280 p. (rus)

2. Goncharov P.S., Eltsov M.Yu., Korshikov S.B., Laptev I.V., Osyuk V.A. NX for mechanical

engineer. [NX dlya konstruktora-mashinostroitel'ya]. M.: DМК Press, 2010. 503p. (rus)

3. Eltsov M.Yu., Kozlov A.A., Sedoykin A.V., Shirokova L.Yu. Design in NX managed by Teamcenter. [Proektirovanie v NX pod upravleniem Teamcenter] M.: DМК Press, 2013. 752 p. (rus)

4. Bogdanov V.S., Sharapov R.R., Fadin Yu.M. Fundamentals of calculation of machines and

equipment for enterprises of building materials and products. [Osnovy rascheta mashin i oborudovaniya predpriyatij stroitel'nykh materialov i izdelij] Stary Oskol: TNT, 2013. 680 p. (rus)

5. Bogdanov V.S., Bulgakov S.B., Fedorov G.D. Technological complexes of enterprises in the building materials industry. [Tekhnologicheskie komplekсы predpriyatij promyshlennosti stroitel'nykh materialov] Belgorod, "Vezelitsa", 2007. 446 p. (rus)

6. Banit F.G., Nesvizhsky O.A. Mechanical equipment of cement plants. [Mekhanicheskoe oborudovanie cementnykh zavodov]. M.: Mashinostroenie, 1975. 318 p. (rus)

7. Ovsyannikov V.E., Shpitko G.N., Vasiliev V.I. Technical and engineering-psychological foundations of machine design. [Tekhnicheskoe i inzhenerno-psihologicheskie osnovy proektirovaniya mashin] Kurgan: Publishing House of the Kurgan State. un-ta, 2014. 115p. (rus)

8. Drob Mash. Crushing and screening equipment [Drobil'no-sortirovochnoe oborudovanie]: Crushing and screening equipment. URL: <http://www.drob Mash.ru/> (date of access: 20.05.2015).

9. Gao Y., Chang D., Chen C.-H., Xu Z. Design of digital twin applications in automated storage yard scheduling. Advanced Engineering Informatics. 2022. Vol. 51. Pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101477>

10. Xu X., Xiao G., Lou G., Lu J., Yang J., Cheng Z. Flexible parametric FEA modeling for product family based on script fragment grammar. Computers in Industry. 2019. Vol. 111. Pp. 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.06.003>

11. Danilov Yu., Artamonov. I Practical use of NX. [Prakticheskoe ispol'zovanie NX]. M.: DMK Press, 2011. 332 p. (rus)

12. Eltsov M.Yu., Khakhalev P.A. Fundamentals of product strength calculation in the NX application Advanced simulation. [Osnovy rascheta izdeliya na prochnost' v prilozhenii NX Rasshirenaya simulyaciya]. Allowance. Belgorod: BSTU Publishing House, 2014. 207 p. (rus)

13. Goncharov P.S., Artamonov I.A., Khalitov T.F., Denisikhin S.V., Sotnik D.E. NX Advanced Simulation. Engineering analysis. [NX Advanced Simulation. Inzhenernyj analiz]. M.: DMK Press, 2012. 504 p. (rus)

14. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. Calculation of the strength of machine parts. [Raschet na prochnost' detalej mashin]. M.: Mashinostroenie, 1993. 640. (rus)

15. Abdulkhakov K.A., Kotlyar V.M., Sidorin S.G. Calculation of the strength of structural elements. [Raschyot na prochnost' elementov konstrukcij]. Kazan: Publishing House of KNRTU, 2012. 120 p. (rus)

Information about the authors

Antsiferov, Sergey I. PhD, Associate Professor. E-mail: antsiferov.sergey@gmail.com. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov). Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Karachevtseva, Anastasia V. Post-graduate Student. E-mail: karachevtseva.anastasiia@gmail.com. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov). Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Sychev, Evgeniy A. Post-graduate student. E-mail: evgeniy.sychov.015@gmail.com. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov). Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Obernikhin, Anatoly A. Master. E-mail: obernihin.tolya@mail.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov). Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Received 17.03.2022

Для цитирования:

Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Сычев Е.А., Обернихин А.А. Определение прочности станины конусной дробилки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 8. С. 92–102. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-92-102

For citation:

Antsiferov S.I., Karachevtseva A.V., Sychev E.A., Obernikhin A.A. Determination of the strength of a cone crusher stand. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 8. Pp. 92–102. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-92-102

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-103-111

Вайтехович П.Е., *Боровский Д.Н.

Белорусский государственный технологический университет

*E-mail: dzianis23@rambler.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН ПЛАНЕТАРНОГО ТИПА

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы, связанные с исследованием планетарных машин. Показано, что они способны значительно интенсифицировать большинство применимых к ним процессов. Это происходит за счет усложнения траектории движения рабочего органа и увеличения инерционных сил. Кроме того, агрегаты планетарного типа являются энергоэффективными. Представлено влияние взаимного воздействия мелющих тел на их силовые характеристики в планетарной мельнице с внешней и внутренней обкатками барабанов. Показана зависимость разрушающих усилий от угловой скорости, степени заполнения помольных барабанов, геометрических соотношений самой мельницы. Получены достаточно простые зависимости для расчета полной скорости в любой точке планетарного рабочего органа заглаживающей машины. Их использование дает возможность проанализировать изменение скорости в широких пределах в зависимости от ряда конструктивных и технологических параметров. Предложенный метод позволяет выполнять расчет скоростей рабочих органов, совершающих планетарное движение. Методами классической механики с использованием мгновенного центра скоростей получена формула для расчета скорости в любой точке перемешивающей лопасти. Установлено, что скорость лопасти во времени изменяется по синусоидальному закону. Общая мощность с увеличением угловой скорости плавно возрастает. Полученные результаты в данной статье могут быть применены при конструировании и эксплуатации планетарных агрегатов.

Ключевые слова: планетарная мельница, рабочий орган, заглаживание, смеситель, перемешивание, вращение, водило.

Введение. Интенсификация работы технологических машин возможна за счет усложнения траектории движения рабочих органов и обрабатываемого материала, увеличения скорости их движения и перевода стационарных процессов в нестационарные. Все это может быть реализовано в машинах планетарного типа [1, 2].

Характерной особенностью таких машин является наличие колеса, которое с помощью водила обкатывается по неподвижной поверхности. В зависимости от способа обкатки (внутренней или внешней) траектория отдельных точек колеса может описывать одну из «замечательных» кривых: гипоциклоиду или эпициклоиду [3, 4].

Изменяя геометрические соотношения основных элементов планетарного механизма, можно получать самую разнообразную форму этих кривых, а соответственно и траекторию. В дополнение к этому, варьируя скоростью вращения водила, можно в широком интервале изменять скорости и ускорения отдельных точек вращающегося колеса. Таким образом, планетарные машины и механизмы имеют широчайший диапазон регулирования параметров.

Основная часть. Машины планетарного типа имеют большие перспективы для использования в механических процессах, таких как измельчение, смешение и довольно специфическом процессе –

заглаживании бетонных поверхностей [5]. Несмотря на кажущуюся простоту, эти процессы сложны по своей физической сущности и слабо изучены до настоящего времени. Все они довольно энергозатратны и сопровождаются повышенным абразивным износом рабочих органов технологического оборудования. В этой связи интенсификация процесса воздействия рабочего органа на обрабатываемую среду может привести к сокращению времени их контакта, а соответственно, к снижению энергозатрат износа.

Степень интенсификации за счет придания рабочим органам планетарного движения в указанных выше процессах проявляется по-разному. Она зависит прежде всего от максимально допустимой скорости, определяемой частотой вращения водила.

Для смесителей в режиме механического перемешивания эта скорость определяется удержанием твердых частиц на лопасти. В противном случае они начинают отбрасывать частицы от центра на периферию и наступает режим сепарации с уменьшением эффективности перемешивания. По этой причине перемешивающие агрегаты преимущественно тихоходные. Скорость лопастей при этом не превышает 10 м/с.

Подобным образом ограничивается и скорость движения рабочего органа дисковой загла-

живающей машины. Она представляет собой вращающийся диск, который с определенным усилием прижимается к не затвердевшей бетонной поверхности и перемещается вдоль нее. Задача диска состоит в выравнивании плоскости поверхности и заполнении мелких раковин. Показателем качества является заглаживающая способность – это длина линии, по которой рабочий орган воздействует на каждую элементарную площадку бетонной поверхности. Естественно, что при усложнении траектории движения ее длина будет больше. Указанный факт подтверждается простым сравнением. Любая точка диска с обычным вращением оставляет на поверхности след в виде окружности, а при его планетарном вращении – гипоциклоиды или эпициклоиды. Длина последних двух кривых при всех равных параметрах в 3–4 раза больше, чем окружности [3, 4]. Однако увеличение скорости вращения диска может привести к отбрасыванию частиц бетона на соседние участки уже обработанной поверхности. Такая скорость является верхним ограничением для дисковых заглаживающих машин. Она обычно выше 10 м/с, в общем случае лучше сказать составляет несколько десятков метров в секунду. По сравнению с быстроходной планетарной мельницей такую машину можно назвать среднеходной.

Следует отметить, что перед разработчиками планетарных мельниц ставятся совершенно иные задачи по сравнению со смесителями и заглаживающими машинами. Основная из них – это повышение эффективности процесса разрушения материала. Очевидно, что скорости движения рабочих органов при этом должны быть как можно больше. Основным элементом планетарной мельницы является размольный барабан, вовлеченный в планетарное движение, в который загружаются измельчающие тела (шары) и материал, подлежащий измельчению.

В конструктивном исполнении планетарные мельницы могут быть вертикальными, горизонтальными и наклонными, с внешней и внутренней обкаткой [1, 6–8]. В процессе изучения движения шаров в планетарной мельнице (рис. 1) удалось установить соотношения угловых скоростей и углов поворота водила и барабана [1, 9]:

$$\Omega = \omega \frac{k}{1 \pm k}; \quad \varphi = \psi \frac{k}{1 \pm k}, \quad (1)$$

где ω и Ω – угловые скорости барабана и водила, рад/с; φ и ψ – углы поворота барабана и водила; k – геометрический критерий, который равен $k = r/R$, где r – радиус приводного элемента, м; R – радиус поверхности обкатки, м.

Знак «+» в формулах – внешняя обкатка, «-» – внутренняя.

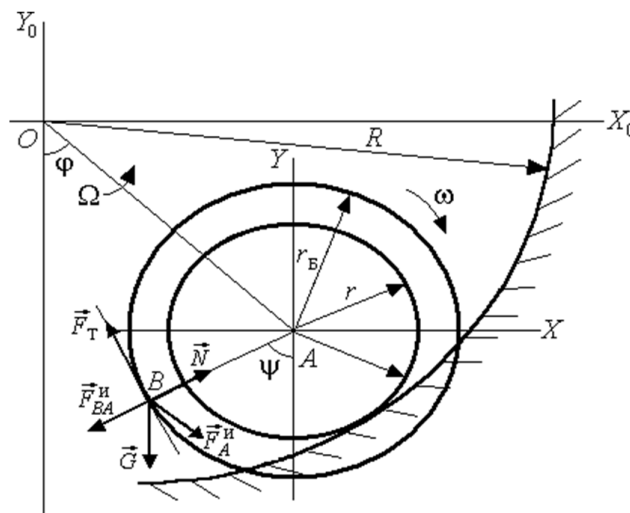


Рис. 1. Силевая схема планетарной мельницы с внутренней обкаткой

На измельчающее тело, находящееся внутри барабана, действует сила тяжести и две инерционные силы F_A и F_{BA} , связанные с поворотом барабана и водила соответственно:

$$F_A = m\omega^2 kbR; \quad F_{BA} = \frac{m\omega^2 k^2 R}{1+k}, \quad (2)$$

где b – второй геометрический критерий, который определяется как $b = r_0/r$, где r_0 – радиус барабана.

Расчет силы давления шара на стенки барабана по формуле (3), равной нормальной реакции ($\tilde{I}_p$), показал, что она меняется циклически. Причем установлена зависимость цикличности от критерия k .

Изменение силы давления за один цикл свидетельствует о нестационарности процесса разрушения материала, обусловленного воздействием измельчающих тел. Поскольку относительная сила давления $\tilde{I}_p$ (отнесенная к единице массы шара) – это ни что иное как его ускорение, то из расчетной зависимости очевидно, что она

значительно превышает ускорение свободного падения. Таким образом, основным разрушающим силовым фактором в планетарных мельницах становятся инерционные силы. Экспериментальные исследования процесса помола в планетарной мельнице подтвердили ее высокую эффективность.

Естественно модель движения одиночного мелющего тела является довольно упрощенной. В дальнейшем было изучено движение сегмента загрузки в целом, рис. 2.

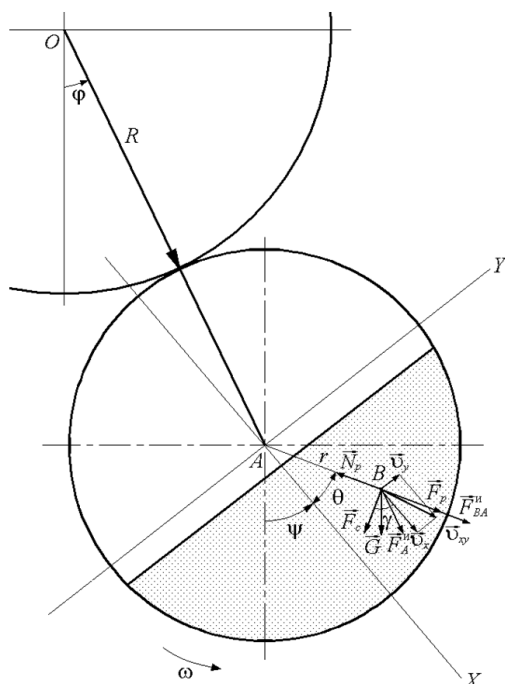


Рис. 2. Расчетная схема относительного движения мелющего тела в сегменте загрузки при внешней обкатке барабанов

Рассмотрим относительное движение мелющих тел помольной камеры планетарной мельницы в подвижной системе координат AXY , которая вращается с угловой скоростью ω , равной скорости вращения барабана [1, 9].

Уравнение относительного движения мелющего тела можно записать в следующем виде:

$$m\vec{a}_d = \vec{G} + \vec{F}_T + \vec{F}_A^i + \vec{F}_{BA}^i + \vec{F}_c + \vec{F}_p, \quad (4)$$

$$\vec{I}_{ip} = \vec{I}_{ip} + \frac{1}{2r_{ш}} \left[\omega^2 \frac{(r_i + r_{ш})^2 - r_0^2}{2} + (r_i + r_{ш} - r_0) \left(\frac{\omega^2 k^2 R^2}{1+k} \cos(\psi - \phi) + g \cos \psi \right) \right] \quad (5)$$

где $r_{ш}$ – радиус шара, м; r_i – текущий радиус, м; r_0 – расстояние от центра барабана до свободной поверхности сегмента загрузки, м.

С учетом всех силовых факторов, входящих в уравнение (5) удалось в пределах сегмента загрузки определить зоны отрыва мелющих тел, а также зоны безотрывного движения со скольжением и без него [13]. В каждой из этих зон реализуется преобладающий способ разрушающего воздействия: удар, истирание и раздавливание. Разработана методика расчета напряжений при каждом из них. В качестве примера показано изменение ударных напряжений (рис. 4), которые значительно выше сжимающих.

где m – масса мелющего тела, кг; a_d – относительное ускорение мелющего тела, м/с²; G – сила тяжести, Н; F_T – сила трения, Н; F_A^i , F_{BA}^i – соответственно переносная и относительная силы инерции, действующие на мелющее тело, Н; F_c – корриолисова сила инерции, Н; F_p – сила давления, Н. В то время, когда мелющее тело находится внутри сегмента загрузки, то на него оказывают воздействие другие тела. Последнее предлагается оценить дополнительной силой, названной силой давления F_p .

Для возможности учета воздействия других мелющих тел, выраженного силой давления F_p , обратимся к модели (рис. 3). Рассмотрим послойное движение шаров по дуге окружности. Тангенциальное усилие в момент сдвига слоев будет зависеть от давления, оказываемого в радиальном направлении на каждое мелющее тело анализируемого слоя [9–12].

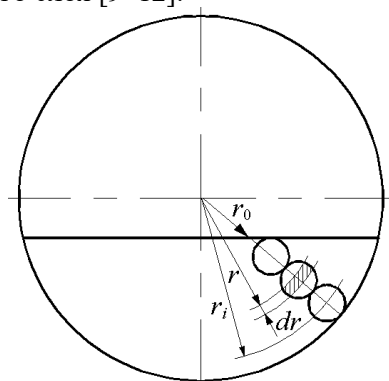


Рис. 3. Расчетная схема для определения силы давления

Составив уравнения для силы давления на элементарном участке dr и проведя интегрирование, получили расчетную зависимость для нее на любом радиусе r_i :

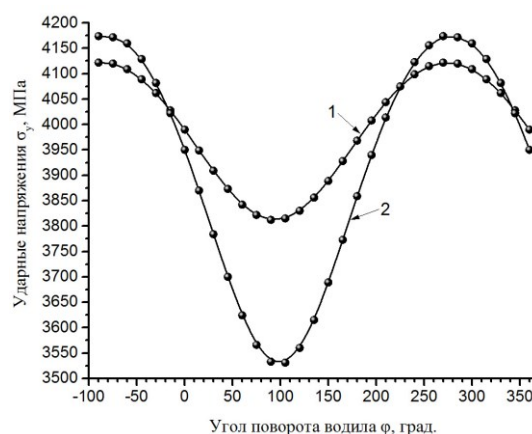


Рис. 4. Изменение ударных напряжений в планетарной мельнице: 1 – $\omega = 90$ рад/с; 2 – $\omega = 180$ рад/с

Таким образом можно оценить влияние на эффективность изменения каждого из них в отдельности и провести суммирование этих разрушающих эффектов.

Специфика процесса заглаживания, геометрические размеры рабочего органа и его скоростные режимы оказывают влияние на показатели эффективности и методы исследования заглаживающей машины.

Показателем эффективности заглаживания бетонных поверхностей является заглаживающая способность [5, 14], определяемая для дискового рабочего органа по формуле:

$$\theta_d = 0,94 \frac{v_d R}{v_3}, \quad (6)$$

где v_d – скорость диска, м/с; v_3 – скорость поступательного движения машины, м/с; R – радиус диска, м.

Для определения скорости диска, вовлеченного в планетарное движение, использован совершенно иной подход. Она определялась путем дифференцирования параметрических уравнений траекторий движения: эпициклоиды при внешней обкатке и гипоциклоиды при внутренней [15].

Методологию определения скорости рассмотрим на примере эпициклоиды (рис. 5).

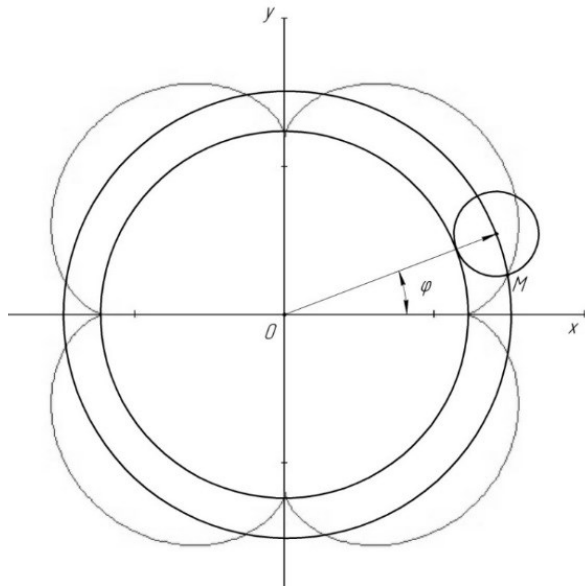


Рис. 5. Эпициклоида

Параметрические уравнения эпициклоиды имеют вид:

$$\begin{aligned} x &= (R+r) \cdot \cos \varphi - r_d \cdot \cos \left(\frac{R+r}{r} \cdot \varphi \right); \\ y &= (R+r) \cdot \sin \varphi - r_d \cdot \sin \left(\frac{R+r}{r} \cdot \varphi \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где R – радиус обкатки, м; r – радиус обкатываемого круга (диска), м; r_d – радиус производящего круга (рабочего органа), м; φ – угол поворота водила, рад.

Первая производная по каждой координате для уравнений эпициклоиды по переменной φ :

$$\begin{aligned} \frac{dx}{d\varphi} &= -(R+r) \cdot \sin \varphi + r_d \cdot \frac{R+r}{r} \cdot \sin \left(\frac{R+r}{r} \cdot \varphi \right); \\ \frac{dy}{d\varphi} &= (R+r) \cdot \cos \varphi - r_d \cdot \frac{R+r}{r} \cdot \cos \left(\frac{R+r}{r} \cdot \varphi \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Так как скорость – это производная по времени, то необходимо перейти от переменной φ к новой переменной t . По каждой из координат получим:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \Omega \cdot \frac{dx}{d\varphi}; \\ v_y &= \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \Omega \cdot \frac{dy}{d\varphi}, \end{aligned} \quad (9)$$

где Ω – угловая скорость водила, рад/с.

Используя геометрические критерии $k = r/R$ и $b = r_d/r$ и учитывая соотношения углов (10), получим уравнение для расчета полной скорости диска (11).

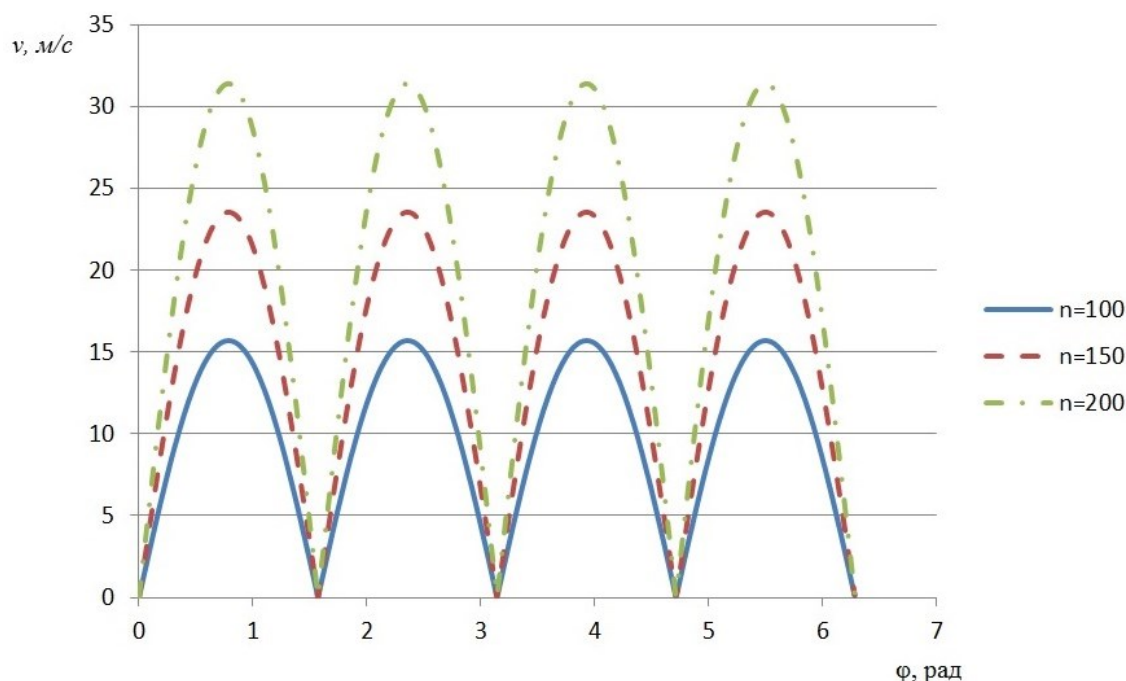
$$\psi = \frac{R+r}{r} \cdot \varphi. \quad (10)$$

$$v = 2 \cdot \Omega \cdot R \cdot \sqrt{1 + b^2 - 2 \cdot b \cdot \cos \left(\frac{\varphi}{k} \right)}. \quad (11)$$

На рис. 6 показано изменение модуля полной скорости в зависимости от частоты вращения водила n за один полный оборот.

Очевидно, что зависимость линейной скорости от угла поворота носит периодический характер. Причем увеличение частоты вращения приводит только к росту амплитуды изменения скорости. Изменение геометрического критерия k не очень существенно влияет на амплитуду скорости.

Соблюдая последовательность в изложении материала от быстро- и среднеходных технологических агрегатов, переходим к тихоходным. Таковыми в нашем случае являются лопастные смесители с планетарным движением рабочего органа. Задача процесса перемешивания заключается в достижении гомогенности среды по всему объему смесителя и поддержании ее в таком состоянии длительное время. Это особенно важно в высокопроизводительных технологических процессах, например, в шлам-бассейнах в производстве цемента.

Рис. 6. Зависимость скорости от угла поворота при различных n

При наличии в перемешиваемой среде нескольких компонентов эффективность процесса обычно оценивается по одному из них – ключевому. По степени его распределения судят о качестве перемешивания. Для этого в разных местах смесителя отбирают пробы и определяют долю ключевого компонента. Ее равенство во всех точках свидетельствует об идеальном перемешивании. Однако в реальных условиях это равенство не достигается. Его нарушение оценивается среднеквадратичным отклонением по ключевому компоненту. Делением среднеквадратичного отклонения на долю ключевого компонента в исходном состоянии получают коэффициент вариации, который используется в качестве показателя эффективности перемешивания. К сожалению в этом показателе совершенно не учитываются ни геометрические, ни технологические параметры самого перемешивающего агрегата. В этой связи мы были вынуждены обратиться к альтернативным источникам [16], предлагающим другие методы оценки качества перемешивания.

Эффективность перемешивания в смесителе, в том числе и планетарном [17], оценивается критерием λ , с^{-1} , определяемым по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{v \cdot S}{V}, \quad (12)$$

где v – средняя скорость лопасти, м/с ; S – активная площадь лопасти, м^2 ; V – объем смесителя, м^3 .

Важные численные параметры, характеризующие работу смесителя, зависят от скорости движения лопастей. Для ее определения рассмотрим расчетную схему (рис. 7).

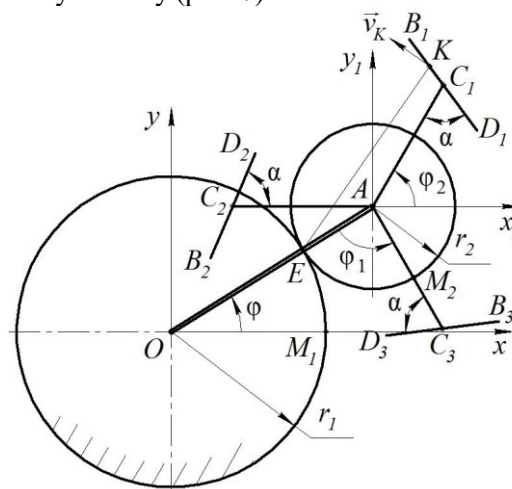


Рис. 7. Схема расположения лопастей

Если предположить, что один перемешивающий орган содержит три лопасти, то каждая из них жестко скреплена с колесом стержнем AC . При этом за один цикл водила OA все лопасти совершают одинаковые движения. В этой связи расчет скорости, а затем и мощности можно выполнять для одной лопасти с последующим увеличением на их количество.

При известной угловой скорости водила ω в зафиксированном положении механизма $\varphi = \omega \cdot t$ определим скорость в произвольной точке K лопасти. Примем, что в начальный момент движения $\varphi = 0$, стержень AC_3 совпадал с осью Ox . По-

сле поворота водила на угол φ стержень AC_3 повернется по отношению к водилу на угол φ_1 . Тогда формула примет вид:

$$\cup EM_1 = \cup EM_2; \varphi \cdot r_1 = \varphi_1 \cdot r_2; \varphi_1 = \varphi \cdot \frac{r_1}{r_2} = \varphi \cdot k. \quad (13)$$

$$\varphi \cdot OA = \varphi_2 \cdot EA; \varphi \cdot (r_1 + r_2) = \varphi_2 \cdot r_2; \varphi_2 = \varphi \cdot \frac{r_1 + r_2}{r_2} = \varphi \cdot (k + 1). \quad (14)$$

Аналогичная связь будет между угловыми скоростями водила и колеса, которая находится по формуле:

$$\omega_2 = \omega \cdot (k + 1). \quad (15)$$

С учетом этого скорость в точке K определяется по формуле:

$$v_K = \omega_2 \cdot l_{EK}, \quad (16)$$

где l_{EK} – длина линии EK .

В результате геометрических преобразований получена формула длины l_{EK} :

$$v_K = \omega(k + 1) \sqrt{r_2^2 + l^2 + a_K^2 + 2l \cdot a_K \cdot \cos \alpha + \left(2r_2 \sqrt{l^2 + a_K^2 + 2l \cdot a_K \cdot \cos \alpha} \right) \cos(k\varphi + \alpha)}. \quad (18)$$

При фиксированных значениях угловой скорости водила $\omega = 1$ рад/с и геометрическом критерии $k = 3$ по формуле (18) произведем расчет и анализ изменения скорости по ширине лопасти за один полный оборот водила ($\varphi = 360^\circ$).

где k – геометрический критерий, равный $k = r_1/r_2$.

Угол поворота колеса вместе с лопастями в абсолютном движении равен углу поворота вокруг мгновенного центра скоростей E и находится согласно выражениям:

$$l_{EK} = \sqrt{l_{EA}^2 + l_{AK}^2 - 2 \cdot l_{EA} \cdot l_{AK} \cdot \cos(k \cdot \varphi)}. \quad (17)$$

Для упрощения дальнейших преобразований переменную l_{CK} обозначим через a_K : $l_{CK} = a_K$. По расчетной схеме (рис. 7) видно, что $l_{EA} = r_2$. Неизменную длину стержня l_{AC} обозначим $l_{AC} = l$.

После введения новых обозначений и преобразования формулы (17) для l_{EK} , скорость лопасти в произвольной точке примет вид:

Результаты расчета представлены в виде трехмерной графической зависимости (рис. 8).

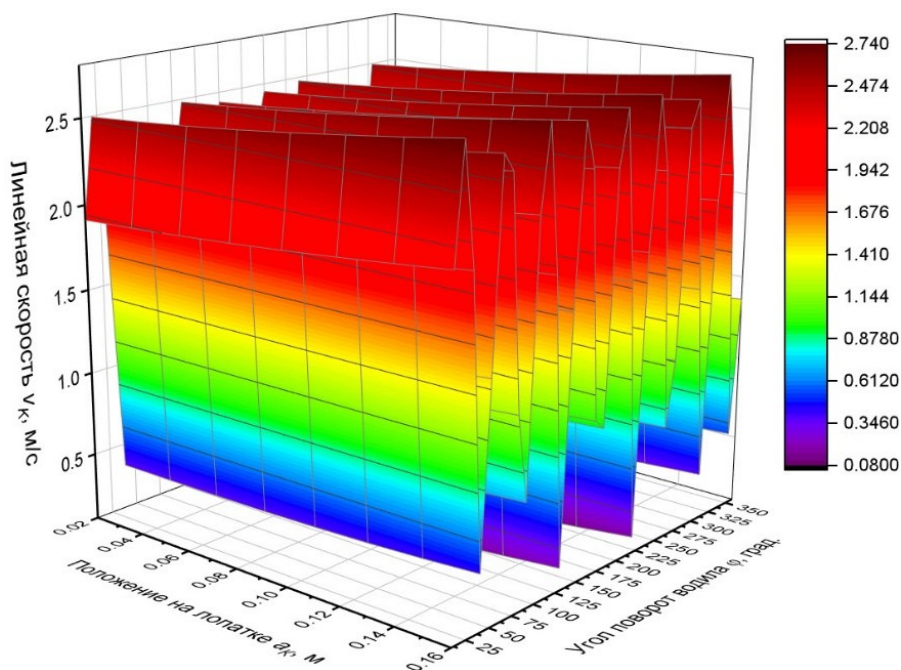


Рис. 8. Изменение скорости по ширине лопасти за один полный оборот водила

Из графика видно, что скорость v_K равномерно повышается с увеличением ширины лопасти (a_K). А вот в процессе вращения (угол φ) изменение скорости носит синусоидальный харак-

тер. Причем, экстремальные значения на соседних пиках графика разные. Максимальные значения скорости достигают $v_K = 2,74$ м/с.

В дальнейшем был проведен расчет мощности, затрачиваемой на перемешивание, которая

напрямую зависит от скорости перемещения лопастей. Расчет показал, что, несмотря на локальные пульсации скорости, мощность в зависимости от угловой скорости изменяется по линейному закону.

Выводы. Подводя итог, можно отметить, что в работе представлены методы расчета кинематических и динамических характеристик трех разных видов технологических машин планетарного типа. Причем как конструкции агрегатов, так и методики расчета имеют существенные отличия. Это свидетельствует о том, что процесс их исследования находится в постоянном развитии и у него есть хорошие перспективы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вайтехович П.Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил. Минск: БГТУ. 2008. 220 с.
2. Бушуев Л.П. Многорежимная планетарная мельница // Изв. вузов. Горный журнал. 1965. № 10. С. 148–154.
3. Звавич Л.И., Рязановский А.Р. Геометрия. Справочное пособие. Москва. 2012. 128 с.
4. Марков В.Г. Планетарные механизмы: учеб. пособие по курсу «Теория механизмов и машин». Л.: ЛТХП. 1969. 28 с.
5. Болотный А.В. Теория и процессы заглаживания бетонных поверхностей. Л.: Строиздат. 1975. 127 с.
6. Ким Б.Г. Относительное движение мелющих тел в барабане планетарной мельницы при водопадном режиме ее работы // Изв. вузов. Горный журнал. 1975. № 9. С. 81–86.
7. Бушуев Л.П. Экспериментальные исследования и вопросы теории планетарных центробежных мельниц // Науч. докл. высшей школы. Горное дело. 1959. № 2. С. 220–226.
8. Доброборский Г.А., Лянсберг Л.М., Рабин А.Н. Определение основных режимов движения загрузки в барабанах многобарабанной планетарно-центробежной мельницы с вертикальными осями // Изв. вузов. Горный журнал. 1993. № 1. С. 85–89.
9. Семененко Д.В. Влияние конструктивных и технологических параметров горизонтальной планетарной мельницы на эффективность процесса измельчения: автореф. дис. ... канд. техн. наук; Белорус. гос. технол. ун-т. Минск. 2014. 20 с.
10. Зубко И.Ю., Пермяков П.В., Трусков П.В. Динамика многих соударяющихся тел: приложение к механическому легированию // Известия вузов. Северо-кавказский регион. Естественные науки. 2008. № 2. С. 29–35.
11. Зубко И.Ю., Зайцев А.В. Моделирование движения мелющих тел в процессе механического легирования // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмические техника. 2017. № 2. С. 34–43.
12. Feng Y.T., Han K., Owen D.R.J. Discrete element simulation of the dynamics of high energy planetary ball milling processes // Materials Science and Engineering A. 2004. Vol. 375–377. P. 815–819.
13. 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.
14. Рысс-Березарк С.А. Определение параметров заглаживающих машин с дисковым рабочим органом с простым и сложным движением. Л.: Строиздат. 1999. 167 с.
15. Вайтехович П.Е., Сидоров Н.Н. Определение скорости движения технологичных машин планетарного типа // Труды БГТУ. Сер. химии и технологии неорганич. Вып. 12. 2004. С. 28–35.
16. Вайцяховіч П.Я., Францкевіч В.С., Грэбянчук П.С. Машыны і абсталяванне прадпрыемстваў будаўнічых матэрыялаў: вучэб. дапам. Мінск: БДТУ. 2018. 297 с.
17. Вайтехович П.Е., Хвесько Г.М., Боровский Д.Н., Семененко Д.В. Определение основных параметров эффективного планетарного смесителя / Труды БГТУ. Серия 2. Химические технологии, биотехнология и геоэкология. 2019. №2 (223). С. 114–119.

Информация об авторах

Вайтехович Петр Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. E-mail: vpe51@mail.ru. Белорусский государственный технологический университет. Республика Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а.

Боровский Денис Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. E-mail: dzianis23@rambler.ru. Белорусский государственный технологический университет. Республика Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а.

Поступила 27.05.2022 г.

© Вайтехович П.Е., Боровский Д.Н. 2022

Vaytekovich P.E., *Borovski D.N.
 Belarusian State Technological University
 *E-mail: dzianis23@rambler.ru

DETERMINATION OF KINEMATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF TECHNOLOGICAL MACHINES OF PLANETARY TYPE

Abstract. The article deals with issues related to the study of planetary machines. It is demonstrated that they are able to significantly intensify most of the processes applicable to them. This is due to the complication of the trajectory of the movement of the working body and the increase in inertial forces. In addition, planetary units are energy efficient. The influence of the mutual action of grinding bodies on their power characteristics in a planetary mill with external and internal running of the drums is presented. The dependence of destructive forces on the angular velocity, the degree of filling of the grinding drums, the geometric ratios of the mill itself is shown. Sufficiently simple dependences have been obtained for calculating the total speed at any point of the planetary working body of the smoothing machine. Their use makes it possible to analyze the change in speed over a wide range, depending on a number of design and technological parameters. The proposed method allows to calculate the speeds of the working bodies that make planetary motion. Using the methods of classical mechanics, using the instantaneous center of velocities, a formula is obtained for calculating the speed at any point of the mixing blade. It is established that the speed of the blade changes in time according to a sinusoidal law. The total power gradually increases with increasing angular velocity. The results obtained in this article can be applied in the design and operation of planetary units.

Keywords: planetary mill, working body, smoothing, mixer, mixing, rotation, carrier.

REFERENCES

1. Vaytekovich P.E. Intensification and modeling of dispersion processes in the field of inertial forces [Intensifikatsiya i modelirovanie processov dispergirovaniya v pole inercionnyh sil]. Minsk: BSTU. 2008. 220 p. (rus)
2. Bushuev L.P. Multimode planetary mill [Mnogorezhimnaya planetarnaya mel'nicy]. Izv. universities. Mining magazine. 1965. No 10. Pp 148–154. (rus)
3. Zvavich L.I., Ryazanovskij A.R. Geometry. Reference manua. [Geometriya. Spravochnoe posobie]. M.: Drofa. 2012. 128 p. (rus)
4. Markov V.G. Planetary mechanisms: textbook. manual for the course "Theory of mechanisms and machines" [Planetarnye mekhanizmy: ucheb. posobie po kursu «Teoriya mekhanizmov i mashin»]. L.: LTHP. 1969. p. 28. (rus)
5. Bolotnyj A.V. Theory and processes of smoothing concrete surfaces [Teoriya i processy zaglazhivaniya betonnyh poverhnostej]. L.: Stroizdat. 1975. 127 p. (rus)
6. Kim B.G. Relative motion of grinding bodies in the drum of a planetary mill in the waterfall mode of its operation [Otnositel'noe dvizhenie melyushchih tel v barabane planetarnoj mel'nicy pri vodopadnom rezhime ee raboty]. Izv. universities. Mining magazine. 1975. No. 9. Pp. 81–86. (rus)
7. Bushuev L.P. Experimental research and questions of the theory of planetary centrifugal mills [Eksperimental'nye issledovaniya i voprosy teorii planetarnykh centrobezhnykh mel'nic]. Scientific report high school. Mining. 1959. No 2. Pp. 220–226. (rus)
8. Dobroborskij G.A., Lyansberg L.M., Rabin A.N. Determination of the main modes of movement of the load in the drums of a multi-drum planetary centrifugal mill with vertical axes [Opredelenie osnovnykh rezhimov dvizheniya zagruzki v barabanah mnogobarabannoj planetarno-centrobezhnoj mel'nicy s vertikal'nymi osyami]. Izv. universities. Mining magazine. 1993. No 1. Pp. 85–89. (rus)
9. Semenenko D.V. Influence of design and technological parameters of a horizontal planetary mill on the efficiency of the grinding process: abstract of the thesis. dis. ... cand. tech. sciences; BSTU. Minsk. 2014. 20 p. (rus)
10. Zubko I. YU., Permyakov P.V., Trusov P.V. Dynamics of many colliding bodies: application to mechanical alloying [Dinamika mnogih soudaryayushchihsya tel: prilozhenie k mekhanicheskomu legirovaniyu]. Izv. universities. North Caucasian region. Natural Sciences. 2008. No. 2. Pp. 29–35. (rus)
11. Zubko I.YU., Zajcev A.V. Simulation of milling balls motion within mechanical alloying process [Modelirovanie dvizheniya melyushchih tel v processe mekhanicheskogo legirovaniya]. Bulletin of PNRPU. Aerospace engineering. 2017. No. 2. Pp. 34–43.
12. Feng Y.T., Han K., Owen D.R.J. Discrete element simulation of the dynamics of high energy planetary ball milling processes. Materials Science and Engineering A. 2004. Vol. 375–377. Pp. 815–819.
13. Vaytekovich P.E., Borovski D.N. Destructive effect of grinding media in a horizontal planetary mill with different methods of running in grinding drums [Razrushayushchee vozdeystvie melyushchih tel v gorizontальной planetarnoj mel'nice pri razlichnykh sposobakh obkatki pomol'nykh barabanov]. Chemical and petroleum engineering. 2019. No 2. Pp. 3–6. (rus)

14. Ryss-Berezark S.A. Determination of the parameters of smoothing machines with a disk working body with a simple and complex movement [Opredelenie parametrov zaglzhivayushchih mashin s diskovym rabochim organom s prostym i slozhnym dvizheniem]. L: Stroizdat. 1999. 167 p. (rus)

15. Vaytekovich P.E., Sidorov N.N. Determination of the speed of movement of technological machines of planetary type [Opredelenie skorosti dvizheniya tekhnologichnyh mashin planetarnogo tipa]. Trudy BGTU. Ser. himii i tekhnologii neorgan. 2004. No 12. Pp. 28–35.

16. Vaytekovich P.E., Frankevich V.S., Hrebianchuk P.S. Machinery and equipment for construction materials companies: a textbook [Mashyny i abstalyavanne prapryemstvaŭ budaŭnychykh materyyalaŭ: vucheb. dapam.]. Minsk: BSTU. 2018. 297 p. (rus)

17. Vaytekovich P.E., Hves'ko G.M., Borovskij D.N., Semenenko D.V. Determination of the main parameters of an efficient planetary mixer [Opredelenie osnovnyh parametrov effektivnogo planetarnogo smesitelya]. Trudy BGTU. Series 2. Chemical technologies, biotechnology and geoecology. 2019. No. 2 (223). Pp. 114–119. (rus)

Information about the authors

Vaytekovich, Petr E. DSc (Engineering), Professor. E-mail: vpe51@mail.ru. Belarusian State Technological University. Republic of Belarus, 220006, Minsk, str. Sverdlova, 13a.

Borovskiy, Denis N. PhD (Engineering). E-mail: dzianis23@rambler.ru. Belarusian State Technological University. Republic of Belarus, 220006, Minsk, str. Sverdlova, 13a.

Received 27.05.2022

Для цитирования:

Вайтехович П.Е., Боровский Д.Н. Определение кинематических и динамических характеристик технологических машин планетарного типа // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 8. С. 103–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-103-111

For citation:

Vaytekovich P.E., Borovskiy D.N. Determination of kinematic and dynamic characteristics of technological machines of planetary type. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 8. Pp. 103–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-103-111

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-112-121

Алак Сабах Алхалили, Лукьянов Е.А.Донской государственный технический университет***E-mail: alaqsabah@yahoo.com*

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ КОЛЕСНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. Мобильный робот — сложная система, способная получать информацию о внешнем мире и использовать ее для безопасного перемещения целенаправленным образом. С помощью датчиков информационная подсистема робота может определять его положение, а также расположение статических и динамических объектов в рабочей области. Движение робота к заданной (целевой) точке может осуществляться по различным алгоритмам. Эти алгоритмы реализуют те или иные методы планирования траектории движения к целевой точке, предотвращают столкновения робота с препятствиями, сокращают время перемещения и пройденное расстояние для экономии энергии аккумулятора и т.п. Мобильные роботы должны функционировать в изменяющейся среде со значительной степенью неопределенности. Одной из основных задач мобильного робота является задача планирования траекторий движения и управления движением робота к целевой точке. В статье предлагается метод планирования траектории движения мобильного робота и управления его движением. Метод основан на имитационном моделировании движения робота в среде с неподвижными и подвижными препятствиями. Предполагается, что направление движения препятствий может изменяться случайным образом.

Ключевые слова: колесный мобильный робот, планирование траектории робота, стохастическое управление, прогнозирование столкновений, управление движением робота.

Введение. Роботы успешно применяются в машиностроении, при производстве автомобилей и в ряде других областей. В ближайшем будущем роботы будут широко использоваться в сельском хозяйстве, горнодобывающей индустрии и сфере услуг. Эти роботы будут обладать значительной мобильностью и способностью самостоятельно принимать решения по своему поведению. Следовательно, для обеспечения безопасности таких мобильных роботов и их успешного функционирования необходимы алгоритмы планирования действий и движений. Мобильный робот должен быть способен извлекать информацию из окружающей среды и использовать ее для безопасного перемещения целенаправленным образом. Для этого роботы могут использовать различные типы датчиков или получать необходимую информацию от внешних информационных систем. Задачи планирования безопасных траекторий движения робота рассматривались многими исследователями [1–7] и эти работы продолжаются, поскольку условия, в которых функционируют роботы очень разнообразны.

Чтобы избежать столкновений с препятствиями, необходимо знать положение препятствий и предсказывать траекторию их движения. В определенной мере методы, использующие локализацию и картографирование (SLAM) [8] для определения местоположения мобильного робота в режиме реального времени и нанесения на карту окружающей зоны обнаруженных препятствий, позволяют решить эту задачу. К недостаткам

данной группы относится отсутствие механизмов прогнозирования и планирования движения к целевой точке.

Известные методы планирования траектории могут быть эффективны для определённых условий и неприменимы для других условий. Они могут иметь различную вычислительную сложность, что не позволит использовать их в системах, где планирование траектории должно осуществляться в реальном масштабе времени для быстро движущихся объектов.

В данной статье рассмотрены наиболее распространенные методы планирования траектории движения робота. Также в статье предлагается метод планирования движения мобильного робота и управления его перемещением в среде с подвижными и неподвижными препятствиями.

Анализ известных методов планирования траекторий мобильных роботов. Известно значительное количество методов планирования траекторий движения мобильных роботов на основе теории графов [1–3, 9]. Обычно узлы графа отражают состояния, в которых может находиться робот. Переходы между состояниями могут быть оценены некоторой функцией затрат. В этом случае возможно нахождение пути, который имеет минимальные суммарные затраты при перемещении робота в целевую точку. Эти методы в общем случае относятся к группе глобальных и позволяют определить наилучшую траекторию к целевой точке в детерминированных условиях движения робота. Методы на основе

графов малоэффективны при планировании траекторий движения робота при наличии динамических препятствий.

Еще одной группой методов планирования являются методы на основе клеточной декомпозиции. В этих методах выполняется разбиение рабочего пространства на области («клетки»). Каждая клетка рабочего пространства может быть свободна для перемещения туда робота или занята. Планирование траектории предполагает нахождение последовательности перемещения робота через смежные свободные клетки в целевую точку. Метод имеет серьезный недостаток: увеличение трудоемкости при уменьшении шагов сетки. Также нет эффективных способов учитывать случайный характер движения препятствий. Методы на основе клеточной декомпозиции малоэффективны при планировании траекторий движения робота в условиях случайных процессов, при стохастичности вектора скорости препятствий.

Планирование траекторий робота на основе оптимизационных методов основаны на рассмотрении динамики движения, либо оптимизационном решении задач при групповом управлении. Поэтому подход, основанный на оптимальном управлении, эффективен для простых (линейных) детерминированных систем [10–12]. Методы не обеспечивают эффективности при планировании траекторий в условиях подвижных препятствий с неопределенным характером движения.

Для планирования траекторий движения в недетерминированных условиях ряд методов, использует элементы искусственного интеллекта [13–16]. Среди них можно выделить биоинспирированные алгоритмы: роевой интеллект, «муравьиный» алгоритм, метод роя частиц, а также генетические и эволюционные алгоритмы. Методы ориентированы на решение задач управления группой роботов неприменимы или неэф-

фективны при планировании траекторий одиночного робота в условиях изменяющейся обстановки [17].

Еще одной большой группой методов, применяемых для управления роботом при наличии различных препятствий, являются методы на основе потенциальных полей. Методы используются достаточно широко как для двухмерных, так и для трехмерных случаев. Движение планируется вдоль линий векторного поля [1, 10], потенциальная функция которого определяется расположением препятствий и их формой. В качестве потенциальной функции наиболее часто методы используют:

- виртуальное силовое поле;
- Ньютоновское потенциальное поле;
- супербиквадратное потенциальное поле;
- гармоническое векторное поле;

Робот рассматривается как материальная точка, движущаяся под действием силы притяжения к целевой точке и сил отталкивания от препятствий. Потенциальная функция [1] может быть записана в виде следующего уравнения.

$$U(q) = U_{att}(q) + \sum U_{rep,i}(q) \quad (1)$$

где $U_{att}(q)$ – притягивающая потенциальная функция, заданная для точки q ; $\sum U_{rep,i}(q)$ – слагаемые отталкивающей потенциальной функции, соответствующие отдельным препятствиям. Притягивающая потенциальная функция может быть задана как уравнение

$$U_{att}(q) = \frac{1}{2} k_p (q - q_g)^2 \quad (2)$$

где k_p – коэффициент, определяющий силу притяжения к целевой точке F_{att} , которое может быть описано следующим образом

$$F_{att}(q) = -\nabla U_{att}(q) = -k_p (q - q_g) \quad (3)$$

Для каждого i -го препятствия потенциальная функция может быть описана уравнениями 4 и 5

$$U_{rep,i}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{ri} \left(\frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_{oi}} \right)^2 (q - q_g)^n & \rho \leq \rho_o \\ 0 & \rho > \rho_o \end{cases} \quad (4)$$

$$F_{rep,i}(q) = \begin{cases} F_{rep,i}^1 n_1 + F_{rep,i}^2 n_2 & \rho \leq \rho_o \\ 0 & \rho > \rho_o \end{cases} \quad (5)$$

Суперпозиция векторной суммы, притягивающей и отталкивающих сил определяет направление движения робота. Под действием этих сил робот объезжает препятствия и движется к целевой точке. Известны различные модификации метода потенциальных функций в зависимости от особенностей применения и условий реализации.

К основным недостаткам методов на основе потенциальных полей относятся возможность попадания робота в локальные минимумы между препятствиями, а также возможность «осцилляций траектории». Известны модификации метода потенциальных полей для устранения таких недостатков в условиях динамической среды [9, 18, 19]. Методы на основе потенциальных полей малоэффективны при планировании траекторий

движения робота в условиях подвижных препятствий с неопределенными параметрами.

Планирование и управление движением робота с учетом стохастичности параметров препятствий. На основе анализа известных методов планирования траекторий движения мобильных роботов были сделаны выводы о том, что для управления движением мобильного робота в среде с подвижными и неподвижными препятствиями необходимо разработать метод планирования, в основе которого должен лежать учет вероятности достижения роботом конкретных точек на местности с учетом вероятности возможных столкновений с препятствиями [20].

При разработке метода авторы исходили из того, что при наличии подвижных препятствий наилучшая траектория не может быть найдена до начала движения. Несмотря на наличие некоторой априорной информации о положении и параметрах движения подвижных препятствий их стохастичность обуславливает уменьшение надежности прогноза столкновений с увеличением интервала прогнозирования. В этом случае планироваться может перемещение робота на определенном временном интервале, при соответствующем уровне прогнозной оценки вероятности столкновения на данном интервале. Планирование и управление движением мобильного робота могут быть осуществлены при наличии: навигационной информации о собственном положении, текущем положении препятствий, движущихся «случайным» образом [4, 21, 22, 23]; определенных на планируемый интервал времени параметрах стохастических оценок направления движения подвижных препятствий.

Задачи исследования были сформулированы следующим образом:

- разработать метод планирования траекторий движения мобильного робота в среде со статическими и динамическими препятствиями в условиях неопределенности движения препятствий;
- разработать метод управления траекторным движением мобильного робота с учетом изменяющейся текущей обстановки;
- создать дискретно-непрерывную имитационную модель движения объектов в рабочей области с учетом стохастичности параметров движения препятствий;
- разработать метод динамического планирования траектории движения мобильного робота с изменяемым временем прогноза событий;
- провести вычислительный эксперимент (моделирование) по планированию траекторий и движению мобильного робота на основе предложенных решений при наличии динамических препятствий.

Метод. В данной статье предлагается метод планирования траектории движения мобильного робота на основе имитационного моделирования изменяющейся обстановки. Будем считать, что положение целевой точки, куда должен прибыть робот, известно и не изменяется. Также введем некоторые допущения:

- динамические препятствия могут изменять направление своего движения случайным образом;
- параметры законов распределения случайных величин (направления и движения) известны и определяются математическим ожиданием M_{α_0} , среднеквадратическим отклонением σ_{α_0} сигма, и дисперсией угла направления движения D_{α_0} ;
- скорость движения препятствий известна;
- координаты и вектор скорости каждого препятствия доступны для измерения через некоторый интервал времени $t_{изм}$.

Авторами поставленные задачи были решены с учетом следующих допущений и условий – координаты статических препятствий априорно известны; динамические препятствия имеют известную скорость движения; динамические препятствия могут изменять направление своего движения случайным образом; для динамических препятствий параметры законов распределения случайных величин известны; координаты и вектор скорости динамических препятствий «доступны для измерения» в дискретные моменты времени через некоторый интервал времени.

Указанные допущения справедливы в предположении, что системой управления робота (или внешней системой) осуществляется мониторинг области, где происходит движение робота. Практическая реализация такого мониторинга возможна на основе лазерных дальнометрических датчиков, системы технического зрения или лидаров. В ходе такого мониторинга выполняется оценка текущего положения каждого препятствия и параметров его движения, в предположении что вектор скорости может быть описан нормальным законом распределения случайной величины. Следует отметить, что для системы управления робота информация о препятствиях обновляется через интервал времени $t_{изм}$, который превышает интервал времени принятия решений о параметрах движения робота. t_p .

С точки зрения процесса имитационного моделирования рассмотрим движение робота к целевой точке с координатами X_g, Y_g в условиях неподвижных и подвижных препятствий. Каждое препятствие определено своими координатами X_{oi}, Y_{oi} и параметрами движения $V_{oi}, M_{\alpha_{oi}}$,

D_{aoi} , σ_{aoi} . Где V_{oi} – текущая оценка скорости движения каждого препятствия, M_{aoi} , D_{aoi} , σ_{aoi} – математическое ожидание, дисперсия и среднее квадратическое отклонение направления движения каждого подвижного препятствия. Имитационная модель разработана и реализована в среде Matlab.

Введем понятие горизонта событий, под которым будем понимать интервал времени t_0 для которого будет выполняться прогноз движения

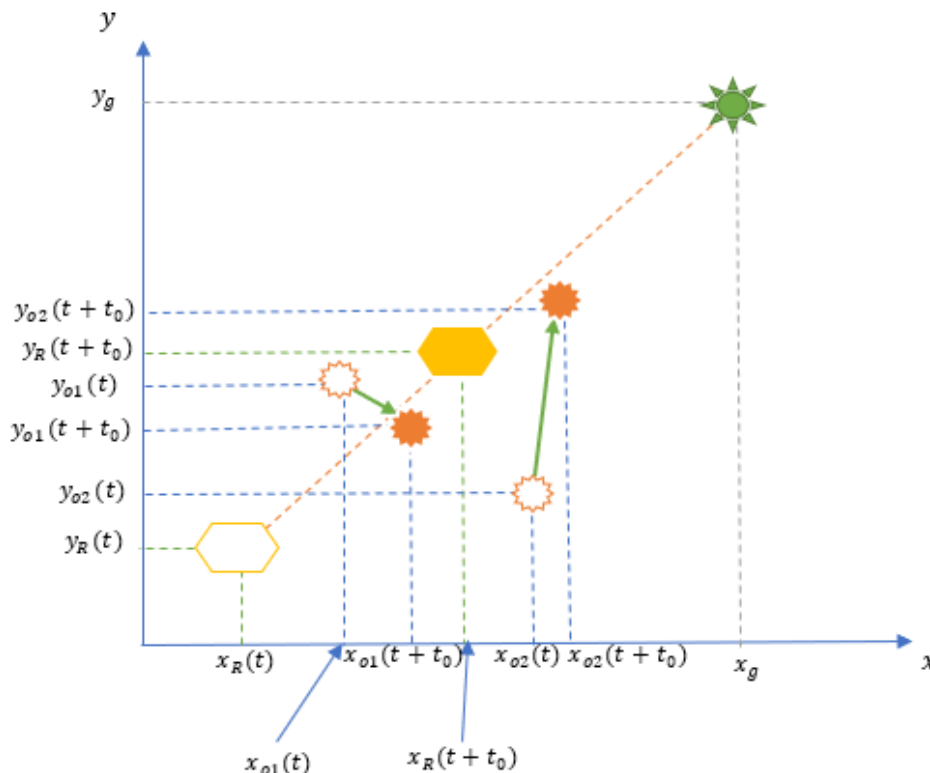


Рис. 1. Расположение мобильного робота и препятствий на планируемом интервале времени t_0

Светлыми окружностями обозначены начальные положения препятствий, темными – положения препятствий в конце интервала прогнозирования t_0 . Конечное положение препятствий определяется как результат его движения с вероятностными характеристиками, известными в момент времени t . Чем больше будет величина горизонта прогноза t_0 , тем меньше надежность прогноза. Следовательно, возрастает вероятность не обнаружения возможного столкновения. Однако, уменьшение прогнозируемого интервала значительно меньше величины $t_{изм}$ из-за возрастания вычислительных издержек системы управления без адекватного (соответствующего) роста качества планирования траектории движения робота. В общем случае выбор значения t_0 зависит от скоростных и динамических характеристик робота, имеющегося времени $t_{изм}$ информационно-измерительной подсистемы.

Логика предлагаемого метода планирования траектории робота и его движения к целевой

препятствий и оцениваться вероятность столкновения с ними мобильного робота. Выбор «наилучшего значения» t_0 является нетривиальной задачей и в данной статье не рассматривается.

Поясним логику принятия решений и действий на уровне бортовой системы управления роботом соответствующую положению объектов в рабочей области, показанной на рисунке 1.

точке иллюстрируется алгоритмом, приведенном на рисунке 2.

В момент времени t , на основе текущих данных о расположении целевой точки, робота, препятствий и параметров их движения выполняется оценка положения препятствий к моменту времени $t+t_0$. Для робота выбирается направление движения на целевую точку и прогнозируется его положение в момент времени $t+t_0$. Движение робота на интервале времени t_0 произойдет без столкновений с препятствиями, если при перемещениях робота и препятствий выполняются условия

$$R_r + r_{oi} < \sqrt{((x_r - x_{oi})^2 + (y_r - y_{oi})^2)} \quad (6)$$

где R_r – радиус зоны безопасности вокруг робота, r_{oi} – радиус зоны безопасности вокруг соответствующего препятствия, x_r, y_r – текущие координаты робота, x_{oi}, y_{oi} – координаты препятствий.

Если существует вероятность столкновения робота, то возможны два решения. Если столкновение может произойти с неподвижным препятствием, то выполняется его обход, критерием выбора лучшего варианта при этом является мини-

мальный путь (время) обхода. Если столкновение возможно с движущимся препятствием, то выполняется изменение планируемой скорости движения робота и еще раз выполняется прогноз возможности столкновения.

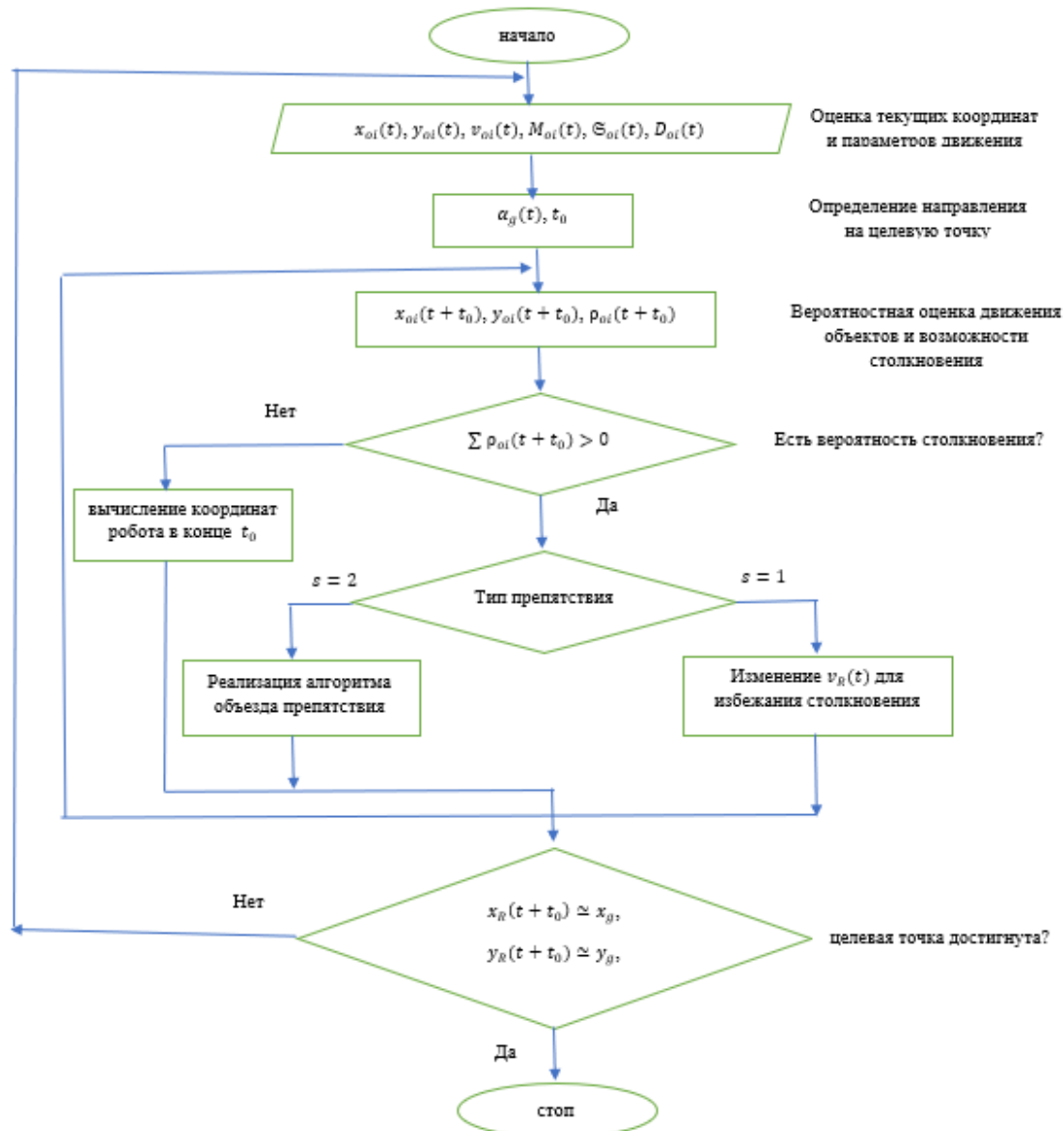


Рис. 2. Общий алгоритм достижения целевой точки

Результаты. Результаты планирования траектории движения мобильного робота на основе имитационного моделирования изменяющейся обстановки приведены ниже. На рисунке 3 показано построение траектории движения робота при наличии в рабочей зоне неподвижных препятствия. На каждом интервале планирования определялась промежуточная точка, в которую робот должен переместиться за время t_0 (определяется горизонтом событий).

Результаты планирования траектории движения мобильного робота на основе имитационного моделирования изменяющейся обстановки приведены ниже. На рисунке 3 показано построение траектории движения робота при наличии в

рабочей зоне неподвижных препятствия. На каждом интервале планирования определялась промежуточная точка, в которую робот должен переместиться за время t_0 (определяется горизонтом событий).

Проверка работоспособности метода для случая статических и динамических препятствий иллюстрируется на рисунке 4. Кроме неподвижных препятствий в рабочей зоне имеются подвижные препятствия, направление движения которых изменяется случайным образом. Траектории движения препятствий показаны синими линиями.

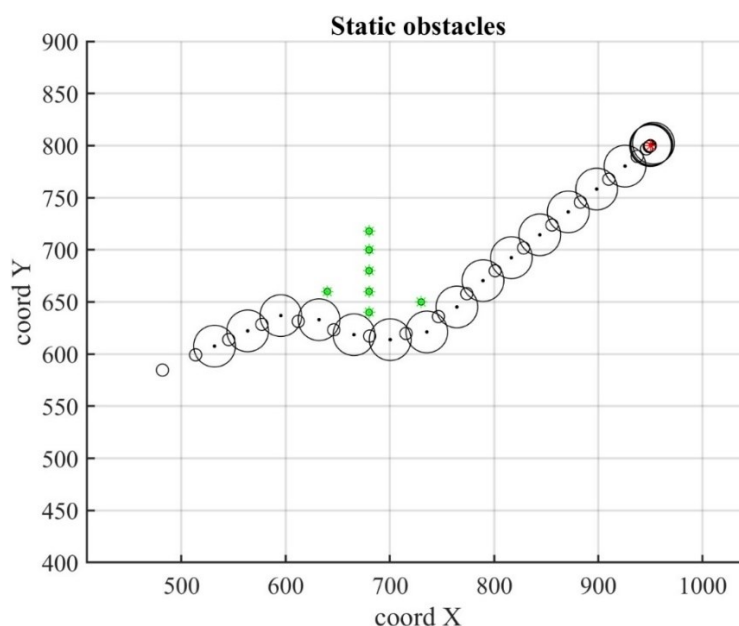


Рис. 3. Планирование и движение по траектории при статических препятствиях

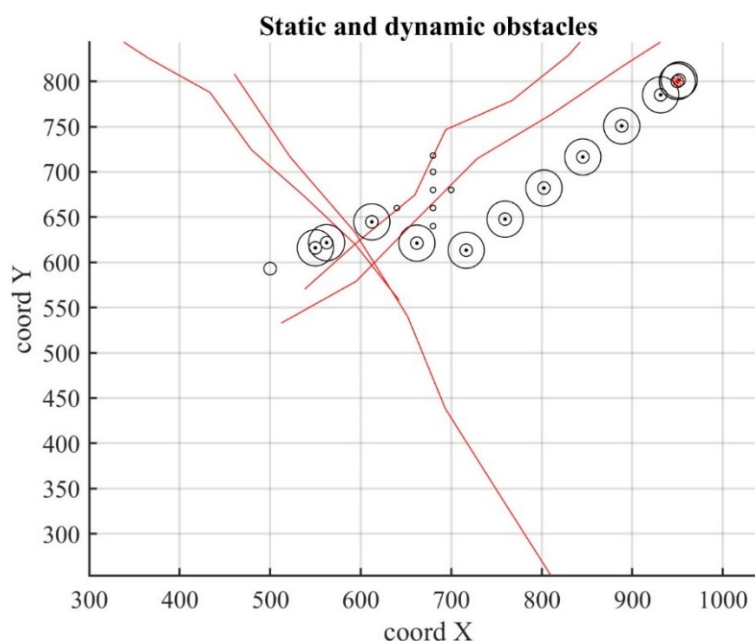


Рис. 4. Планирование и движение по траектории при статических и динамических препятствиях

На рисунке видно, что на втором интервале планирования движения, было обнаружена возможность столкновения робота с подвижным препятствием, движущимся из начальной точки $x=650$, $y=560$. Для предотвращения столкновения была уменьшена скорость робота. И еще раз выполнен прогноз возможности столкновения. Если столкновения не произойдет, робот перемещается в новую промежуточную точку. После этого осуществляется планирование траектории движения мобильного робота на новом интервале времени, определяющим горизонт событий.

Обсуждение результатов. В предложенном методе планирования и управления движением робота учитывается случайный характер движения динамических препятствий. Для ситуаций

возможного столкновения реализовано несколько стратегий, обеспечивающих безопасное движение робота. В зависимости от сложившейся ситуации реализуются различные алгоритмы поведения робота. Стратегии поведения робота отличаются для ситуаций при его опасном сближении с неподвижными и подвижными препятствиями.

Предложенный метод обеспечивает безопасное перемещение робота в целевую точку.

Метод позволяет задавать величину зоны безопасности при планировании траектории движения робота и при необходимости изменять ее в зависимости от принятого времени прогнозирования – горизонта событий.

Объезд неподвижных препятствий осуществляется наилучшим образом для минимизации времени движения к целевой точке.

Дальнейшие улучшения предложенного метода будут включать следующие решения:

Определение наилучшей промежуточной точки для движения при объезде статических и динамических препятствий с учетом прогноза изменения их расположения на интервале, превышающем принятое время прогнозирования;

Реализация долгосрочного прогнозирования изменений обстановки в зоне движения мобильного робота для принятия стратегических и тактических решений. Это позволит избегать ситуаций, не имеющих решения и планировать близкие к оптимальной траектории безопасного движения мобильного робота.

Выводы. Выполненные эксперименты с математическим моделированием процессов планирования и управления движением мобильного робота позволяют сделать следующие выводы.

1. Разработан метод планирования траектории движения мобильного робота в среде с неподвижными и подвижными препятствиями, в том числе имеющими случайный характер изменения векторов скорости подвижных препятствий; Метод учитывает возможные столкновения на заданном временном интервале горизонта прогноза;

2. Разработанный метод реализует несколько стратегий предотвращения столкновений, в том числе для объезда неподвижных и подвижных препятствий с изменением собственной скорости и направления движения;

3. Разработана имитационная модель, реализующая дискретно-непрерывный процесс движения объектов в некоторой области;

4. Результаты моделирования показали эффективность планирования траекторий и управления движением робота в условиях неподвижных и подвижных препятствий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Liu V. Methods of path planning in an environment with obstacles (review) // Mathematics and mathematical modeling: a network scientific publication. Moscow: MGTU. 2018. No. 01. Pp. 15–58. DOI: 10.24108 / mathm.0118.0000098.
2. Lim C.W., Yong L.S., Ang M.H. Hybrid of global path planning and local navigation implemented on a mobile robot in indoor environment // Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC). Vancouver, Canada. 2002. Pp. 821–826. DOI: 10.1109/ISIC.2002.1157868.
3. Zhenyu W., Lin F. Obstacle prediction-based dynamic path planning for a mobile robot // International Journal of Advancements in Computing Technology. 2012. Vol. 4. No. 3. Pp. 118–124.
4. Хоанг Д.Т., Пыркин А.А. Траекторное управление мобильным роботом в условиях неопределенности // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64. №8. С. 608–619.
5. Дас Н.Ч., Скакун А.Д., Зим З.Х., Уддин Р. Алгоритм планирования траектории мобильного робота // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2021. Т. 1. С. 228–231.
6. Федоров В.М., Шарлай А.С. Обзор известных методов построения системы навигации для реализации возможности автономного перемещения мобильных роботов в среде с препятствиями // В сборнике: информационные технологии в современном инженерном образовании. материалы межвузовской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2020. С. 241–245.
7. Страшнов Е.В., Торгашев М.А. Моделирование движения колесных роботов по ровной поверхности в системах виртуального окружения // В сборнике: Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн. Материалы VI Международной научно-практической конференции. 2020. С. 149–154.
8. Цинь Ч. Исследование алгоритма slam роботов на основе оптимизации графов // StudNet. 2021. Т. 4. №7. С. 63–76.
9. Карпасюк И.В. Модификация метода потенциалов для поиска путей на взвешенном графе // В сборнике: Технические средства систем управления и связи = International Scientific Forum on Control and Engineering. Международный научный форум. Материалы V Международной конференции «Информационные технологии и технические средства управления» (ICCT-2021), 14-й Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (ARMIMP-2021). Астрахань, 2021. С. 248–250.
10. Jing R., McIsaac K.A., Patel R.V. Modified Newton's method applied to potential field-based navigation for mobile robots // IEEE Transactions on Robotics. 2006. Vol. 22. No. 2. Pp. 384–391.
11. Shiltagh N., Jalal L. Optimal path planning for intelligent mobile robot navigation using modified particle swarm optimization // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2013. Vol. 2. No. 4. Pp. 260–267.
12. Yee Z.C., Ponnambalam S.G. Mobile robot path planning using ant colony optimization // IEEE/ASME International Conference on Advanced

Intelligent Mechatronics. Singapore, 2009. Pp. 851–856. DOI: 10.1109/AIM.2009.5229903.

13. Moreno J.A., Castro M. Heuristic algorithm for robot path planning based on a growing elastic net // Progress in artificial intelligence: 12th Portuguese conf. on artificial intelligence: EPIA 2005 (Covilhã, Portugal, December 5-8, 2005): Proc. B.: Springer, 2005. Vol. 3808. Pp. 447–454. DOI: 10.1007/11595014_44.

14. Антонов В.О., Гурчинский М.М., Петренко В.И., Тебуева Ф.Б. Метод планирования траектории движения точки в пространстве с препятствием на основе итеративной кусочно-линейной аппроксимации // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 1. С. 168–182.

15. Medvedev M., Pshikhov V. Path planning of mobile robot group based on neural networks // Lecture Notes in Computer Science 2020. Vol. 12144LNAI. Pp. 51–62. DOI: 10.1007/978-3-030-55789-8_5.

16. Pshikhov V.Kh., Gurenko B.V., Medvedev M.Yu. Algorithms of adaptive position-trajectory control systems of moving objects // Control problems. 2015. No. 4. Pp. 66–75.

17. Скороспехов Ю.В., Куделин А.С., Григорьев Г.К. Проблемы автономного управления и ориентации в пространстве военных робототехнических комплексов // В сборнике: научная сессия гуап: гуманитарные науки. Сборник докладов традиционной Научной сессии, посвященной Всемирному дню авиации и космонавтики. Санкт-Петербург, 2020. С. 160–163.

18. Ge S.S., Cui Y.J. New potential functions for mobile robot path planning // IEEE Trans. on Robotics and Automation. 2000. Vol. 16. No. 5. Pp. 615–620. DOI: 10.1109/70.880813

19. Jing R., McIsaac K.A., Patel R.V. Modified Newton's method applied to potential fieldbased navigation for mobile robots // IEEE Trans. on Robotics. 2006. vol. 22. No. 2. Pp. 384–391. DOI: 10.1109/TRO.2006.870668

20. Яковлев Д.С., Тачков А.А. Вероятность столкновения автономного мобильного робота с препятствием // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22. №3. С. 125–133.

21. Звонарев И.С., Караваев Ю.Л. Анализ систем управления мобильных роботов с элементами интеллектуального управления // В сборнике: "Выставка инноваций - 2021" (осенняя сессия). Сборник материалов XXXII Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов. Ижевск, 2021. С. 62–67.

22. Лапшинов С.А., Шахнов В.А., Юдин А.В. Направления интеллектуализации управления движением мобильного робота // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2021. Т. 23. №1. С. 50–62.

23. Баженов Е.И., Мокрушин С.А., Охапкин С.И. Анализ и выбор принципа построения системы ориентации мобильного робота // Системы управления и информационные технологии. 2021. №2 (84). С. 27–30.

Информация об авторах

Алхалили Алак Сабах, аспирант кафедры робототехника и мехатроника. E-mail: alaqsabab@yahoo.com. Донской государственный технический университет. Россия, 344002, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1.

Лукьянов Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры робототехника и мехатроника. E-mail: lukevgan@gmail.com. Донской государственный технический университет. Россия, 344002, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1.

Поступила 08.04.2022 г.

© Алак Сабах Алхалили, Лукьянов Е.А., 2022

***Alaq Sabab Alkhaleeli, Lukyanov E.A.**

Don State Technical University

*E-mail: alaqsabab@yahoo.com

MOTION CONTROL OF A WHEELED MOBILE ROBOT BASED ON SIMULATION

Abstract. A mobile robot is a complex system capable of receiving information about the outside world and using it to move safely in a purposeful way. The work information subsystem can determine its position using sensors, as well as the location of static and dynamic objects in the workspace. The robot's movement to the target point is carried out according to various algorithms. These algorithms implement various methods of planning the trajectory of movement to the target point: to prevent the robot from colliding with barriers, to reduce the travel time and distance traveled to save battery power. Mobile robots can function in a dynamic environment with a significant degree of uncertainty. One of the main tasks of a mobile robot is planning

trajectories by controlling the movement of the robot to reach target point. This article proposes a method for planning trajectory of a mobile robot by controlling its movement. The method is based on simulation of the movement of a mobile robot in an environment with fixed and movable barriers. It is assumed that the direction of dynamic obstacles can change randomly.

Keywords: wheeled mobile robot, robot trajectory planning, stochastic control, collision prediction, robot motion control.

REFERENCES

1. Liu V. Methods of path planning in an environment with obstacles (review). Mathematics and mathematical modeling: a network scientific publication. Moscow: MGTU. 2018. No. 01. Pp. 15–58. DOI: 10.24108 / mathm.0118.0000098.
2. Lim C. W., Yong L. S., Ang M.H. Hybrid of global path planning and local navigation implemented on a mobile robot in indoor environment. Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC). Vancouver, Canada. 2002. Pp. 821–826. DOI: 10.1109/ISIC.2002.1157868.
3. Zhenyu W., Lin F. Obstacle prediction-based dynamic path planning for a mobile robot. International Journal of Advancements in Computing Technology. 2012. Vol. 4. No. 3. Pp. 118–124.
4. Hoang D.T., Pyrkun A.A. Trajectory control of a mobile robot under uncertainty [Trayektornoye upravleniye mobil'nym robotom v usloviyakh neopredelennosti]. Izv. vuzov. Instrumentation. 2021. Vol. 64. No.8. Pp. 608–619. (rus)
5. Das N.Ch., Skakun A.D., Zim Z.Kh., Uddin R. Algorithm for planning the trajectory of a mobile robot [Algoritm planirovaniya trayektorii mobil'nogo robota]. Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam. 2021. Vol. 1. Pp. 228–231. (rus)
6. Fedorov V.M., Sharlay A.S. A review of known methods for constructing a navigation system to implement the possibility of autonomous movement of mobile robots in an environment with obstacles [Obzor izvestnykh metodov postroyeniya sistemy navigatsii dlya realizatsii vozmozhnosti avtonomnogo peremeshcheniya mobil'nykh robotov v srede s prepyatstviyami]. V sbornike: informatsionnyye tekhnologii v sovremennom inzhernom obrazovanii. materialy mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Sankt-Peterburg, 2020. Pp. 241–245. (rus)
7. Strashnov E.V., Torgashev M.A. Modeling the movement of wheeled robots on a flat surface in virtual environment systems [Modelirovaniye dvizheniya kolesnykh robotov po rovnoy poverkhnosti v sistemakh virtual'nogo okruzheniya]. V sbornike: Virtual'noye modelirovaniye, prototipirovaniye i promyshlennyy dizayn. Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2020. Pp. 149–154. (rus)
8. Qin Ch. Investigation of slam robot's algorithm based on graph optimization [Issledovaniye algoritma slam robotov na osnove optimizatsii grafov]. StudNet. 2021. Vol. 4. No7. Pp. 63–76. (rus)
9. Karpasyuk I.V. Modification of the method of potentials for finding paths on a weighted graph [Modifikatsiya metoda potentsialov dlya poiska putey na vzveshennom grafe]. V sbornike: Tekhnicheskiye sredstva sistem upravleniya i svyazi = International Scientific Forum on Control and Engineering. Mezhdunarodnyy nauchnyy forum. Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii «Informatsionnyye tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva upravleniya» (ICCT-2021), 14-y Mezhdunarodnoy konferentsii «Akustoopticheskiye i radiolokatsionnyye metody izmereniy i obrabotki informatsii» (ARMIMP-2021). Astrakhan', 2021. Pp. 248–250. (rus)
10. Jing R., McIsaac K.A., Patel R.V. Modified Newton's method applied to potential field-based navigation for mobile robots. IEEE Transactions on Robotics. 2006. Vol. 22. No. 2. Pp. 384–391.
11. Shiltagh N., Jalal L. Optimal path planning for intelligent mobile robot navigation using modified particle swarm optimization. International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2013. Vol. 2. No. 4. Pp. 260–267.
12. Yee Z.C., Ponnambalam S.G. Mobile robot path planning using ant colony optimization. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Singapore, 2009. Pp. 851–856. DOI: 10.1109/AIM.2009.5229903.
13. Moreno J.A., Castro M. Heuristic algorithm for robot path planning based on a growing elastic net. Progress in artificial intelligence: 12th Portuguese conf. on artificial intelligence: EPIA 2005 (Covilhã, Portugal, December 5-8, 2005): Proc. B.: Springer, 2005. Vol. 3808. Pp. 447–454. DOI: 10.1007/11595014_44.
14. Antonov V.O., Gurchinsky M.M., Petrenko V.I., Tebueva F.B. Numerical method of planning a trajectory of pass obstacles based on an iterative piecewise-linear approximation [Metod planirovaniya trayektorii dvizheniya tochki v prostranstve s prepyatstviyem na osnove iterativnoy kusochno-lineynoy approksimatsii]. Systems of Control, Communication and Security. 2018. No. 1. Pp. 168–182. (rus)
15. Medvedev M., Pshikhov V. Path planning of mobile robot group based on neural networks. Lecture Notes in Computer Science 2020. T.

12144LNAI. Pp. 51–62. DOI: 10.1007/978-3-030-55789-8_5.

16. Pshikhov V.Kh., Gurenko B.V., Medvedev M.Yu. Algorithms of adaptive position-trajectory control systems of moving objects. Control problems. 2015. No. 4. Pp. 66–75.

17. Skorospekhov Yu.V., Kudelin A.S., Grigoriev G.K. Problems of autonomous control and orientation in space of military robotic complexes [Problemy avtonomnogo upravleniya i oriyentatsii v prostranstve voyennykh robototekhnicheskikh kompleksov]. V sbornike: nauchnaya sessiya guap: gumanitarnyye nauki. Sbornik dokladov traditsionnoy Nauchnoy sessii, posvyashchenoy Vsemirnomu dnyu aviatsii i kosmonavтики. Sankt-Peterburg, 2020. Pp. 160–163. (rus)

18. Ge S.S., Cui Y.J. New potential functions for mobile robot path planning. IEEE Trans. On Robotics and Automation. 2000. vol. 16. No. 5. Pp. 615–620. DOI: 10.1109/70.880813

19. Jing R., McIsaac K.A., Patel R.V. Modified Newton's method applied to potential fieldbased navigation for mobile robots. IEEE Trans. on Robotics. 2006. vol. 22. No. 2. Pp. 384–391. DOI: 10.1109/TRO.2006.870668

20. Yakovlev D.S., Tachkov A.A. The probability of an autonomous mobile robot colliding with an

obstacle [Veroyatnost' stolknoveniya avtonomnogo mobil'nogo robota s prepyatstviyem]. Mechatronics, automation, control. 2021. Vol. 22. No. 3. Pp. 125–133. (rus)

21. Zvonarev I.S., Karavaev Yu.L. Analysis of control systems of mobile robots with intelligent control elements [Analiz sistem upravleniya mobil'nykh robotov s elementami intellektual'nogo upravleniya]. V sbornike: "Vystavka innovatsiy - 2021" (osennyya sessiya). Sbornik materialov XXXII Respublikanskoy vystavki-sessii studenteskikh innovatsionnykh projektov. Izhevsk, 2021. Pp. 62–67. (rus)

22. Lapshinov S.A., Shakhnov V.A., Yudin A.V. Directions of intellectualization of motion control of a mobile robot [Napravleniya intellektualizatsii upravleniya dvizheniyem mobil'nogo robota]. Neurocomputers: development, application. 2021. Vol. 23. No.1. Pp. 50–62. (rus)

23. Bazhenov E.I., Mokrushin S.A., Okhapkin S.I. Analysis and choice of the principle of constructing the orientation system of a mobile robot [Analiz i vybor printsipa postroyeniya sistemy oriyentatsii mobil'nogo robota]. Control systems and information technologies. 2021. No. 2(84). Pp. 27–30. (rus)

Information about the authors

Alkhaleeli, Alaq S. Postgraduate student. E-mail: alaqsabab@yahoo.com. Don State Technical University. Russia, 344002, Rostov on Don, sq. Gagarina, 1.

Lukyanov, Evgeny A. PhD. E-mail: lukevgan@gmail.com. Don State Technical University. Russia, 344002, Rostov on Don, sq. Gagarina, 1.

Received 08.04.2022

Для цитирования:

Алак Сабах Алхалили, Лукьянов Е.А. Управление движением колесного мобильного робота на основе имитационного моделирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 8. С. 112–121. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-112-121

For citation:

Alaq Sabab Alkhaleeli, Lukyanov E.A. Motion control of a wheeled mobile robot based on simulation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 8. Pp. 112–121. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-112-121