

Научно-теоретический журнал

ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

6

2023

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

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

№ 6, 2023 год

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

Vol. 6. 2023

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

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

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

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

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

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 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	15.06.2023
Выход в свет	29.06.2023

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 11,74. Уч.-изд. л. 12,62. Тираж 40 экз. Заказ № 73

© ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 2023

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)
- 2.5.21. – Machines, aggregates and technological processes (technical sciences)

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

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

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 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:	15.06.2023

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

Айзенштадт Аркадий Михайлович, д-р хим. наук, проф., заведующий кафедрой композиционных материалов и строительной экологии Высшей инженерной школы, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (РФ, г. Архангельск).
Ахмедова Елена Александровна, 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).

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).

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

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

Мешерин 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 по научной работе и издательского 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).

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

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

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

Шاپовалов 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).

Aleksey N. Davidyuk, 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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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).

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

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

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

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

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

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

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

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

**Отман Азми С.А., Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Марголис Б.И.,
Новиченкова Т.Б.**

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННОГО
ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО НА ЕГО СВОЙСТВА 8

Хорина А.В., Шелковникова Т.И.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА
ВЫСОКОПРОЧНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ 17

Кладиева П.В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСЧЕТНОЙ ПРОЧНОСТИ
СТАЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ ЛЕНТ В СОСТАВЕ АРМИРОВАННЫХ
ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ БАЛОК 26

Мозголов М.В., Козлова Е.В.

ВЕРИФИКАЦИЯ СТЕРЖНЕВОЙ И ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МОДЕЛЕЙ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА SCAD РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО
КЕССОННОГО ПЕРЕКРЫТИЯ 35

Долженко А.В., Наумов А.Е., Щенятский О.А.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ПЛОСКИХ
РУЛОННЫХ КРОВЕЛЬ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТОВ ОЦЕНКИ
ИХ ФИЗИЧЕСКОГО ИЗНОСА 48

Тиратуриян А.Н., Семененя-Дусенко К.И., Дунча П.П.

ДИССИПАЦИЯ ЭНЕРГИИ КАК КРИТЕРИЙ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ
АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ
СТАДИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА 55

Качемцева Л.В., Арслан М.И.

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ «СОЦГОРОДА»
В АРХИТЕКТУРНОЙ И ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРАКТИКЕ
НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ В 1930-Х ГГ.
(НА ПРИМЕРЕ МИКРОРАЙОНА СОЦГОРОДОК Г. ВАЛУЙКИ) 65

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Григоренко А.А., Дуюн Т.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И АМПЛИТУДЫ ВЫНУЖДЕННЫХ
КОЛЕБАНИЙ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА 76

Ханина Е.Г., Гуденко О.В., Мордовская О.С., Анциферов С.И., Богданов В.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЩЕЛЕВЫХ ОТВЕРСТИЙ В ЛОПАСТЯХ
ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЛОПАСТНОГО СМЕСИТЕЛЯ НА КАЧЕСТВО
ПОДГОТОВКИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СУХОЙ СМЕСИ 85

Шубин А.А., Смолоник А.Е., Васильев В.А.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАКЛОННО-ПОВОРОТНОГО
УСТРОЙСТВА ДЛЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ 94

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Otman Azmi S.A., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Yu., Margolis B.I., Novichenkova T.B.	
INFLUENCE OF GRANULOMETRIC COMPOSITION OF THE COMPOSITE GYPSUM BINDER ON ITS PROPERTIES	8
Horina A.V., Shelkovnikova T.I.	
COMPARATIVE ANALYSIS OF THE STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF HIGH-STRENGTH CERAMIC PRODUCTS	17
Kladieva P.V.	
EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE DESIGN STRENGTH OF STEEL TOOTHED BELTS IN THE COMPOSITION OF REINFORCED CELLULAR CONCRETE BEAMS	26
Mozgolov M.V., Kozlova E.V.	
VERIFICATION OF CORE AND SOLID-STATE MODELS OF THE SCAD COMPUTING COMPLEX FOR THE CALCULATION OF REINFORCED-CONCRETE WAFFLE SLAB FLOOR SYSTEM	35
Dolzhenko A.V., Naumov A.E., Schenyatsky O.A.	
FLAT ROLL ROOFS LIFE CYCLE MANAGEMENT IMPROVING WITH ADVANCED TECHNICAL STATE INSPECTION	48
Tiraturyan A.N., Semenenya-Dusenko K.I., Duncha P.P.	
ENERGY DISSIPATION AS A CRITERION FOR ANALYZING THE CONDITION OF A HIGHWAY AT THE OPERATIONAL STAGE OF ITS LIFE CYCLE	55
Kachemtseva L.V., Arslan M.I.	
FEATURES OF THE IMPLEMENTATION OF THE CONCEPT OF "SOTSGOROD" IN ARCHITECTURAL AND URBAN PLANNING PRACTICE IN THE TERRITORY BELGOROD REGION IN THE 1930S. (ON THE EXAMPLE OF THE SOTSGORODOK MICRODISTRICT OF VALUYKI)	65

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Grigorenko A.A., Duun T.A.	
SIMULATION OF NATURAL FREQUENCIES AND FORCED OSCILLATION MAGNITUDES OF A VERTICAL MILLING MACHINE	76
Khanina E.G., Gudenko O.V., Mordovskaya O.S., Antsiferov S.I., Bogdanov V.S.	
INVESTIGATION OF INFLUENCE OF SLOTTED HOLES IN BLADES OF HORIZONTAL BLADE MIXER ON QUALITY OF PREPARATION OF TWO-COMPONENT DRY MIXTURE	85
Shubin A.A., Smolovik A.E., Vasiliev V.A.	
DEVELOPMENT OF THE DESIGN AND RESEARCH OF THE TILT-TURNING DEVICE FOR MULTIFUNCTIONAL COMPLEXES	94

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-8-16

^{1,*}Отман Азми С.А., ¹Чернышева Н.В., ¹Дребезгова М.Ю., ²Марголис Б.И.,
²Новиченкова Т.Б.

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

²Тверской государственный технический университет

*E-mail: azmiothman2222@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННОГО ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО НА ЕГО СВОЙСТВА

Аннотация. Первоочередной задачей технологов-проектировщиков является оптимизация структуры и свойств строительных композиционных материалов, достижение которой позволяет одновременно повысить их экономичность, надежность и долговечность. В статье представлены результаты определения гранулометрического состава композиционного гипсового вяжущего (КГВ) путем расчетно-экспериментального моделирования по известным уравнениям «идеальных» кривых. В связи с тем, что при проектировании состава вяжущего одной из главных задач является оптимизация его структуры на микроуровне с нахождением наилучших соотношений размеров и количественного содержания частиц в твердеющей системе для создания плотной упаковки, в работе было проведено сравнение гранулометрических составов 3-х, 4-х и 5-и компонентных КГВ. Установлено, что разработанный 5-ти компонентный состав КГВ, включающий (% по массе): 68 % гипсового вяжущего (Г5Б-II–70 % и ГВВС-16–30 %), 10 % портландцемента, 20 % тонкодисперсного кварцевого песка, 0,5 % метакрилат ВМК-45 и 1,5 % известняковой пыли, по соотношению компонентов и их гранулометрическому составу отклоняется от рассчитанного с помощью компьютерной программы по уравнению «оптимальной» кривой Функа–Дингера на 15,3 %, что обуславливает более плотную упаковку его частиц с повышением средней плотности, прочностных показателей и коэффициента размягчения даже при снижении содержания гипсового вяжущего.

Ключевые слова: композиционное гипсовое вяжущее, гранулометрический состав, плотность упаковки, свойства

Введение. Разработка конкурентоспособных строительных материалов, отвечающих современным требованиям по качеству, эксплуатационным характеристикам, эффективности и безопасности, является одной из приоритетных задач строительного материаловедения на современном этапе развития строительной отрасли [1]. По сравнению с другими вяжущими, наиболее эффективными для этих целей являются композиционные гипсовые вяжущие (КГВ), обладающие разным уровнем марочной прочности, низкими значениями плотности и теплопроводности, хорошей огнестойкостью, звукоизолирующими свойствами и др., что позволяет рекомендовать их для применения в строительстве, тем самым внести реальный вклад в реализацию национальной программы «Доступное и комфортное жилье» [2, 3].

Большинство КГВ представляют собой многокомпонентные, многофазные системы, содержащие обязательные тонкодисперсные компоненты: гипсовое вяжущее, включающее одну или несколько модификаций и выполняющее функцию регулируемого раннего схватывания и быстрого набора прочности; гидравлический компонент, включающий активированный портландце-

мент совместно с активной минеральной добавкой оптимальной дисперсности. На поверхности активной минеральной добавки при измельчении образуется нарушенный микрослой, содержащий в ограниченном количестве аморфный SiO_2 , который способен при обычных температурах связывать $\text{Ca}(\text{OH})_2$, выделяющийся при гидратации минералов цементного клинкера с образованием нерастворимых соединений, то есть обладает пуццолановой активностью. При этом связывание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ кремнеземом активных минеральных добавок должно происходить как в первоначальный период структурообразования, так и при длительном твердении. В результате обеспечивается гидравлическость КГВ и дальнейший рост прочности за счет формирования нового типа структуры, способствуя повышению долговечности и других свойств образующегося камня.

К таким новым типам структур относятся кластерные и решеточные структуры, которые образуются как в результате энергоемкого процесса перемешивания и помола компонентов КГВ, так и в результате самопроизвольно протекающих явлений самоорганизации в результате сложной совокупности физико-химических процессов, приводящих к образованию новых гид-

ратных веществ (по сравнению с гипсовым вяжущим), которые обуславливают их основные свойства и приближают к портландцементу.

Наряду с химическим составом, регулирование свойств КГВ с достижением наибольшей плотности упаковки частиц обеспечивается подбором оптимального гранулометрического состава его компонентов (гипсового вяжущего, цемента, минеральной добавки и наполнителя), их распределением по размерам и количественным содержанием в твердеющей системе, а также степенью их участия в формировании структуры затвердевшего гипсоцементного вяжущего, начиная с самых ранних стадий гидрато- и структурообразования [4–6].

Целью данного исследования являлось определение оптимального гранулометрического состава КГВ с плотной упаковкой частиц с применением компьютерного анализа и комплексного автоматизированного его подбора.

В мировой и отечественной практике для описания гранулометрического состава плотных полидисперсных упаковок частиц предлагаются различные методы расчета и формулы «оптимальных» кривых: Абрамса, Болломея, Гуммеля, Дая, Фуллера, Функа–Дингера, Белова В.В., Хархардина А.Н. и др. [7–17]. Эти зависимости имеют вид:

$$A = f(D) \quad (1)$$

где A – проходы зерен, %, D – размеры зерен, мм.

Расчет оптимального гранулометрического состава КГВ с плотной упаковкой тонкодисперсных частиц определяли с помощью уравнения «оптимальной» кривой Функа–Дингера (2), которое, по мнению авторов [8–12], наиболее точно описывает реальную тонкодисперсную систему с учетом наличия мелких фракций и различной

формы зерен. С учетом коэффициента формы частиц, уравнение имеет вид:

$$Ai = 100[(\alpha + (1 - \alpha) \frac{di^n - d^{nmin}}{d^{nmax} - d^{nmin}})] \quad (2)$$

где Ai – проход частиц, %, через условное сито размером di , мм;

$dmax$ – наибольший размер зерна в смеси, мм;

$dmin$ – наименьший размер зерна в смеси, мм;

n – коэффициент распределения, равный по Функу–Дингеру – 0,5.

Коэффициент α для частиц реальных сыпучих систем по данным многих исследователей [7, 8] может изменяться в пределах от 0,08 до 0,14. В расчетах принят коэффициент $\alpha = 0,1$.

Материалы и методы. При исследовании влияния рецептурных параметров на формирование оптимальной структуры затвердевшего КГВ применяли:

– гипсовое вяжущее, включающее две модификации: α - и β -модификацию (70 % Г-5Б II и 30 % ГВВС-16), «Самарский гипсовый комбинат»;

– портландцемент (ЦЕМ I 42,5 Н), «Новоросцемент»;

– минеральные добавки: тонкодисперсный кварцевый песок с удельной поверхностью 500 м²/кг) и метакаолин ВМК-45 с удельной поверхностью 1490 м²/кг. Кварцевый песок предварительно сушили, а затем, согласно ГОСТ 310.2-810, мололи в лабораторной вибрационной мельнице.

– наполнитель: известняковую пыль с удельной поверхностью 480 м²/кг.

Химический состав минеральных добавок представлен в табл.1

Таблица 1

Химический состав минеральных добавок и наполнителя

Компонент	Оксиды (масс.%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
кварцевый песок	91,0	4,54	0,29	0,09	2,6	0,27	0,45	0,65	0,003
метакаолин	56,1	40,5	0,9	-	0,16	-	0,15	0,79	-
известняк	4,25	1,67	0,43	0,06	28,48	20,17	0,12	0,19	0,098

Основная часть. В ранее проведенных исследованиях [4], выполненных коллективом авторов, был установлен рациональный состав КГВ (% по массе): 68 % гипсового вяжущего, включающего 70 % Г-5Б- II и 30 % ГВВС-16; 10 % портландцемента; 20 % тонкодисперсного кварцевого песка; 0,5 % метакаолина ВМК-45 и 1,5 % известняковой пыли.

В данном исследовании первоначально с помощью метода лазерной гранулометрии, позволяющего исследовать частицы размерами от 0,2 до 600 мкм (на установке MicroSizer 201), разбивая указанный диапазон частиц на 40 фракций, был проведен анализ гранулометрического состава гипсового вяжущего, цемента, минеральных добавок и наполнителя, а также КГВ с их использованием (рис. 1, рис.2).

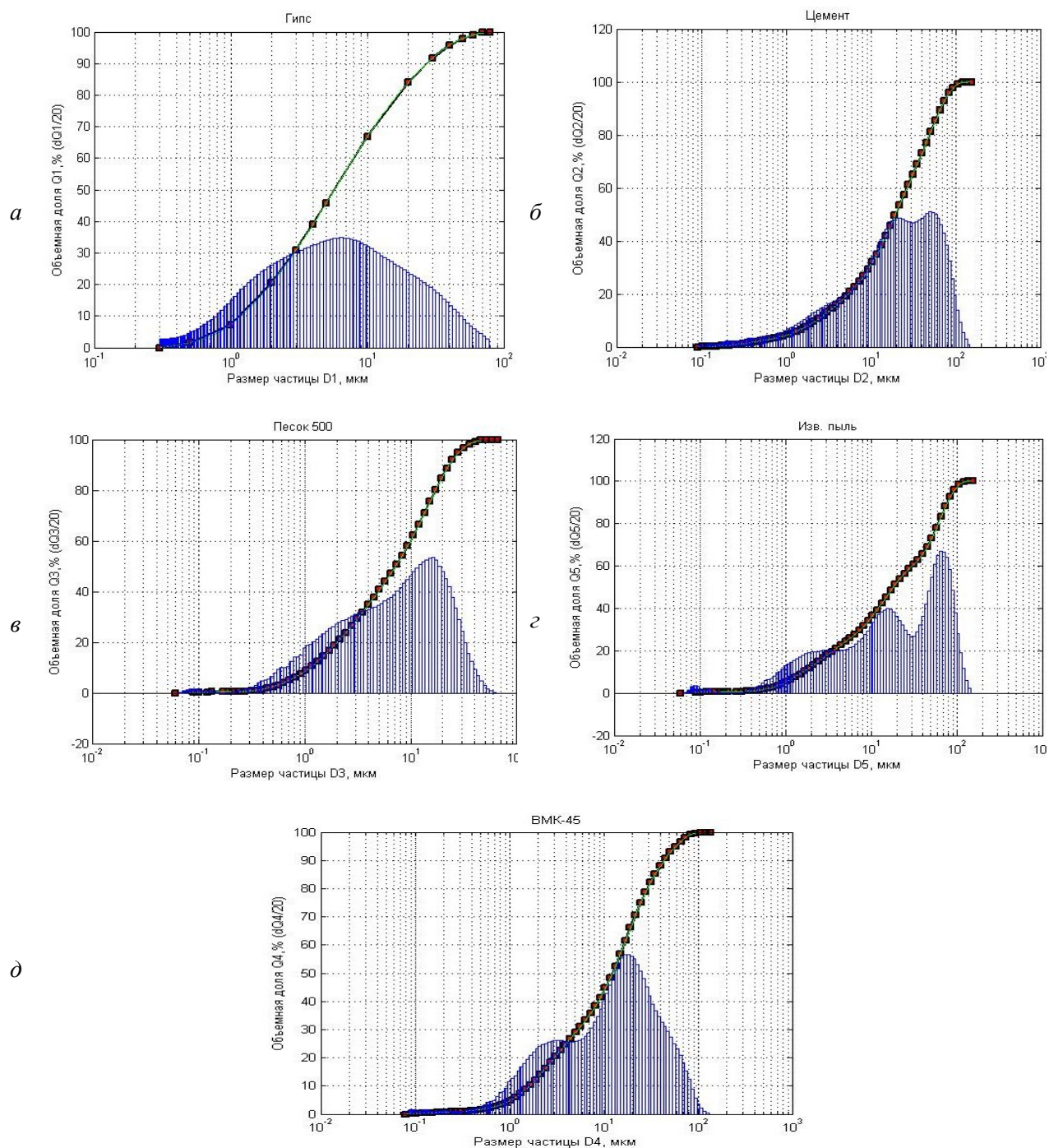


Рис. 1. Гранулометрические составы тонкодисперсных компонентов КГВ:
 а – гипсовое вяжущее; б – портландцемент; в – кварцевый песок; г – известняковая пыль;
 д – метакралин БМК-45

Результаты анализа выявили существенное различие в гранулометрии компонентов КГВ. Установлено, что у гипсового вяжущего (рис.1, а) график распределения частиц по размерам одномодальный, плавный с пиком в области частиц 5,5–6,9 мкм. Основной диапазон частиц находится в интервале от 0,5 до 40 мкм с максимумом (90%) в области 27,314 мкм; 50 % частиц составляет фракция размером 5,751 мкм и 10 % – фракция частиц размером 1,197 мкм.

У портландцемента (рис.1, б) кривая имеет прерывистый характер с двумя небольшими пиками в области частиц 19,45 мкм и 51,37 мкм. Основной диапазон частиц находится в интервале от 0,1 до 154 мкм с максимумом (90 %) в области 66,94 мкм; 50 % частиц составляет фракция размером 19,59 мкм и 10 % – фракция частиц размером 2,27 мкм.

У тонкодисперсного кварцевого песка (с удельной поверхностью $500 \text{ м}^2/\text{кг}$) кривая распределения частиц по размерам одномодальная, плавная. Основной диапазон частиц находится в интервале от 1 до 150 мкм с максимумом (90 %) в области 22,9 мкм; 50 % частиц составляет фракция размером 7,14 мкм и 10 % – фракция частиц размером 1,12 мкм (рис. 1, в).

Песчаная фракция отсева дробления известняка (известняковая пыль) имеет прерывистую гранулометрию частиц с наличием 3-х четких пиков на интегральной кривой в области частиц 2 мкм, 14,6 мкм и 60 мкм. Основной диапазон частиц находится в интервале от 1 до 90 мкм, 90 % составляют фракции частиц размером 77,32 мкм, 50 % – 18,27 мкм и 10 % – 1,62 мкм. (рис. 1, г).

У высокоактивного метакриолита ВМК-45 кривая распределения частиц по размерам имеет прерывистый характер с двумя пиками в области частиц 2,75 мкм и 17,12 мкм, содержит значительное количество мелких частиц размером от 1 до 5 мкм. Основной диапазон частиц находится в интервале от 0,09 до 136,4 мкм с максимумом (90 %) в области 44,02 мкм; 50 % оставляют частицы размером 12,43 мкм и 10 % – частицы размером 1,63 мкм (рис. 1, д).

Как известно [8], для реальных сыпучих вяжущих систем характерно полидисперсное распределение частиц по размерам и получение «оптимальной» гранулометрической кривой возможно при использовании специально подготовленных «узких» фракций.

В связи с этим были приготовлены тонкодисперсные смеси вяжущих следующих составов:

а – 3-х компонентное вяжущее (гипсовое вяжущее + портландцемент + тонкодисперсный кварцевый песок);

б – 4-х компонентное вяжущее (гипсовое вяжущее + портландцемент + тонкодисперсный кварцевый песок + метакриолит ВМК-45).

в – 5-и компонентное вяжущее (гипсовое вяжущее + портландцемент + тонкодисперсный кварцевый песок + известняковая пыль + метакриолит ВМК-45).

Было установлено, что гранулометрический состав КГВ (рис.2, 1, а-в) – полидисперсный прерывистый с наличием нескольких пиков в области крупных и средних частиц, что обусловлено особенностями зерновых составов используемых компонентов вяжущего.

У 3-х компонентного КГВ (рис.2, а) кривая гранулометрического состава имеет два четких пика в области частиц размером 10,51 мкм и 106,9 мкм. Основной диапазон частиц находится

в интервале от 0,07 до 251 мкм с максимумом (90 %) в области 83,57 мкм; 50 % частиц составляет фракция размером 14,59 мкм и 10 % – фракция частиц размером 1,48 мкм.

Кривая гранулометрического состава 4-х компонентного КГВ (рис.2, б) имеет три четких пика в области частиц размером 10,51 мкм, 106,9 мкм и 362,1 мкм. Основной диапазон частиц находится в интервале от 0,07 до 251 мкм с максимумом (90%) в области 95,4 мкм; 50 % частиц составляет фракция частиц размером 15,86 мкм и 10% – фракция частиц размером 1,57 мкм.

Особенностью гранулометрии рекомендуемого 5-ти компонентного КГВ (рис. 2, в) является наличие двух четко выраженных пиков на кривой распределения в области крупных и средних размеров частиц: первый пик – с максимальным содержанием частиц размером 106 мкм, второй – 11 мкм. Основной диапазон частиц находится в интервале от 0,07 до 409 мкм. Из всех частиц 90 % составляет фракция размером 169 мкм, 50 % – 29,28 мкм и 10 % – 1,73 мкм.

Далее, с помощью расчетно-экспериментального моделирования [15], были рассчитаны гранулометрические составы рассматриваемых смесей, вяжущих и построены «оптимальные» кривые по Функу–Дингеру в сравнении с показателями плотности упаковки тонкодисперсных компонентов в отдельности (рис.2).

Критерием оптимизации при расчете являлось приближение рассчитываемых составов к «оптимальному», характеризующемуся наиболее плотной упаковкой частиц. Под «идеальной» или «оптимальной» кривой понимают такой гранулометрический состав смесей, который характеризуется наименьшей межзерновой пустотностью при минимальной поверхности частиц.

Как видно из представленных графиков (рис.2, 2), отклонение от «оптимальной» кривой Функа–Дингера для 3-х, 4-х и 5-ти компонентных КГВ составило: 18,2 %, 18,1 % и 15,2 %, соответственно.

Экспериментальную проверку влияния «оптимального» гранулометрического состава КГВ проводили при сравнении средней плотности, прочностных характеристик и коэффициента размягчения затвердевшего вяжущего. С этой целью из 3-х, 4-х и 5-ти компонентных КГВ изготавливали образцы-кубы размером $3 \times 3 \times 3$ см при постоянном В/Вяж отношении, которые испытывали в возрасте 7-ми и 28 суток.

Состав и физико-механические свойства затвердевших вяжущих представлены в табл. 2.

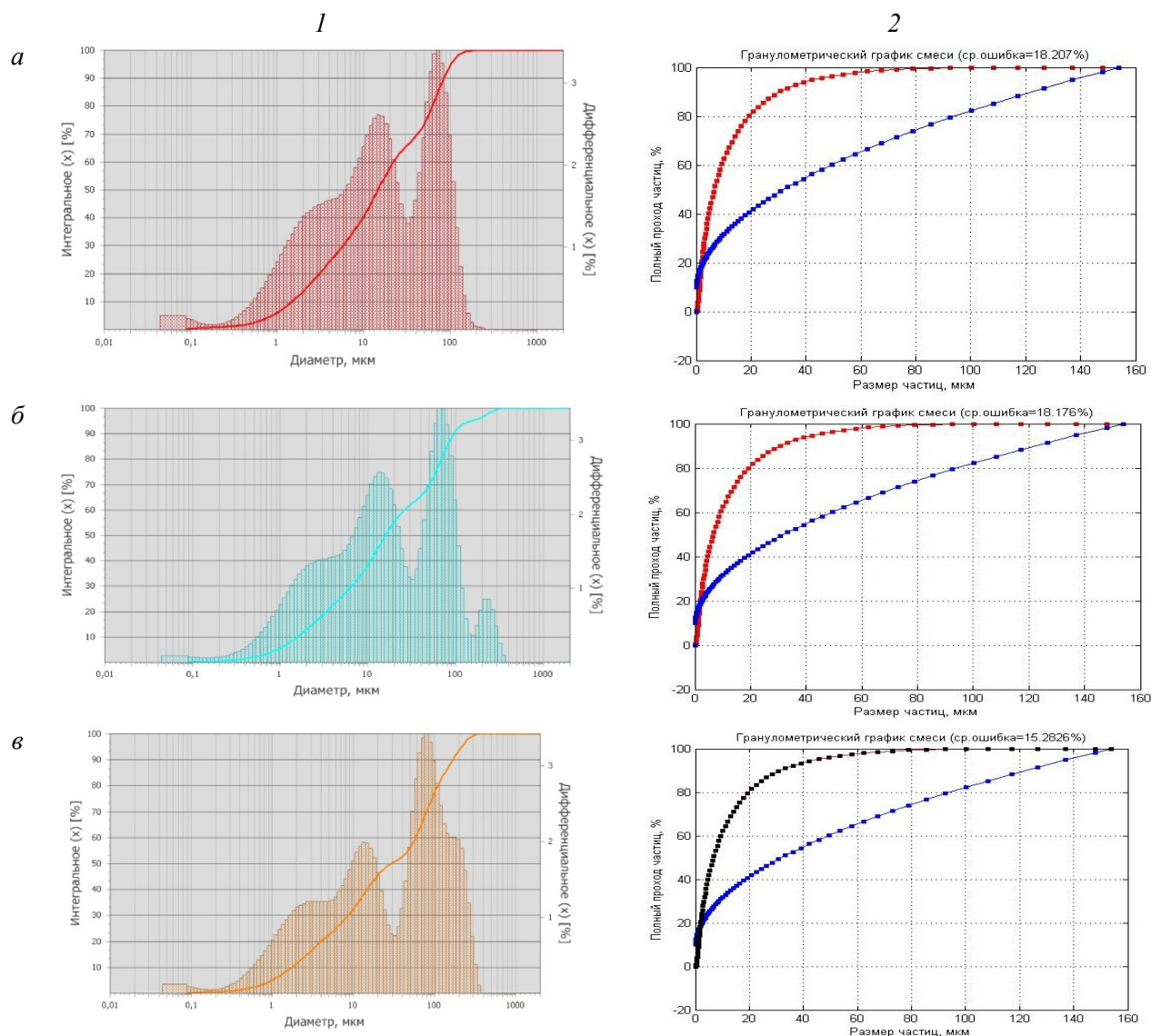


Рис. 2. Гранулометрические составы вяжущих смесей (1) и ошибки (2):

а – 3-х компонентное КГВ (гипсовое вяжущее + портландцемент + тонкодисперсный кварцевый песок);

б – 4-х компонентное КГВ (гипсовое вяжущее + портландцемент + тонкодисперсный кварцевый песок+метакаолин ВМК-45).

в – 5-и компонентное КГВ (гипсовое вяжущее + портландцемент + тонкодисперсный кварцевый песок + известняковая пыль+метакаолин ВМК-45)

Таблица 2

Состав и свойства композиционного гипсового вяжущего

№	Состав КГВ, % по массе					В/В	Расплав, мм	Сроки схват., мин., с		Рсж. МПа ρ _{ср} , кг/м ³		Кр
	Г	ПЦ	П	ВМК	Изв			Начало	Конец	7 сут	28сут/(сух)	
1	70	10	20	—	—	0,42	125	9–00	10–00	<u>7,6</u> 1706	<u>8,9/(17,9)</u> 1585	0,62
2	69,5	10	20	0,5	—		122	8–00	9–00	<u>8,5</u> 1715	<u>11,8/(19,2)</u> 1602	0,71
3	68,0	10	20	0,5	1,5		118	8–30	9–30	<u>8,7</u> 1751	<u>12,3/(19,6)</u> 1636	0,73

Примечание: Г – смесь двух модификаций гипсовых вяжущих (Г5Б- П 70% и ГВВС-16-30%); П – тонкодисперсный песок; ВМК – метакаолин ВМК-45; Изв. – известняковая пыль

В результате проведенных испытаний было установлено, что введение в состав КГВ

совместно с минеральной добавкой тонкомолотого кварцевого песка и метакаолина ВМК-45

(состав 2, табл. 2) позволяет повысить предел прочности при сжатии через 7 сут на 11,8 %, через 28 сут – на 32,5 %, коэффициент размягчения – на 14,5 % (с 0,62 до 0,71), среднюю плотность – с 1706 кг/м³ до 1715 кг/м³. Дополнительное введение наполнителя (известняковой пыли) в состав КГВ (состав 3) позволяет повысить предел прочности при сжатии в 7-ми суточном возрасте на 14,5 % (с 7,6 МПа до 8,7 МПа) и в 28-ми суточном возрасте – на 38,2 % (с 8,9 МПа до 12,3 МПа). При этом коэффициент размягчения (Кр) повышается с 0,62 до 0,73 – на 17,7 %, а средняя плотность – до 1751 кг/м³.

Выводы. Таким образом, проведенные исследования подтверждают активность используемых тонкодисперсных минеральных добавок и согласуются с показателями физико-механических характеристик затвердевшего КГВ. Прерывистость гранулометрического состава КГВ оказывает положительное влияние на формирование микроструктуры гипсоцементного камня вследствие более плотной пространственной укладки частиц и, следовательно, получения более плотного и прочного камня. На основании полученных экспериментальных данных было установлено, что разработанный 5-ти компонентный состав КГВ, включающий (% по массе): 68 % гипсового вяжущего (Г-5 Б-II – 70 % и ГВВС-16 – 30 %), 10 % портландцемента, 20 % тонкодисперсного кварцевого песка, 0,5 % метаксаолина ВМК-45 и 1,5 % известняковой пыли, по соотношению компонентов и их гранулометрическому составу отклоняется от рассчитанного с помощью компьютерной программы по уравнению «оптимальной» кривой Функа–Дингера на 15,3 %, что обуславливает достаточно плотную упаковку его частиц с повышением средней плотности, прочностных показателей и коэффициента размягчения даже при снижении содержания гипсового вяжущего.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соломатов В.И. Элементы общей теории композиционных строительных материалов // Материалы юбилейной конференции. М.: МИИТ, 2001. С. 41–56.
2. Дребезгова М.Ю., Чернышева Н.В., Шаталова С.В. Композиционное гипсовое вяжущее с многокомпонентными минеральными добавками разного генезиса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №10. С. 27–34.
3. Lesovik V., Drebezgova M., Fediuk R. Fast-Curing Composites Based on Multicomponent Gypsum Binders // Journal of Materials in Civil Engineering. 2020. Vol. 32 (9). 04020234. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000331334031/2071-7318-2023-8-4-24-33
4. Отман Азми С.А., Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Коваленко Е.В., Масалитина С.В. Состав и свойства композиционного гипсового вяжущего повышенной водостойкости // Строительные материалы. 2023. № 5. С. 81–88. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-813-5-81-88
5. Отман Азми С.А., Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Коваленко Е.В., Масалитина С.В. Особенности структурообразования композиционных гипсовых вяжущих с комплексом минеральных и органических добавок // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова 2023. №4. С.24–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-24-33.
6. Батова М.Д., Семёнова Ю.А., Гордина А.Ф., Яковлев Г.И., Бурьянов А.Ф., Стивенс А.Э., Бегунова Е.В. Структура и свойства гипсовых композиций с минеральными дисперсными добавками // Строительные материалы. 2021. №10. С.49–53. DOI:10.31659/0585-430X-2021-796-10-49-53
7. Петропавловская В. Б., Новиченкова Т. Б., Белов В.В., Бурьянов А.Ф. Гранулометрический состав как критерий регулирования свойств дисперсных систем // Строительные материалы. 2013. № 1. С. 64–65.
8. Белов В.В., Образцов И.В. Компьютерное моделирование и оптимизирование составов строительных композитов: монография. Тверь: ТвГТУ. 2014. 124 с.
9. Белов В.В., Образцов И.В. Компьютерное оптимизирование зерновых составов строительных композитов на основе цементно-минеральных смесей // Строительство и реконструкция. 2015. №2 (58). С. 83–89.
10. Белов В.В., Смирнов М.А. Строительные композиты из оптимизированных минеральных смесей: монография, Тверь: ТвГТУ. 2012. 112 с.
11. Петропавловская В.Б. Белов В.В., Новиченкова Т.Б., Бурьянов А.Ф., Пустовгар А.П. Оптимизация внутренней структуры дисперсных систем негидратационного твердения // Строительные материалы. 2010. № 7. С. 22–24.
12. Petropavlovskii K., Novichenkova T., Petropavlovskaya V., Sulman M., Fediuk R., Amran M. Faience waste for the production of wall products // Materials. 2021. Vol. 14(21). DOI 10.3390/ma14216677
13. Миронов В.А., Белов В.В., Голубев А.И. Связь зернового состава с объемно-массовыми характеристиками минеральных компонентов

строительных смесей // Сухие строительные смеси. 2008. № 6. С. 63–65.

14. Хархардин А.Н. Структурная топология дисперсных систем взаимодействующих микро- и наночастиц // Известия вузов. Строительство. 2011. № 5. С. 119–125

15. Королев Л.В., Лупанов А.П., Придатко Ю.М. Плотная упаковка полидисперсных частиц в композитных строительных материалах // Современные проблемы науки и образования. 2007. № 6. С. 105–108.

16. Рахимов Р.З., Гайфуллин А.Р., Халиуллин М.И., Стоянов О.В. Плотность упаковки зерен композиционного гипсового вяжущего в за-

висимости от дисперсности и гранулометрического состава // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т.16. №7. С.129–131.

17. Королев Е.В., Баженов Ю.М., Смирнов В.А. Строительные материалы вариативно-каркасной структуры. М.: МГСУ, 2011. 304 с

18. Марголис Б.И. Компьютерные методы анализа и синтеза систем автоматического регулирования в среде Matlab: учебное пособие. Тверь: ТГТУ, 2015. 92 с

19. Марголис Б.И. Программа расчёта настроек регуляторов методом расширенных частотных характеристик // Программные продукты и системы. Тверь: ЗАО "Научно-исследовательский институт "Центрпрограммсистем", 2018. С. 636–639.

Информация об авторах:

Отман Азми С.А., аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: azmiothman2222@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

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

Дребезгова Мария Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры E-mail: mdrebezgova@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Марголис Борис Иосифович, доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов. E-mail: tsu-atp@mail.ru. Тверской государственный технический университет Россия, 170026, г. Тверь, пр-т. Ленина, д. 25.

Новиченкова Татьяна Борисовна, кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций. E-mail: tanovi.69@mail.ru. Тверской государственный технический университет Россия, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д.22.

Поступила 21.04.2023 г.

© Отман Азми С.А., Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Марголис Б.И., Новиченкова Т.Б., 2023

^{1,*}*Otman Azmi S.A.*, ¹*Chernysheva N.V.*, ¹*Drebezgova M.Yu.*, ²*Margolis B.I.*, ²*Novichenkova T.B.*

¹*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

²*Tver State Technical University*

^{*}*E-mail: azmiothman2222@gmail.com*

INFLUENCE OF GRANULOMETRIC COMPOSITION OF THE COMPOSITE GYPSUM BINDER ON ITS PROPERTIES

Abstract. The primary task of technologists-designers is to optimize the structure and properties of building composite materials. Its achievement allows simultaneously increasing their efficiency, reliability and durability. The article presents the results of determining the granulometric composition of a composite gypsum binder (CGB) by computational and experimental modeling using the known equations of "ideal" curves. Due to the fact that when designing the binder composition, one of the main tasks is to optimize its structure at the micro level with finding the best ratios sizes and quantitative content of particles in the hardening system to create a dense packing, in the work a comparison is made of the granulometric compositions of 3, 4 and 5-component KGV. It has been established that the developed 5-component composition of KGV, including (% by weight): 68 % gypsum binder (G5B-II – 70 % and GVVS-16 – 30 %), 10 % Portland cement, 20 % fine quartz sand, 0.5 % metakaolin VMK-45 and 1.5 % limestone dust, in terms of the ratio of components and their granulometric composition, deviates from that calculated using a computer program using the equations

of the "optimal" Funk-Dinger curve by 15.3 %, which causes a denser packing of its particles with an increase in average density, strength indicators and softening coefficient even with a decrease in the content of gypsum binder.

Keywords: composite gypsum binder, particle size distribution, packing density, properties

REFERENCES

1. Solomatov V.I. Elements of the general theory of composite building materials [Elementy obshchej teorii kompozicionnyh stroitel'nyh materialov]. Materialy yubilejnoj konferencii, 2001, Pp. 41–56. (rus)
2. Drebezgova M.Yu., Chernysheva N.V., Shatalova S.V. Composite gypsum binder with multi-component mineral additives of different genesis [Kompozicionnoe gipsovoe vyazhushchee s mnogokomponentnymi mineral'nymi dobavkami raznogo genezisa]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 10. Pp. 27–34. (rus)
3. Lesovik V., Drebezgova M., Fediuk R. Fast-Curing Composites Based on Multicomponent Gypsum Binders. Journal of Materials in Civil Engineering. 2020. Vol. 32 (9). 04020234. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000331334031/2071-7318-2023-8-4-24-33
4. Otman Azmi S.A., Chernysheva N.V., Drebezgova M.YU., Kovalenko E.V., Masalitina S.V. Composition and properties of a composite gypsum binder with increased water resistance [Sostav i svojstva kompozicionnogo gipsovogo vyazhushchego povyshennoj vodostojkosti]. Construction Materials. 2023. № 5. Pp. 81–88. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-813-5-81-88 (rus)
5. Otman Azmi S.A., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Yu., Kovalenko E.V., Masalitina S.V. Features of structure formation of composite gypsum binders with a complex of mineral and organic additives [Osobennosti strukturoobrazovaniya kompozicionnyh gipsovyh vyazhushchih s kompleksom mineral'nyh i organicheskikh dobavok]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 4. Pp. 1–10. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-24-33. (rus)
6. Batova M.D., Semyonova Yu.A., Gordina A.F., Yakovlev G.I., Bur'yanov A.F., Stivens A.E., Begunova E.V. Structure and properties of gypsum compositions with mineral dispersed additives [Struktura i svojstva gipsovyh kompozicij s mineral'nymi dispersnymi dobavkami]. Construction Materials. 2021. No. 10. Pp. 49–53. DOI:10.31659/0585-430X-2021-796-10-49-53(rus)
7. Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Belov V.V., Bur'yanov A.F. Granulometric composition as a criterion for regulating the properties of dispersed systems [Granulometricheskij sostav kak kriterij regulirovaniya svojstv dispersnyh system]. Construction Materials. 2013. No. 1. Pp. 64–65. (rus)
8. Belov V.V., Obrazcov I.V. Computer modeling and optimization of compositions of building composites: monograph. [Komp'yuternoe modelirovanie i optimizirovanie sostavov stroitel'nyh kompozitov: monografiya]. Tver': TvGTU. 2014. 124 p. (rus)
9. Belov V.V., Obrazcov I.V. Computer optimization of grain compositions of building composites based on cement-mineral mixtures [Komp'yuternoe optimizirovanie zernovyh sostavov stroitel'nyh kompozitov na osnove cementno-mineral'nyh smesej]. Construction Materials. 2015. No. 2 (58). Pp. 83–89. (rus)
10. Belov V.V., Smirnov M.A. Building composites from optimized mineral mixtures: monograph [Stroitel'nye kompozity iz optimizirovannyh mineral'nyh smesej: monografiya]. Tver': TvGTU, 2012. 112 p. (rus)
11. Petropavlovskaya V.B., Belov V.V., Novichenkova T.B., Bur'yanov A.F., Pustovgar A.P. Optimization of the internal structure of dispersed systems of non-hydration hardening [Optimizaciya vnutrennej struktury dispersnyh sistem negidratacionnogo tverdeniya]. Construction Materials. 2010. No. 7. Pp. 22–24. (rus)
12. Petropavlovskii K., Novichenkova T., Petropavlovskaya V., Sulman M., Fediuk R., Amran M. Faience waste for the production of wall products. Materials. 2021. Vol. 14(21). DOI:10.3390/ma14216677.
13. Mironov V.A., Belov V.V., Golubev A.I. Relationship of grain composition with volume-mass characteristics of mineral components of building mixtures [Svyaz' zernovogo sostava s ob'emno-massovymi harakteristikami mineral'nyh komponentov stroitel'nyh smesej] Dry construction mixtures. 2008. No. 6. Pp. 63–65. (rus)
14. Harhardin A.N. Structural topology of disperse systems of interacting micro- and nanoparticles [Strukturalnaya topologiya dispersnyh sistem vzaimodejstvuyushchih mikro- i nanochastic]. Izvestiya vuzov. Construction. 2011. No 5. Pp. 119–125. (rus)
15. Korolev L.V., Lupanov A.P., Pridatko Yu.M. Dense packing of polydisperse particles in composite building materials [Plotnaya upakovka polidispersnyh chastic v kompozitnyh stroitel'nyh materialah]. Modern problems of science and education. 2007. No. 6. Pp. 105–108. (rus)
16. Rahimov R.Z., Gajfullin A.R., Haliullin M.I., Stoyanov O.V. Grain packing density of composite gypsum binder depending on dispersion and granulometric composition [Plotnost' upakovki zeren kompozicionnogo gipsovogo vyazhushche-go

v zavisimosti ot dispersnosti i granulometricheskogo sostava]. Bulletin of the Kazan Technological University. 2013. Vol. 16. No. 7. Pp.129–131. (rus)

17. Korolev E.V., Bazhenov Yu.M., Smirnov V.A. Building materials of variotropic-frame structure [Stroitel'nye materialy variotropno-karkasnoj struktury]. M.: MGSU, 2011. 304 p. (rus)

18. Margolis B.I. Computer methods of analysis and synthesis of automatic control systems in the Matlab environment [Komp'yuternye meto-dy ana-

liza i sinteza sistem avtomaticheskogo regulirovaniya v srede Matlab]. Tver': TGTU, 2015. 92 p. (rus)

19. Margolis B.I. Programma raschyota nastroek regulyatorov metodom rasshirennyh chastotnyh harakteristik. Programmnye produkty i sistemy [Programma raschyota nastroek regulyatorov metodom rasshirennyh chastotnyh harakteristik]. Tver': ZAO "Nauchno-issledovatel'skij institut "Centrprogrammsistem". 2018. Pp. 636–639. (rus)

Information about the authors

Otman Azmi SA, post-graduate student of the Department of Building Materials Science, Products and Structures. E-mail: azmiothman2222@gmail.com. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Chernysheva, Natalya V. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Materials Science, Products and Structures. E-mail: chernysheva56@rambler.ru Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Drebezgova, Maria Yu. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Architecture. E-mail: mdrebezgova@mail.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Margolis Boris, I. Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of the Department of Automation of Technological Processes E-mail: tstu-atp@mail.ru. Tver State Technical University Russia, 170026, Tver, ave. Lenina, d. 25.

Novichenkova Tatyana, B. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures. E-mail: tanovi.69@mail.ru. Tver State Technical University Russia, 170026, Tver, nab. Af. Nikitina, d.22.

Received 21.04.2023

Для цитирования:

Отман Азми С.А., Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Марголис Б.И., Новиченкова Т.Б. Влияние гранулометрического состава композиционного гипсового вяжущего на его свойства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 6. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-8-16

For citation:

Otman Azmi S.A., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Yu., Margolis B.I., Novichenkova T.B. Influence of granulometric composition of the composite gypsum binder on its properties. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 6. Pp. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-8-16

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-17-25

Хорина А.В., Шелковникова Т.И.Воронежский государственный технический университет***E-mail: alla.purik@mail.ru*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Аннотация. В ходе проведенных исследований определены фазовые составляющие клинкерного кирпича и керамогранита методом рентгенофазового анализа. С помощью сканирующего электронного микроскопа изучены микроструктуры исследуемых образцов. Анализ фазового состава и микроструктуры черепка позволяет определить качественную и количественную характеристику форм и размеров кристаллов, рентгеноаморфной фазы, строение пористости, установить взаимосвязь между структурой и высокими физико-механическими показателями. Для получения изделий с высокой прочностью необходимо формирование монолитной структуры керамического черепка, представленной каркасом из кристаллических новообразований, соединенных рентгеноаморфной фазой. В образцах высокопрочной строительной керамики фиксируются кристаллы кварца 55–65 %, муллита 9–12 %, кристобалита 4–8 %, лейцита 4–7 %, гематита 1–4 % и др. В связи с отличающимися технологиями производства клинкерного кирпича и керамогранита происходит кристаллизация муллита различного характера: в клинкере – игловидного габитуса, в керамограните – мелкодисперсного вида. Установлено, что поры имеют округлую замкнутую форму нано- и микрометрового размера от 1 до 15 мкм. Высокое содержание плавней в шихте для керамогранита обеспечивает образование большого количества аморфной фазы и омоноличивание ею кристаллических новообразований.

Ключевые слова: фазовый состав, микроструктура керамики, рентгеноаморфная фаза, кварц, муллит, лейцит

Введение. В строительном материаловедении существует проблема низкого качества керамических изделий, поскольку запасы керамического сырья истощаются, и приходится использовать доступные месторождения, не отвечающие требованиям. Качество строительных керамических материалов зависит от показателей физико-механических свойств, важнейшими из которых являются высокая механическая прочность и морозостойкость, низкое водопоглощение [1–4].

К изделиям с высокими эксплуатационными характеристиками относятся клинкерный кирпич и керамогранит [5–7]. Технологии производства клинкера и керамогранита существенно отличаются друг от друга. Клинкерный кирпич изготавливают способом пластического формования с последующей сушкой и длительным обжигом. Керамогранит – полусухим способом прессования порошка, сушкой и быстрым обжигом. В результате этих особенностей происходит формирование микроструктуры керамического черепка, влияющей на физико-механические свойства. Требования к физико-механическим свойствам высокопрочной строительной керамики согласно ГОСТ 530-2012, ГОСТ 13996-2019: средняя плотность черепка, кг/м³ – не менее 2000; предел прочности при сжатии, МПа – не менее 30; водопоглощение клинкерного кирпича, % – не более 6; водопоглощение керамогранита, % – не более 0,5; морозостойкость клинкерного

кирпича, число циклов – не менее 75; морозостойкость керамогранита, число циклов – не менее 100.

Микроструктура керамики представляет собой расположение зерен (отдельных кристаллов) и пор различного размера и формы, стекловидной межзерновой фазы. Микроструктура не является идеальной и однородной, и она непосредственно зависит от характеристик сырьевых компонентов и механизма спекания. Окончательно структура керамики формируется в процессе обжига, в ходе которого происходит спекание материала, сопровождаемое физико-химическими процессами. Спекание характеризуется образованием прочного монолита из конгломерата частиц с временной связкой, в результате которого происходит изменение объема и пористости. В керамике, преимущественно, происходит спекание с участием жидкой фазы, протекающее в три стадии. На первой происходит образование жидкой фазы, сближение частиц и уплотнение системы. На второй – растворение твердой фазы и кристаллизация из расплава твердых фаз. Сначала растворяются зоны контакта зерен, их центры сближаются, и происходит усадка керамического черепка. На третьей стадии – завершение перекристаллизации и формирование плотной структуры изделия. Спекание всегда включает в себя как уплотнение, так и рост зерен, причем на начальной стадии происходит закругление угловых, выпуклых поверхностей частиц. После этого соседние частицы, контактирующие друг с

другом, связываются между собой за счет поверхностной диффузии или процессов испарения-конденсации [8].

Данные исследований химического состава авторов [9] показали, что область оптимальных составов масс для формирования плотноспекшейся структуры клинкерного кирпича отвечает следующему содержанию составляющих оксидов, %: SiO_2 – 63–67, Al_2O_3 – 15–17, сумма оксидов щелочных и щелочноземельных металлов ($\text{RO} + \text{R}_2\text{O}$) – 5,5–6,5, сумма $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ – 5,2–7,1. Авторы [9] установили, что соотношение оксидов ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) / ($\text{RO}(\text{CaO} + \text{MgO}) + \text{R}_2\text{O}(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$) для оптимальной области составов равно 6,0–6,1. По данным рентгенофазового анализа авторами [9] установлено, что при температуре обжига 1120 °C происходит формирование кристаллических фаз муллита, анортита, α -кварца, значительного количества стекловидной фазы, образующейся в результате плавления соединений кремнезема, щелочных и щелочноземельных металлов. Структура образцов керамического черепка характеризуется наличием пор небольшого размера, составляющего от 20 до 80 мкм, образованных вследствие выгорания органических примесей и разложения карбонатсодержащих составляющих, а также перехода в расплав зерен полевых шпатов. Микроструктура образцов представлена различными кристаллическими образованиями с четко различающимися зернами кварца разной дисперсности, а также оплавленными зернами полевых шпатов [9].

В глинах с высоким содержанием Al_2O_3 при температуре обжига до 1200 °C происходит формирование 38 % муллита и 24 % рентгеноаморфной фазы, из которых, по мнению авторов [4], возможен выпуск высококачественных керамических изделий. Авторы [3] отмечают, что повышенное содержание оксида кальция в сырьевой шихте способствует образованию анортита и волластонита, которые повышают механическую прочность керамического черепка. Исследование структуры долговечного керамического кирпича показывает формирование первичного муллита в виде мелких кристаллов с несовершенной кристаллической структурой игольчатого и короткопризматического вида при температуре обжига 1050 °C [3]. По результатам авторов [2] в образцах керамогранита, обожженных при температуре 1155–1200 °C, образуются кристаллические фазы β -кварца, β -кристобалита, муллита и рентгеноаморфная фаза. Повышенная прочность отмечалась у керамического черепка следующего состава: кристаллические фазы 20 %, метакаолинит 20 %, стеклофаза 60 % [2]. Похожий

фазовый состав керамогранита представлен в работе [10], характеризующийся в основном стеклофазой, кристаллами кварца, муллита, в незначительных количествах альбитом.

Изучение керамических материалов посредством установления минералогического состава и структуры высокопрочной керамики может быть актуальным.

Целью данного исследования является анализ фазового состава и микроструктуры керамического черепка высокопрочной керамики, выявление связи высоких эксплуатационных характеристик с составом и структурой черепка. В качестве объектов анализа были выбраны клинкерный керамический кирпич и керамогранит, поскольку они являются представителями высокопрочных и долговечных изделий.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования проводились при использовании оборудования Центра коллективного пользования им. профессора Ю.М. Борисова Воронежского государственного технического университета. Фазовый состав образцов клинкерного кирпича и керамогранита определяли методом порошковой рентгеновской дифракции (дифрактометр ARL X'TRA с медной рентгеновской трубкой). Исследование структуры и элементного состава образцов определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа Phenom Pro (G6, XL).

Основная часть. Важные эксплуатационные характеристики строительной керамики зависят от микроструктуры, поэтому крайне важно контролировать все этапы, влияющие на формирование структурных особенностей. Микроструктурой можно управлять путем оптимизации каждого из этапов процесса изготовления:

- 1) тщательный выбор сырья, особенно с учетом химической чистоты, размера и формы частиц;
- 2) выбор соответствующей технологии формования с оптимальными параметрами;
- 3) оптимизация температурно-временного режима и атмосферы печи во время спекания [8].

Идентификация и количественное определение кристаллических фаз с помощью рентгеновского излучения на различных стадиях процесса является ключевой задачей управления технологическими процессами в керамической промышленности. Например, характеристика минералогического состава природного сырья (глин, каолинов, полевых шпатов и т.д.) имеет большое значение, поскольку это существенно влияет на реакции во время спекания и, следовательно, на микроструктуру и свойства конечного изделия. Кристаллический состав также напрямую влияет

на механические и функциональные свойства строительной керамики [8].

Методом рентгенофазового анализа нами ранее в статье [11] был определен качественный состав кристаллических новообразований в образцах клинкерного кирпича и керамогранита

(рис. 1). В табл. 1 представлены дифракционные максимумы кристаллических фаз. Клинкерный кирпич и керамогранит имеют полиминеральный состав, поэтому количественный расчет содержания фаз носит приближенный характер.

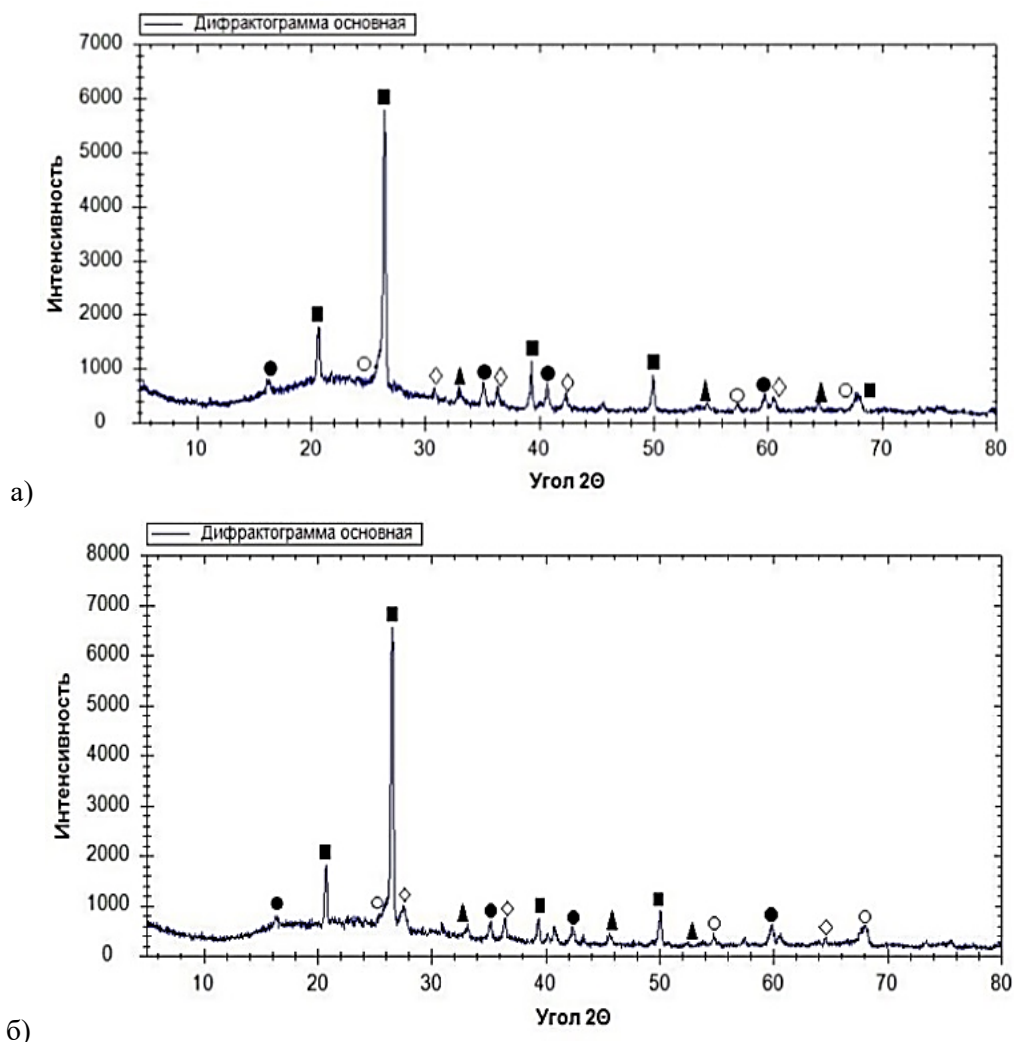


Рис. 1. Рентгенограммы: а) немецкого клинкерного кирпича (Германия)
б) керамического гранита «Воронежская керамика»

● – муллит, ■ – β -кварц, ◇ – β -кристобалит,
▲ – гематит, ○ – лейцит

Таблица 1

Соотношение кристаллических фаз в образцах

Минерал	Межплоскостное расстояние	Наличие в образце, %	
	Å	клинкер	керамогранит
Кварц (β - SiO_2)	3,34; 1,813; 1,539; 1,372	55–60	60–65
Муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)	3,36; 2,687; 2,196; 1,527	10–12	9–11
β -Кристобалит	4,03; 2,481; 2,834; 1,924; 1,687	4–5	6–8
Тридимит	4,39; 4,12; 3,73; 2,49; 1,69; 1,528	3–4	1–2
Лейцит ($\text{KAl} \cdot \text{Si}_2\text{O}_6$)	3,252; 3,432; 1,659	6–7	4–5
Гематит (α - Fe_2O_3)	2,694; 2,513; 1,842; 1,692	3–4	1–3
Альбит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot 6\text{SiO}_2$)	3,22; 4,11; 3,78	5–6	4–5
Фаялит (Fe_2SiO_4)	2,85; 1,755; 3,707	1–3	3–5

Во время обжига пористая масса претерпевает физические изменения (уплотнение, усадку, удаление пор) и химические реакции (разложение карбонатов, дегидратация глинистого сырья, кристаллизация новообразований, образование рентгеноаморфной фазы и т.д.). Уплотнение при жидкофазном спекании происходит путем перегруппировки частиц и осаждения раствора, за которыми следует укрупнение не уплотняющихся зерен в результате созревания. При охлаждении жидкость может образовывать аморфную или кристаллическую фазу. Стеклофаза формирует непрерывную пленку, окружающую зерна, проникая в поры структуры изделия [7].

Уплотнение происходит в течение трех стадий с сопутствующими изменениями содержания пор и геометрии:

1) начальная стадия, во время которой в точках контакта между частицами растут шейки;

2) промежуточная стадия, во время которой поры приобретают цилиндрическую форму, так называемая «открытая пористость»;

3) заключительная стадия, во время которой поры становятся более сферическими и изолированными – «закрытая пористость».

На последней стадии рост зерна становится преобладающим по сравнению с уплотнением из-за уменьшения движущей силы. Более крупные зерна растут за счет более мелких. Скорость роста зерна становится преобладающей по сравнению со скоростью уплотнения на последней стадии спекания, и керамика приобретает поликристаллическую микроструктуру с дисперсией изолированных пор, расположенных на границах зерен. Поэтому для получения оптимальной микроструктуры необходим тщательный контроль температурного цикла [8].

При спекании клинкерного кирпича и керамогранита входящие в сырьевую шихту плавни образуют жидкую фазу, что приводит к увеличению усадки и способствует получению изделий с низкой пористостью и высокими физико-механическими свойствами. Так как в сырьевой шихте для производства керамогранита содержится около 40% полевых шпатов, переход кварца в тридимит или кристобалит происходит более интенсивно, чем в клинкерном кирпиче. Пониженное содержание кристобалита в клинкере 4–5 % по сравнению с керамогранитом 6–8 % также указывает на растворение кварца в расплаве, формирование стекол, а не переход в другую полиморфную модификацию [8, 12].

Высокие эксплуатационные характеристики изделий строительной керамики (клинкера и керамогранита) формируются в результате обжига при температуре более 1200 °С и кристаллизацией муллита с упорядоченной структурой

игольчатого вида. Многие авторы предполагают, что зарождение и рост муллита происходит в аморфной, богатой глиноземом кремнистой фазе, расположенной между частицами кремнезема и оксида алюминия [7]. Также формированию прочной структуры керамики способствует снижение температуры плавления массы при восстановлении Fe_2O_3 до FeO [13]. На рентгенограммах (рис. 1) отмечается образование фаялита Fe_2SiO_4 при взаимодействии FeO с SiO_2 .

Таким образом, в ходе исследования определено, что образцы высокопрочной керамики клинкерного кирпича и керамогранита имеют близкие минералогические составы: β -кварц 55–65 %, муллит 9–12 %, β -кристобалит 4–8%, лейцит 4–7 %, гематит 1–4 % и др. По полученным данным рентгенофазового анализа, содержание аморфной фазы в керамограните 15 %, в клинкерном кирпиче равно 20 %. Содержание аморфной составляющей в клинкерном кирпиче выше, чем в керамограните, возможно, из-за более высокой температуры обжига и длительной выдержки клинкера при максимальной температуре [14].

Изучение строения черепка (распределение кристаллических и аморфных фаз, пористого пространства и др.) является важным аспектом в получении керамических изделий с высокими физико-механическими свойствами. Следовательно, проведем анализ микроструктуры высокопрочной строительной керамики на примере изображений фрагментов клинкера (рис. 2) и керамогранита (рис. 3), полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии. Формированию прочного каркаса керамического черепка способствует плотная фиксация стеклофазой кристаллических составляющих структуры [15].

Поскольку в шихте для керамогранита содержится значительное количество легкоплавких компонентов, происходит полное смачивание структуры расплавом, соответственно получается мелкозернистая микроструктура (по П.П. Будникову). В отличие от клинкерного кирпича, в котором смачиваемость недостаточна, часть зерен твердой фазы, соприкасающиеся друг с другом, укрупняются из-за срастания и структура приобретает вид крупнозернистой. Жидкофазное спекание является эффективным средством для уплотнения крупнозернистых материалов (10 мкм или более) [7].

Обжиг клинкерного кирпича происходит при медленном подъеме температуры в течение длительного периода времени, что способствует предварительному измельчению зерен, чтобы зерна равномерно распределились по размерам; затем следует вторая стадия при более высокой

температуре для завершения уплотнения. Каналы пор становятся более гладкими после предварительного огрубения и медленного обжига, возможно образование зерен меньшего размера,

что можно объяснить минимизацией дифференциального уплотнения и, как следствие, задержкой закрытия порового канала для достижения более высокой плотности [8].

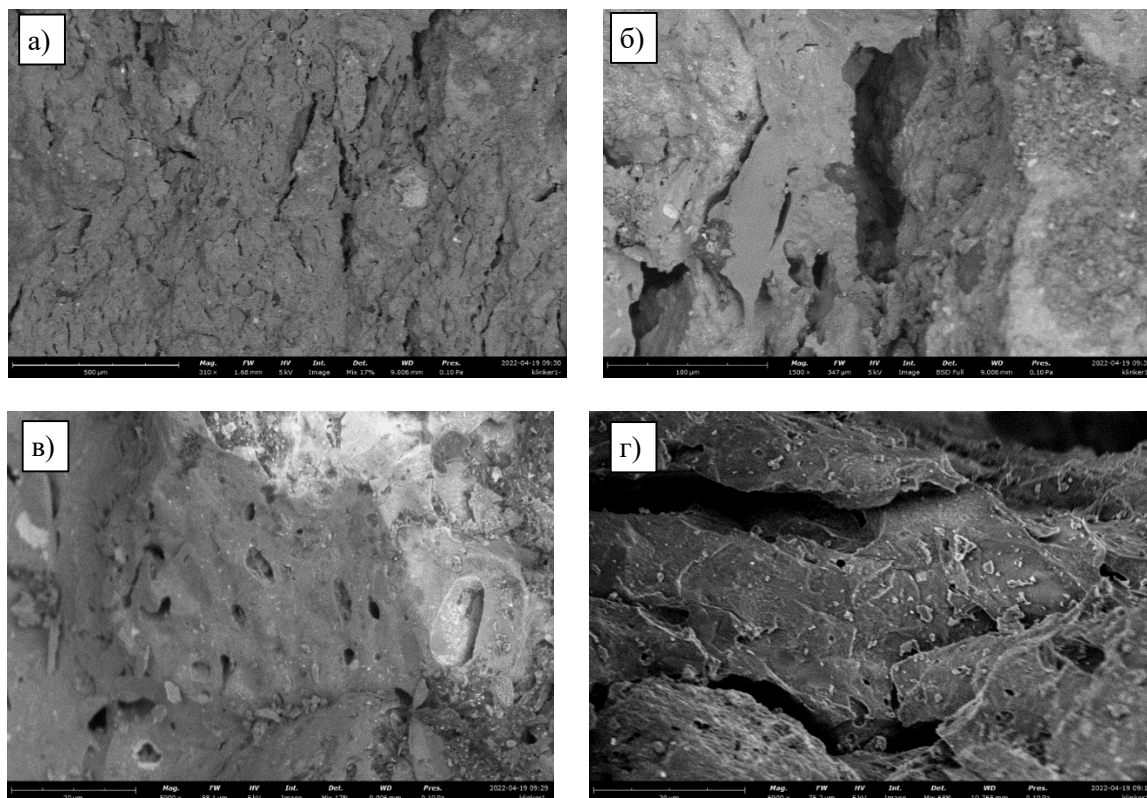


Рис. 2. Микрофотографии немецкого клинкерного кирпича: увеличение $\times 310$ (а), $\times 1500$ (б), $\times 5900$ (в), $\times 6900$ (г)

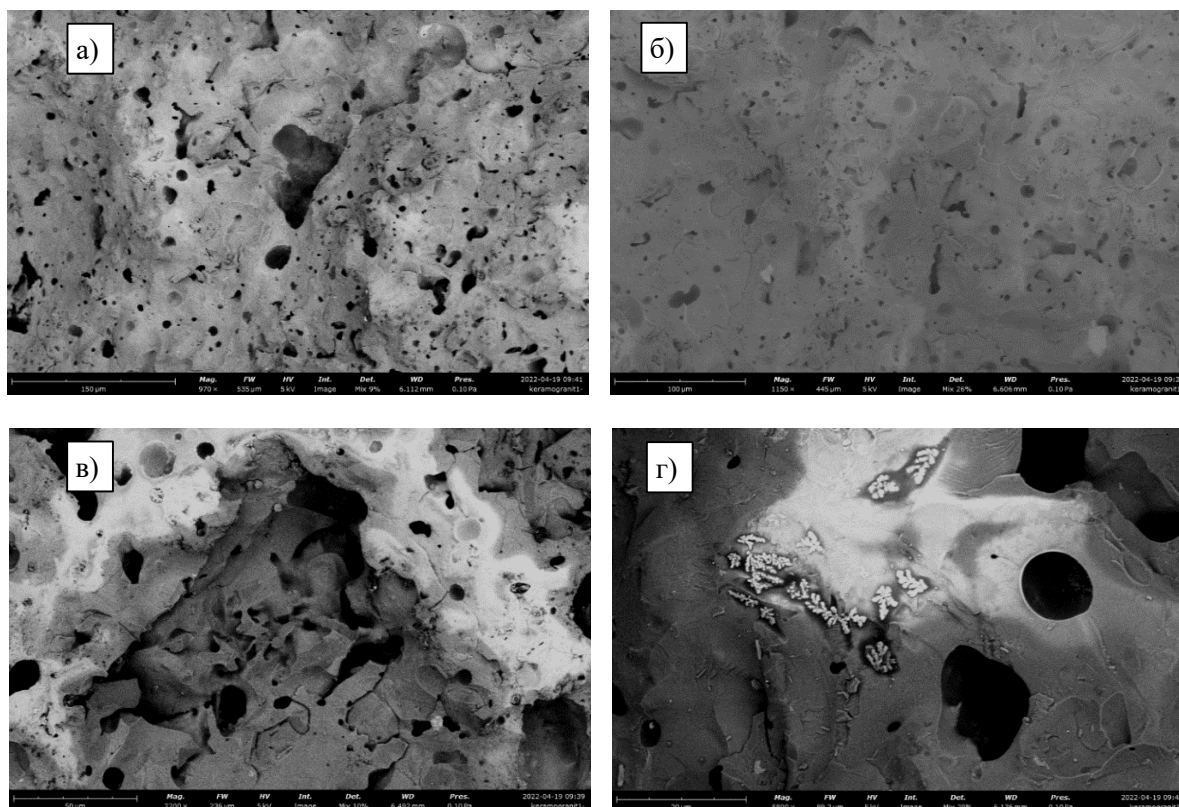


Рис. 3. Микрофотографии керамогранита: увеличение $\times 970$ (а), $\times 1150$ (б), $\times 2200$ (в), $\times 5800$ (г)

На микрофотографиях клинкера и керамогранита зерна кварца имеют размер от 10 до 30 мкм (рис. 2, 3). Размер пор в клинкере от 1 до 15 мкм (рис. 2). Известно, что округлые замкнутые поры нано- и микрометрового размера не снижают прочность изделий [16]. Как степенью пористости, так и размерами пор в пористом черепке можно управлять, изменяя начальный размер частиц, плотность сырья, добавки для спекания и условия спекания во время обжига, чтобы получить различные степени уплотнения [8]. Размер частиц также влияет на температуру и скорость спекания. Шихтовые массы с более тонким размером зерен достигают такой же плотности при более низких температурах по сравнению с крупнозернистыми [7].

При спекании керамики нагревание вызывает образование высоковязкой кремнистой жидкой фазы. Жидкость способствует растворению твердых частиц и последующему осаждению первичных кристаллов муллита с игольчатой морфологией [7]. При температуре обжига керамической массы выше 1200°C происходит фиксация муллитовых игл, улучшая физико-механические свойства изделий [17]. По данным анализа микроструктуры в клинкере кристаллизуется муллит игловидного габитуса размером 0,7–1,5 мкм (рис. 2).

Следует отметить, что наиболее важным параметром, влияющим на уплотнение и рост зерен, являются характеристики порошка и, в частности, гранулометрический состав. Таким образом, узкое распределение зерен по размерам предпочтительно для получения высокой плотности [8]. Для повышения производительности при высоких температурах количество аморфной фазы должно быть сведено к минимуму, если при охлаждении она становится стекловидной. В качестве альтернативы, возможен ввод некоторых добавок для спекания, предназначенных для преобразования стеклофазы в кристаллические фазы, которые сопротивляются деформации [7].

В процессе обжига керамической шихты формируется многокомпонентный минеральный состав керамогранита (табл. 1) [10]. Спекание керамогранита происходит по методу «быстрого обжига», заключается в быстром введении сырца в горячую зону печи таким образом, чтобы изделия очень быстро достигли высоких температур, при которых энергия активации уплотнения, выше, чем энергия активации роста зерна [8]. Таким образом, быстрый обжиг позволяет порошковой массе за короткое время достигать температур выше промежуточной температуры, что сводит к минимуму укрупнение зерна при нагревании. В микроструктуре керамогранита в ре-

зультате плавления полевошпатовых составляющих стеклофаза проникает в поры и оплавляет глинистые компоненты (рис. 3). Поры нано- и микрометрового размера равномерно расположены. По данным рентгенофазового анализа (табл. 1) содержание муллита в керамограните достигает 9–11 %. Микроструктура керамогранита представлена рентгеноаморфной фазой, в которой расположены кристаллики муллита типа шагреня величиной от 100 нм до 1 мкм.

По данным рентгенофазового анализа (табл. 1) и электронной сканирующей микроскопии (рис. 1–3) в структуре высокопрочной строительной керамики отмечается кристаллизация зерен лейцита размером 2–7 мкм, расположенных в форме нитей бусин в стеклофазе. Кристаллы лейцита улучшают трещиностойкость, армируя аморфную фазу [8, 18, 19]. Повышение прочности керамики, армированной лейцитом, объясняется хорошей дисперсностью мелких кристаллов лейцита, а также касательными сжимающими напряжениями, которые возникают вокруг кристаллов при охлаждении из-за разницы в коэффициенте теплового расширения между кристаллами лейцита и стекловидной матрицей. Таким образом, отклонение трещин становится активным механизмом упрочнения, повышающим вязкость и прочность [8]. Размер зерен в керамике с жидкофазным спеканием почти на порядок больше, чем в керамическом черепке, полученным по твердофазному механизму из-за повышенного укрупнения частиц [7].

Таким образом, микроструктура клинкерного кирпича представлена кристаллическими компонентами (кварцевые составляющие, муллит, гематит, лейцит и альбит), соединенными рентгеноаморфной фазой. Напротив, в керамограните наблюдается монолитная структура в виде стекловидной фазы, в которой расположены кристаллические элементы и поры. В клинкерном черепке кристаллы муллита имеют игловидный габитус, в отличие от мелкодисперсного в керамограните.

Выводы

1. Высокопрочная строительная керамика представлена монолитной структурой, клинкерный кирпич – кристаллическим скелетом, соединенным стеклофазой, керамогранит – аморфной массой с вкраплениями кристаллических фаз.

2. В процессе проведенных исследований установлено, что образцы высокопрочной керамики клинкерного кирпича и керамогранита имеют близкие минералогические составы: β -кварц 55–65 %, муллит 9–12 %, β -кристобалит 4–8 %, лейцит 4–7 %, гематит 1–4 % и др. В микроструктуре керамического черепка клинкера и керамогранита дифференцируются кристаллы

муллита 0,1–1,5 мкм, лейцита в форме «кораллов» или нитей бусин размером 2–7 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Салахов А.М., Морозов В.П., Тагиров Л.Р., Салахова Р.А., Лядов Н.М., Болтакова Н.В. Высокопрочная керамика из легкоплавких глин // Георесурсы. 2012. №6 (48). С. 9–12.
2. Зубехин А.П., Верченко А.В., Яценко Н.Д. Зависимость прочности керамогранита от фазового состава // Строительные материалы. 2014. №8. С. 30–33. http://rifsm.ru/u/f/sm_08_14_fin.pdf
3. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Взаимосвязь фазового состава и долговечности керамического кирпича возрастом более восьмисот лет на примере Казанского Кремля // Стекло и керамика. 2015. №2. С. 34–38.
4. Салахов А.М., Тагиров Л.Р. Структурообразование керамики из глин, формирующих при обжиге различные минеральные фазы // Строительные материалы. 2015. №8. С. 68–74. http://rifsm.ru/u/f/sm_08_15.pdf
5. Хоменко Е.С., Пурдик А. В. Особенности формирования микроструктуры клинкерной керамики // Стекло и керамика. 2017. Том 90. №2. С. 15–19.
6. Столбоушкин А.Ю. Метод комплексного исследования переходного слоя ядро–оболочка в керамических матричных композитах полусухого прессования // Строительные материалы. 2019. №9. С. 28–35. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-28-35>
7. Shackelford J., Doremus R. Ceramic and Glass Materials. Structure, Properties and Processing. Springer Science & Business Media, 2008. 201 p.
8. Pomeroy M. Encyclopedia of Materials : Technical Ceramics and Glasses. Elsevier Science, 2021. 2674 p.
9. Левицкий И.А., Хоружик О. Н. Исследование процессов спекания поликомпонентной сырьевой смеси на основе минерального сырья Республики Беларусь // Труды БГТУ. 2018. Серия 2. №2. С. 140–145.
10. Мошняков М.Г., Орлова Т.А. Исследование особенностей обжига керамического гранита из экспериментальной массы с частичной заменой импортных глин на отечественные // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2017. Том 7. №3. С. 95–106. DOI: 10.21285/2227-2917-2017-3-95-106
11. Хорина А.В., Шелковникова Т.И., Баранов Е.В. Оценка фазового состава керамического черепка высокопрочной строительной керамики // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 1(50). С. 73–80. DOI:10.24866/2227-6858/2022-1/73-80
12. Августиник А.И. Керамика. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: Стройиздат (Ленингр. отд-ние), 1975. 592 с.
13. Яценко Н.Д., Зубехин А.П. Научные основы инновационных технологий керамического кирпича и управление его свойствами в зависимости от химико-минералогического состава сырья // Строительные материалы. 2014. №4. С. 28–31. http://rifsm.ru/u/f/fin_04_14.pdf
14. Salakhov A., Morozov V., Eskin A., Ariskina R., Ariskina K., Gumarov A., Pasyunkov M. The investigation of raw materials and ceramic tiles, produced at the factory "Lasselsberger" in UFA. Revista QUID (Special Issue). 2017. Pp. 746–752.
15. Khomenko O., Sribniak N., Dushyn V., Shushkevych V. Analysis of the interaction between properties and microstructure of construction ceramics // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. (94). С. 16–25. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.140571
16. Салахов А.М., Салахова Р.А., Ильичева О.М., Морозов В.П., Хацринов А.И., Нефедьев Е.С. Влияние структуры материалов на свойства керамики // Вестник Казанского технологического университета. 2010. №8. С. 343–49.
17. Левицкий И.А., Хоружик О.Н. Взаимосвязь свойств, фазового состава и микроструктуры клинкерного кирпича // Стекло и керамика. 2021. №5. С. 26–33.
18. Shen J., Kosmac T. Advanced ceramics for Dentistry. Butterworth-Heinemann, 2014. 416 p.
19. Höland W., Beall G. Glass-Ceramic Technology. Second edition. John Wiley & Sons Limited, 2012. 436 p.

Информация об авторах

Хорина Алла Владимировна, аспирант кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: alla.purik@mail.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

Шелковникова Татьяна Иннокентьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: tshelk@mail.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

Поступила 21.03.2023 г.

© Хорина А.В., Шелковникова Т.И., 2023

*Horina A.V., Shelkovnikova T.I.

Voronezh State Technical University

*E-mail: alla.purik@mail.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF HIGH-STRENGTH CERAMIC PRODUCTS

Abstract. In the course of the conducted studies, the phase components of clinker bricks and porcelain stoneware are determined by X-ray phase analysis. Microstructures of the studied samples are studied using a scanning electron microscope. The analysis of the phase composition and microstructure of the shard allows determining the qualitative and quantitative characteristics of the shapes and sizes of crystals, the X-ray amorphous phase, the structure of porosity, to establish the relationship between the structure and high physical and mechanical parameters. To obtain products with high strength, it is necessary to form a monolithic structure of a ceramic shard, represented by a framework of crystalline neoplasms connected by an X-ray amorphous phase. Quartz crystals 55–65 %, mullite 9–12 %, cristobalite 4–8 %, leucite 4–7 %, hematite 1–4%, etc. are fixed in samples of high-strength building ceramics. Due to the different production technologies of clinker bricks and porcelain stoneware, the crystallization of mullite of various types occurs: in clinker – needle-shaped habit, in porcelain stoneware – finely dispersed. It is found that the pores have a rounded closed shape of nano- and micrometer size from 1 to 15 microns. The high content of melts in the charge for porcelain stoneware ensures the formation of a large amount of amorphous phase and its homologation of crystalline neoplasms.

Keywords: phase composition, microstructure of ceramics, X-ray amorphous phase, quartz, mullite, leucite

REFERENCES

1. Salakhov A.M., Morozov V.P., Tagirov L.R., Salakhova R.A., Lyadov N.M., Bolshakova N.V. High-strength ceramics made of low-melting clays [Visokoprochnaya keramika iz legkoplavkikh glin]. Geo resources. 2012. No. 6 (48). Pp. 9–12. (rus)
2. Zubekhin A.P., Verchenko A.V., Yatsenko N.D. Dependence of the strength of porcelain stoneware on the phase composition [Zavisimost' prochnosti keramogranita ot fazovogo sostava]. Building materials. 2014. No. 8. Pp. 30–33. http://rifsm.ru/u/f/sm_08_14_fin.pdf. (rus)
3. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. The relationship of the phase composition and durability of ceramic bricks older than eight hundred years on the example of the Kazan Kremlin [Vzaimosvyaz' fazovogo sostava i dolgovechnosti keramicheskogo kirpicha vozrastom bolee vosmisot let na primere Kazanskogo Kremlya]. Glass and ceramics. 2015. No. 2. Pp. 34–38. (rus)
4. Salakhov A.M., Tagirov L.R. Structure formation of ceramics from clays forming various mineral phases during firing [Strukturoobrazovanie keramiki iz glin, formiruyuschih pri objige razlichnie mineralnie fazi]. Building materials. 2015. No. 8. Pp. 68–74. http://rifsm.ru/u/f/sm_08_15.pdf. (rus)
5. Khomenko E.S., Purdik A.V. Features of the formation of the microstructure of clinker ceramics [Osobennosti formirovaniya mikrostrukturi klinker-neroi keramiki]. Glass and ceramics. 2017. Vol. 90. No. 2. Pp. 15–19. (rus)
6. Stolboushkin A.Yu. Method of complex investigation of the core-shell transition layer in ceramic matrix composites of semi-dry pressing [Metod kompleksnogo issledovaniya perehodnogo sloya yadro-obolochka v keramicheskikh matrichnih kompozitah polusuhogo pressovaniya]. Building materials. 2019. No. 9. Pp. 28–35. DOI:10.31659/0585-430X-2019-774-9-28-35. (rus)
7. Shackelford J., Doremus R. Ceramic and Glass Materials. Structure, Properties and Processing. Springer Science & Business Media, 2008. 201 pp.
8. Pomeroy M. Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses. Elsevier Science, 2021. 2674 p.
9. Levitsky I.A., Khoruzhik O.N. Investigation of sintering processes of a multicomponent raw material mixture based on mineral raw materials of the Republic of Belarus [Issledovanie processov spekaniya polikomponentnoi sirevoi smesi na osnove mineralnogo sirya Respubliki Belarus]. Proceedings of BSTU. 2018. Series 2. No. 2. Pp. 140–145. (rus)
10. Moshnyakov M.G., Orlova T.A. Investigation of the features of firing ceramic granite from experimental mass with partial replacement of imported clays with domestic ones [Issledovanie osobennostei objiga keramicheskogo granita iz eksperimentalnoi massi s chastichnoi zamenoi importnih glin na otechestvennie]. Izvestiya vuzov. Investment. Construction. Realty. 2017. Vol. 7. No. 3. Pp. 95–106. DOI: 10.21285/2227-2917-2017-3-95-106. (rus)
11. Khorina A.V., Shelkovnikova T.I., Baranov E.V. Evaluation of the phase composition of a ceramic shard of high-strength building ceramics [Ocenka fazovogo sostava keramicheskogo cherepka visokoprochnoi stroitelnoi keramiki]. Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern

Federal University. 2022. No. 1(50). Pp. 73–80. DOI: 10.24866/2227-6858/2022-1/73-80. (rus)

12. Augustinik A.I. Ceramics [Keramika]. 2nd edition, reprint. and additional l.: Stroyizdat (Leningr. ed.), 1975. 592 p. (rus)

13. Yatsenko N.D., Zubekhin A.P. Scientific foundations of innovative technologies of ceramic bricks and management of its properties depending on the chemical and mineralogical composition of raw materials [Nauchnie osnovi innovacionnih tehnologii keramicheskogo kirpicha i upravlenie ego svoistvami v zavisimosti ot himiko-mineralogicheskogo sostava sirya]. Building materials. 2014. No. 4. Pp. 28–31. http://rifsm.ru/u/f/fin_04_14.pdf. (rus)

14. Salakhov A., Morozov V., Eskin A., Ariskina R., Ariskina K., Gumarov A., Pasyukov M. A study of raw materials and ceramic tiles produced at the Lasselsberger factory in UFA was conducted. Revista QUID (special edition). 2017. Pp. 746–752.

15. Khomenko O., Sribnyak N., Dushin V., Shushkevich V. Analysis of interaction of properties

and microstructure of building ceramics. Eastern European Journal of Corporate Technologies. 2018. 4/6(94). Pp. 16–25. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.140571

16. Salakhov A.M., Salakhova R.A., Ilyicheva O.M., Morozov V.P., Khatsrinov A.I., Nefediev E.S. Influence of the structure of materials on the properties of ceramics [Vliyanie strukturi materialov na svoistva keramiki]. Bulletin of Kazan Technological University. 2010. No.8. Pp. 343–349. (rus)

17. Levitsky I. A., Khoruzhik O. N. Interrelation of properties, phase composition and microstructure of clinker bricks [Vzaimosvyaz svoistv, fazovogo sostava i mikrostrukturi klinkernogo kirpicha]. Glass and ceramics. 2021. No. 5. Pp. 26–33. (rus)

18. Shen J., Kosmac T. Advanced ceramics for Dentistry. Butterworth-Heinemann, 2014. 416 p.

19. Holland W., Bill G. Glass-ceramic Technology. Second edition. John Wiley & Sons Limited, 2012. 436 p.

Information about the authors

Horina, Alla V. Postgraduate student. E-mail: alla.purik@mail.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, st. 20-letiya Oktyabrya, 84.

Shelkovnikova, Tatiana I. PhD. E-mail: tschelk@mail.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, st. 20-letiya Oktyabrya, 84.

Received 21.03.2023

Для цитирования:

Хорина А.В., Шелковникова Т.И. Сравнительный анализ структуры и фазового состава высокопрочных керамических изделий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 6. С. 17–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-17-25

For citation:

Horina A.V., Shelkovnikova T.I. Comparative analysis of the structure and phase composition of high-strength ceramic products. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 6. Pp. 17–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-17-25

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-26-34

Кладиева П.В.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: davidenkovpoly@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСЧЕТНОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ ЛЕНТ В СОСТАВЕ АРМИРОВАННЫХ ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ БАЛОК

Аннотация. Основной проблемой армированных изгибаемых конструкций, выполненных из ячеистого бетона, является достаточно низкое удельное сцепление на границе арматуры с бетоном, негативно влияющее на выдергивание арматуры из пористого массива и приводящее к преждевременной потере несущей способности конструкции в целом конструкций. Недооцененность существенного потенциала неиспользованной несущей способности конструкции при применении традиционного армирования, предусматривает необходимость совершенствования подходов к армированию изгибаемых ячеистобетонных конструкций. Эффективное армирование ячеистобетонных конструкций предлагается осуществлять арматурными элементами с развитой боковой поверхностью – стальными зубчатыми лентами (СЗЛ), существенно повышающими площадь контакта и качественно улучшающими контактные условия. На этапе расчетного обоснования проанализированы результаты экспериментального исследования прочности и деформативности образцов инновационных арматурных элементов стальных зубчатых лент, обладающих различными конфигурациями продольной перфорации, способствующих снижению металлоемкости ячеистобетонных конструкций, работающих на изгиб, и напрямую улучшающих их функциональные характеристики – термическое сопротивление и волнопроводимость. Выявленные вариации физико-механических свойств арматуры в связи с изменяющейся схемой ее продольной перфорации и усредненные характеристики арматуры, используемые при расчетном анализе армированных ячеистобетонных конструкций, использованы для предложения практических подходов к нормированию величин характеристик и технологий расчета, армированных ячеистобетонных конструкций.

Ключевые слова: армированный ячеистый бетон, ячеистобетонные изгибаемые конструкции, ленточная арматура, стальная зубчатая лента, прочность и деформативность стальной зубчатой ленты, двухлинейная диаграмма стали.

Введение. Проблема недостаточно полного включения поверхности арматуры в работу конструкции наиболее часто встречается при проведении экспериментальных исследований, изгибаемых ячеистобетонных конструкций [1]. Изгибаемые ячеистобетонные элементы принято армировать либо дисперсно, путем распределения по объему большого количества стержней малого диаметра, либо дискретно – отдельными арматурными элементами. Дискретное армирование ячеистобетонных конструкций однозначно имеет преимущества перед дисперсным за счет более технологичного локализованного распределения армирующих элементов в объеме пористой конструкции, а также их большего включения в совместную работу бетона и арматуры [2]. Но при этом, основной проблемой изгибаемых ячеистобетонных конструкций со стержневым армированием является достаточно низкое удельное сцепление на границе арматуры с бетоном, негативно влияющее на выдергивание арматуры из пористого массива и приводящее к преждевременной потере несущей способности конструкции в целом. Недооцененность существенного потенциала неиспользованной несущей способности кон-

струкции при применении традиционного армирования, предусматривает необходимость совершенствования подходов к армированию изгибаемых ячеистобетонных конструкций [3].

Эффективное армирование ячеистобетонных конструкций предлагается осуществлять арматурными элементами с развитой боковой поверхностью – стальными зубчатыми лентами СЗЛ [4]. Армирование стальными зубчатыми лентами позволяет существенно повысить площадь контакта и качественно улучшить контактные условия на границе бетон-сталь, обеспечивающие:

- лучшее сцепление армирующего элемента с ячеистым бетоном конструкции [5];
- лучшее использование прочности армирующего элемента в работе конструкции;
- большую дисперсию армирования, влекущую большую жесткость конструкции;
- большую долговечность, надежность и безопасность ячеистобетонного армированного изгибаемого элемента [6].

Будучи инновационным и, в этой связи, малопредставленным в нормах, армирующим элементом, СЗЛ нуждаются в экспериментальном исследовании физико-механических свойств,

факторов действительной работы в составе армированной конструкции и нормировании параметров, влияющих на прочность и деформативность армируемой конструкции, полагаемых в основу планируемой инженерной методики рационального проектирования арможестобетонных изгибаемых конструкций [7].

Методика. Для обоснования достоверности выдвинутых научных гипотез и проверки результатов численных исследований [8] эксперимента выполнена часть планируемой программы экспериментальных исследований, в части испытания арматурного элемента СЗЛ на разрыв согласно ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытания на растяжение». Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования БГТУ им. В.Г. Шухова в составе проекта Пр-18/22 программы Приоритет 2030.

Основная часть. Проектирование элементов обязательно включает этап расчетного обоснования, в связи с чем необходимо установить фактические физико-механические характеристики предлагаемых арматурных элементов в широкой номенклатуре варьируемого поперечного сечения, определяющего разнообразия арматуры под различные проектные задачи [9]. В настоящей работе обобщаются и анализируются результаты экспериментального исследования прочности и деформативности образцов СЗЛ, об-

ладающих различными конфигурациями продольной перфорации, определены усредненные характеристики арматуры, используемые при расчетном анализе армированных жестобетонных конструкций, предложены практические подходы к нормированию величин характеристик и технологий расчета совершенствованием нормативной нелинейной методики, выявлены вариации физико-механических свойств арматуры в связи с изменяющейся схемой ее продольной перфорации.

Перед проведением испытаний образцов были определены методические подходы к классификации нового предлагаемого класса арматурных элементов – СЗЛ [10]. Экспериментальное определение физико-механических характеристик проводилось на шести вариантах образцов варьирующейся продольной перфорации (рис. 1), маркированных следующим образом:

ШС.ШО.ШС.ШО.ШС.ШО.ШС-О(З)-ДлО.ДлП,

где ШС, ШО... – ширины (мм) чередующихся стальных фрагментов и отверстий слева-направо вдоль поперечного сечения образца;

О(З) – отверстие без зуба (О) или с зубом (З) – отогнутой вокруг короткой стороны стальной пластины в отверстии;

ДлО, ДлП – длина отверстия (мм), длина стальной перемычки между отверстиями, соответственно, вдоль продольного сечения образца.

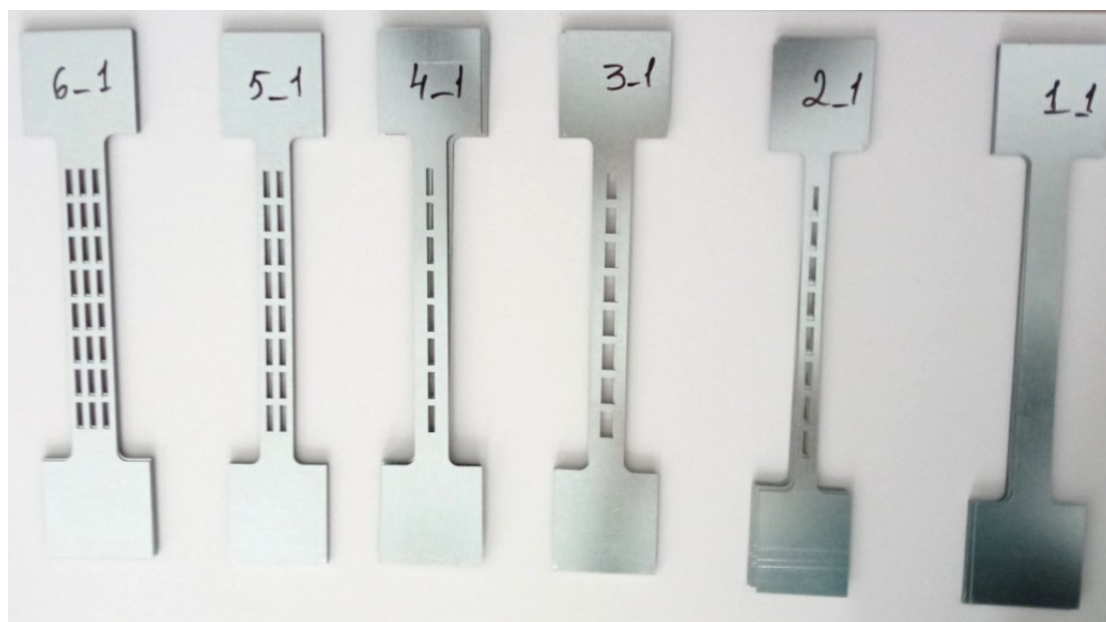


Рис. 1. Образцы СЗЛ изменяемой продольной перфорации (слева-направо: серия 6 (5.5.5.5.5.5-О-20.5), серия 5 (5.5.5.5.5-О-20.5), серия 4 (10.5.10-О-20.5), серия 3 (7.5.10.7.5-О-20.5), серия 2 (5.5.5-О-20.5), серия 1 (без перфорации, ширина 25 мм)

Стальные ленты для испытаний выполнены в виде типовых пропорциональных плоских образцов длиной 500 мм различной ширины в зависимости от конфигурации одиночной, двойной и

тройной перфорации и ее размеров. Материал образцов лент – оцинкованная сталь 1 сорта марки 08пс класс цинкового покрытия 100 толщина металла 1 мм по ГОСТ 14918-2020 «Прокат листовой горячеоцинкованный». Ленты изготовлены

немеханическим способом обработки металла, для их производства использовалась технология лазерной резки металла, позволяющая достигать высочайшей точности разреза, что подтверждается натурными замерами полученных образцов – погрешность геометрических размеров минимальна и не превышает предельно допустимую [11].

Испытания выполнялись на универсальной разрывной испытательной машине серии WEW-600D для установления фактических характеристик механических свойств образцов: модуля упругости, физического и условного предела текучести, временного сопротивления, относительного равномерного удлинения [12].

Внешний вид испытанных образцов СЗЛ изменяемой продольной перфорации серии 6

(5.5.5.5.5.5-О-20.5), серии 5 (5.5.5.5.5-О-20.5), серии 2 (5.5.5-О-20.5), серии 1 (без перфорации, ширина 25 мм) представлены на рисунке 2. Величина относительного удлинения является основным показателем пластичности исследуемой стали при испытании на растяжение. Относительное удлинение, зарегистрированное при разрушении образцов, составляет порядка 20 % от начальной расчетной длины образца.

Физико-механические свойства образцов серии 2 (5.5.5-О-20.5) по результатам испытаний представлены на рисунке 3 в форме диаграммы $\sigma - \epsilon$. Также приведены параметры усредненной по образцам двухлинейной диаграммы по п. 6.2 СП 63.13330.2018, усредненные прочности R_y и R_s и начальный модуль деформации E .

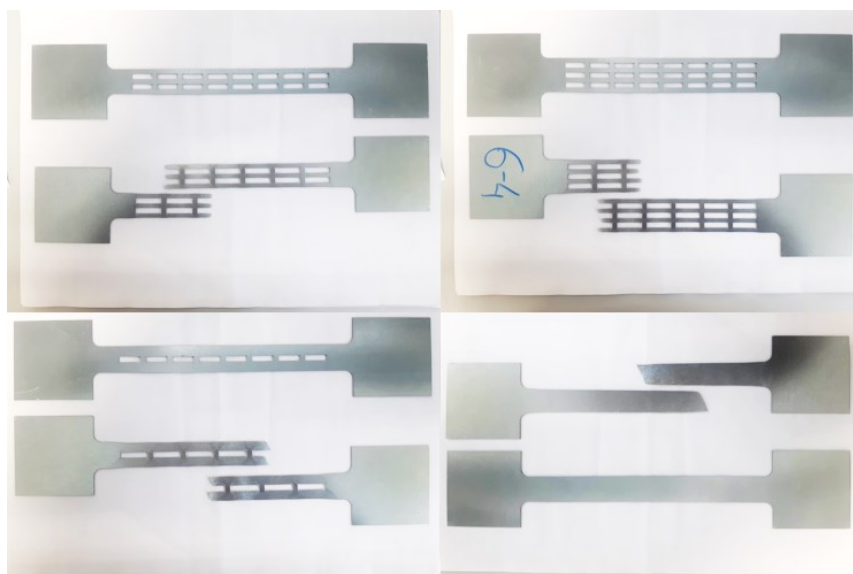


Рис. 2. Внешний вид образцов лент изменяемой продольной перфорации до и после разрыва

Физико-механические свойства образцов серии 2 (5.5.5-О-20.5) по результатам испытаний представлены на рисунке 3 в форме диаграммы $\sigma - \epsilon$. Полученная экспериментальная диаграмма $\sigma - \epsilon$ является характерной для пластичных материалов, что позволяет ее привести к упрощенной двухлинейной диаграмме поведения стали – диаграмме Прандтля. А также выделить на ней основные ключевые точки (нижний рис. 3). Крайняя верхняя точка начального прямолинейного участка диаграммы определяет предел пропорциональности стали порядка 290 МПа, до нее зависимость напряжений от относительных деформаций линейна: напряжения прямо пропорциональны деформациям, что характерно для большинства материалов и описывается законом Гука. Максимальное напряжение, до которого в материале не возникает пластических деформаций определяет предел упругости стали – 340

МПа. После прохождения предела пропорциональности, зависимость между напряжениями и деформациями меняется, и закон Гука становится неактуальным и материал начинает вести себя пластично. Линия, движущаяся параллельно оси деформаций ϵ , и образующая горизонтальный участок диаграммы представляет площадку текучести и определяет предел текучести стали равный 327 МПа. Максимальное напряжение, которое возникает в образце перед началом разрушения, определяет предел прочности стали или временное сопротивление разрыву составляет 361 МПа (верхний рис. 3). В результате обработки данных, установлено расчетное сопротивление металла $R_y = 327$ МПа, начальный модуль деформации $E = 155714$ МПа. Также на рисунке 3 приведены параметры усредненной по образцам двухлинейной диаграммы по п. 6.2 СП 63.13330.2018, усредненные прочности R_y и R_s и начальный модуль деформации E .

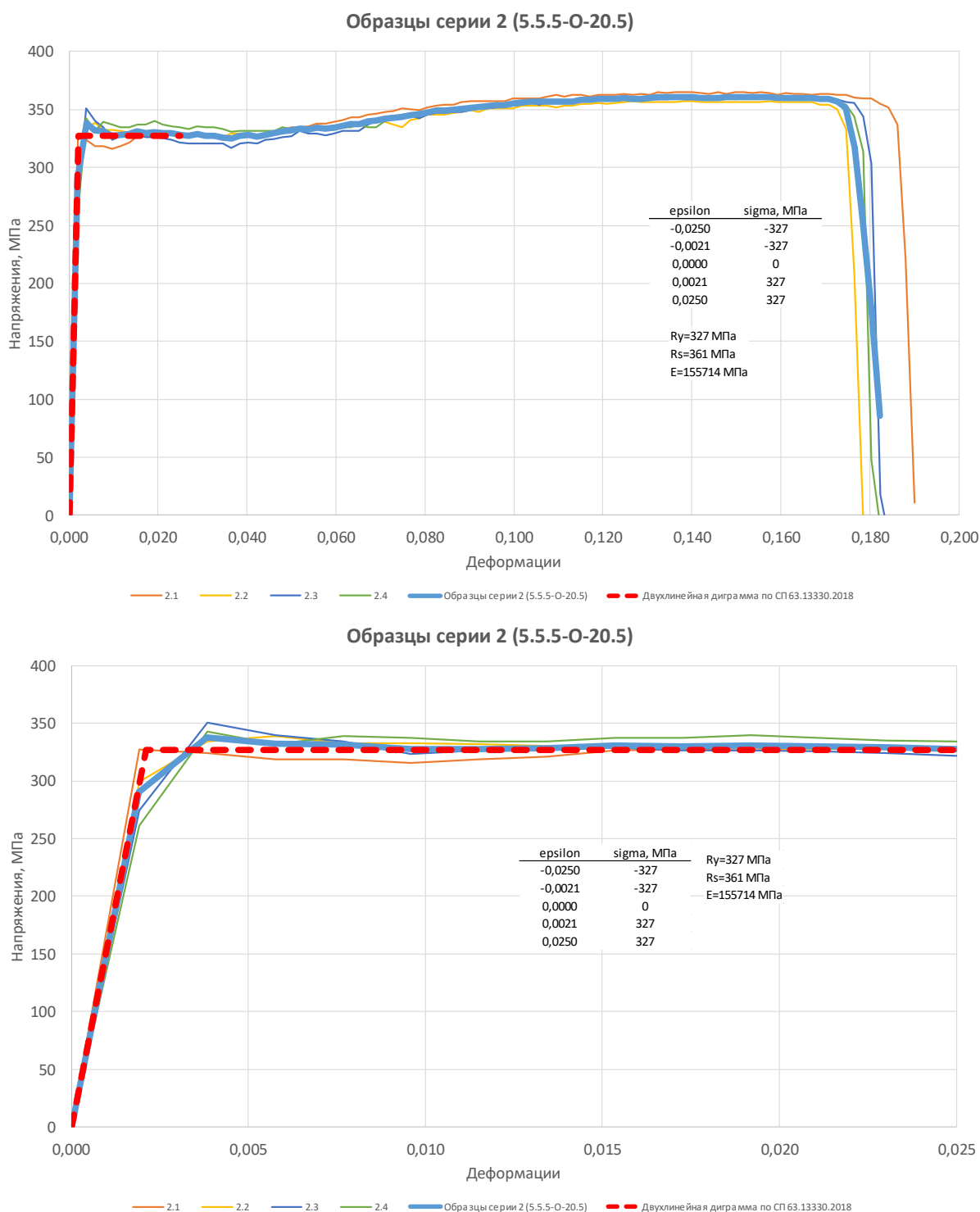


Рис. 3. Физико-механические свойства образцов серии 2 (5.5.5-О-20.5): вверху — диаграмма стали образца в диапазоне деформаций от 0 до разрушения, внизу — то же в диапазоне деформаций от 0 до ϵ_{s2} ; параметры усредненной по образцам двухлинейной диаграммы по п. 6.2 СП 63.13330.2018, усредненные прочности R_y и R_s и начальный модуль деформации E

Разработка инженерной методики рационального проектирования СЗЛ требует экспериментального определения и математического моделирования краевых процессов, происходящих у отверстий – ослаблений сечения СЗЛ, получаемых при их производстве. Приступив к формулировке научно-теоретических положений инженерной методики после обработки результатов

численных исследований арматурных элементов, автором были выявлены некоторые необходимые для инженерной методики регрессионные зависимости параметров двухлинейных диаграмм состояния стального элемента от приведенной площади его поперечного сечения (рис. 4), в которой неравнозначно учитывались вырезы по ширине ленты с учетом количества вырезов и их расположения. Предполагаемая зависимость

между количеством и размерами отверстий, общей площадью поперечного сечения, количеством краевых и центральных зон сохранения элементом поперечного сечения и действующими

в элементе усилиями при общем центральном растяжении, как армирующем элементе изгибаемой балки, была сформулирована в виде коэффициента концентрации напряжений, изменяемого по ширине элемента [13].

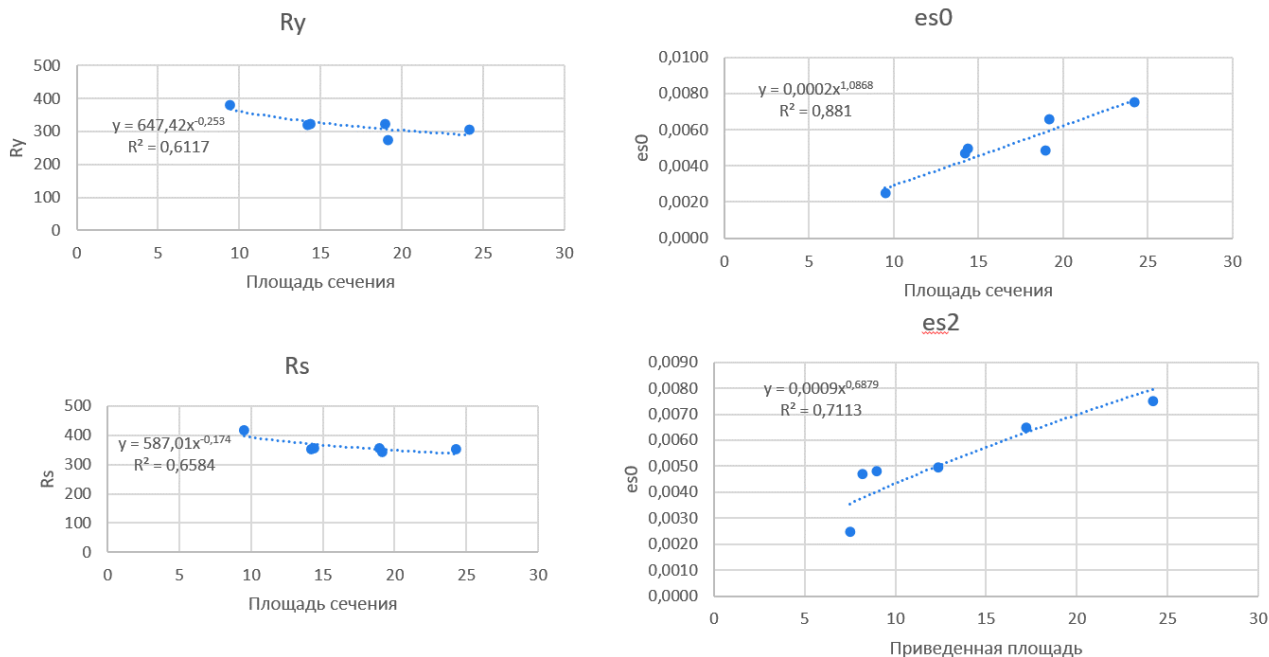


Рис. 4. Графики зависимости параметров (R_y – левый верхний, R_s – левый нижний, $Es0$ – правый верхний, $Es2$ – правый нижний) двухлинейных диаграмм состояния СЗЛ от приведенной площади поперечного сечения с учетом коэффициента напряжения

Вывявленные зависимости параметров представлены графиками элементарных степенных функций. Зависимость расчетного сопротивления R_y от приведенной площади поперечного сечения (левый верхний график рис. 4) описывается убывающим графиком степенной функции с действительным показателем степени: при увеличении площади поперечного сечения образца отмечается снижение расчетного сопротивления стали. Зависимость временного сопротивления R_s от приведенной площади поперечного сечения (левый нижний график рис. 4) также представляет аналогичную степенную функцию, описанную убывающим графиком, по которому при увеличении площади поперечного сечения образца отмечается снижение временного сопротивления стали разрыву. Зависимость параметра остаточных деформаций $Es0$ от приведенной площади поперечного сечения (правый верхний график рис. 4) представлена возрастающим графиком степенной функции с иррациональным показателем, где при увеличении площади поперечного сечения образца отмечается рост остаточных деформаций. Зависимость относительных деформаций $Es2$ от приведенной площади поперечного сечения (правый нижний график рис. 4) описана возрастающим графиком степенной функции с иррациональным показателем, по

которому видно, что с увеличением площади поперечного сечения также отмечается возрастающие относительные деформации стального образца. Коэффициент детерминации (R^2) всех графиков находится в диапазоне до 1: от 0,6117 до 0,881, что отражает допустимое качество регрессионной модели, описывающей связь между зависимой и независимыми переменными модели.

Отклонения изменений от линейного как раз и определяют разнообразие размера и расположения отверстий, формирующих индивидуальный для каждого элемента набор концентраторов напряжения, способствующих перераспределению усилий и требующих учета при построении модели. Вырезы, примыкающие к краю сечения, оценивались как концентратор напряжения в 2 раза менее значимый, чем вырезы, расположенные в центре [14].

Что также подтверждается выполнением нелинейного физического расчета в специализированном софте ПК ЛИРА-САПР 2022 (рис. 4): в точках контура отверстий напряжения разнятся порядка 2 раз, что и послужило первым приближением к оценке влияния концентраторов через приведенную площадь. Для определения уточненного коэффициента влияния концентратора напряжений при учете положения и размеров выреза отверстий по длине лент планируется прове-

дение ряда оптимизационных расчетов [15]. Конечной целью эксперимента является определение параметров физико-механических характе-

ристик армирующего элемента в нелинейно-деформированной постановке прямой задачи, определяемой двухлинейной диаграммой материала в соответствии с п. 6.2 СП 63.13330.2018.

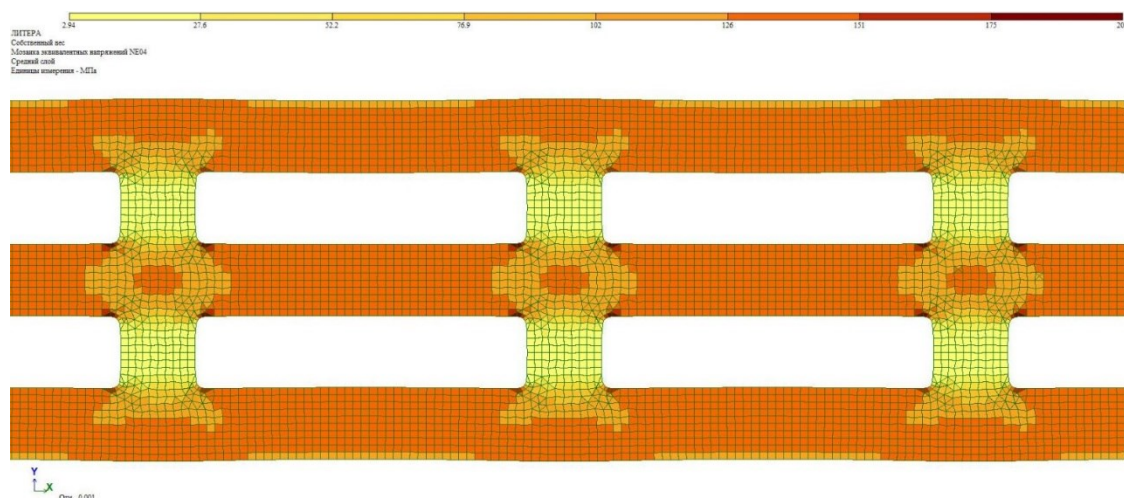


Рис. 4. Оценка влияния концентраторов напряжений в арматурных элементах через приведенную площадь лент, МПа

Выводы. Элементы СЗЛ могут быть аппроксимированы двухлинейной диаграммой стали, используемой при расчете армированных ячеистобетонных изгибаемых элементов по прогрессивной нелинейно-деформируемой модели как с использованием положений СП 63.13330.2018, так и в специализированном ПО, методом конечных элементов.

Результаты испытаний образцов варьируемых параметров перфорации в продольном направлении продемонстрировали небольшую значимость геометрических характеристик перфорации на прочность СЗЛ. Характеристикой, определяющей прочность элемента в составе ячеистобетонной конструкции является чистая площадь сечения, а геометрические характеристики перфорации, предположительно, имеют существенное влияние на прочность сцепления элемента с ячеистым бетоном в массиве конструкции, что оказывает влияние на величину усилий продергивания арматуры и коэффициент ее конструктивного использования в элементе.

Получаемые перфорацией элемента отверстия приводят к повышению ресурсоемкости элемента за счет некоторого количества неиспользуемого удаляемого материала. Рациональным направлением совершенствования СЗЛ является недорез отверстия с оставлением одной из граней отверстия нетронутой, выгибом стального фрагмента в зуб, и предполагаемым повышением прочности сцепления с бетоном за счет усложнения напряженно-деформированного состояния элемента и снижения абсолютных значений касательных напряжений на поверхности арматуры.

Использование алгоритмов и методик, результатов численных и экспериментальных исследований позволят верифицировать область рационального использования инновационных армирующих элементов и в конечном итоге сделать предложение к совершенствованию строительных норм в части СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» и СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» для рационального проектирования ячеистобетонных изгибаемых элементов прямоугольного поперечного сечения произвольных размеров и армирования, раскрывающих перспективы практического использования при проектировании конструкций домокомплектов малоэтажных зданий, обеспечивающих полный переход на использование ячеистого бетона в ограждающих и несущих конструкциях и возведение энергоэффективных зданий с замкнутым тепловым контуром экономически конкурентоспособного ценового уровня.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаричев В.В., Милейковская К.М. Исследование армированных конструкций из ячеистых бетонов. М.: Гостройиздат, 1963. 99 с.
2. Ефимов О.И., Замалиев Ф.С., Ласьков Н.Н., Аль-хаснави Я.С.Г. К оценке прочности изгибаемых сталебетонных элементов из ячеистого бетона, армированных холодногнутым профилем // Строительная механика и расчет сооружений. 2021. № 6 (299). С. 7–12. DOI: 10.37538/0039-2383.2021.6.7.12
3. Karaburc S.N., Yildizel S.A., Calis G.C. Evaluation of the basalt fiber reinforced pumice

lightweight concrete // Magazine of Civil Engineering. 2020. № 2 (94). С. 81–92. DOI: 10.18720/MCE.94.7

4. Наумов А.Е., Юдин Д.А., Долженко А.В., Прахова А.А., Кучеренко А.С. Интеллектуализация технологических процессов строительно-технической экспертизы // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 12. С. 28–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-28-38

5. Аль-Хаснави Я.С.Г., Ласьков Н.Н., Ефимов О.И., Замалиев Ф.С. К вопросу о проектировании балки из ячеистого бетона с жёсткой арматурой // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 3 (48). С. 137–143.

6. Efimov O., Salimov A. Stress-strain state prediction for statically indeterminate system with accounting for malfunctioning of rod elements production // В сборнике: IOP CONFERENCE SERIES. Materials Science and Engineering. Kazan, Russia, 2020. 012067. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012067

7. Fedyuk R.S., Baranov A.V., Mughahed Amran Y.H. // Effect of porous structure on sound absorption of cellular concrete. Construction Materials and Products. 2020. 3 (2). Pp. 5–18. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-2-5-18

8. Кладиева П.В., Мозговой В.М., Моисеев М.В. Теоретическое обоснование повышения эффективности армирования изгибаемых ячеистобетонных конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 6. С. 27–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-27-35

9. Аль-Хаснави Я.С.Г. Исследование работы балок из ячеистого бетона, армированных легкимистальными тонкостенными конструкциями // В сборнике: Инновационные методы проектирования строительных конструкций зданий

и сооружений. Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции. Юго-Западный государственный университет. 2019. С. 11.

10. Кладиева П.В. Стальные ленты армирования изгибаемых ячеистобетонных конструкций // В сборнике: VII Международный студенческий строительный форум - 2022. Сборник докладов VII Международного студенческого строительного форума. Белгород, 2022. С. 43–46.

11. Otsokov K.A. Innovative technologies in construction and their use in organizational and technological events // Construction Materials and Products. 2020. 3 (1). Pp. 7–13. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-1-7-13

12. Kladieva P.V., Koshlich Yu.A. Improvement directions of technical regulations in the field of reinforced cellular concrete structures // Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 945 012059 DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012059

13. Аль-Хаснави Я.С.Г., Ласьков Н.Н., Ефимов О.И., Замалиев Ф.С. Сцепление жёсткой арматуры и ячеистого бетона // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 4 (49). С. 79–87.

14. Efimov O., Gimranov L., Fattakhova A. Calculations of the rigidity and the strength of concrete filled steel deck diaphragms // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 274. 3014. DOI: 10.1051/e3sconf/202127403014

15. Varlamov A.A., Gavrilov B.V., Davydova A.M. Destruction model of idealized concrete structure by sawing // Construction Materials and Products. 2020. 3 (2). Pp. 46–54. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-2-46-54

Информация об авторах

Кладиева Полина Викторовна, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: davidenkorolly@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 28.02.2023 г.

© Кладиева П.В., 2023

Kladieva P.V.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

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

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE DESIGN STRENGTH OF STEEL TOOTHED BELTS IN THE COMPOSITION OF REINFORCED CELLULAR CONCRETE BEAMS

Abstract. The main problem of reinforced flexible structures made of cellular concrete is a rather low specific adhesion at the border of the reinforcement with concrete. This negatively affects the pulling out of

the reinforcement from the porous mass and leads to premature loss of the bearing capacity of the structure as a whole. The underestimation of the significant potential of the unused bearing capacity of the structure when using traditional reinforcement provides for the need to improve approaches to the reinforcement of flexible cellular concrete structures. Efficient reinforcement of cellular concrete structures is proposed to be carried out with reinforcing elements with a developed lateral surface - steel toothed belts, which significantly increase the contact area and qualitatively improve contact conditions. At the stage of computational justification, the results of an experimental study of the strength and deformability of samples of innovative reinforcing elements of steel toothed belts with various configurations of longitudinal perforation, which help to reduce the metal consumption of cellular concrete structures operating in bending, and directly improve their functional characteristics - thermal resistance and wave conductivity, are analyzed. The revealed variations in the physical and mechanical properties of reinforcement due to the changing pattern of its longitudinal perforation and the average characteristics of reinforcement used in the design analysis of reinforced cellular concrete structures are used to propose practical approaches to normalizing the values of characteristics and technologies for calculating reinforced cellular concrete structures.

Keywords: reinforced cellular concrete, cellular concrete bending structures, band reinforcement, steel toothed belt, strength and deformability of steel gear band, two-line diagram of steel.

REFERENCES

1. Makarichev V.V., Mileikovskaya K.M. Research of reinforced structures made of cellular concrete. [Issledovanie armirovannykh konstrukcij iz yacheistyh betonov]. M.: Gostroizdat, 1963. 99 p. (rus).
2. Efimov O.I., Zamaliev F.S., Laskov N.N., Al-hasnavi Ya.S.G. To assess the strength of bent steel-concrete elements made of cellular concrete reinforced with a cold-bent profile. [K ocenke prochnosti izgibaemykh stalebetonnykh elementov iz yacheistogo betona, armirovannykh holodnognutym profilem]. Construction mechanics and calculation of structures. 2021. No. 6 (299). Pp. 7–12. DOI: 10.37538/0039-2383.2021.6.7.12 (rus)
3. Karaburc S.N., Yildizel S.A., Calis G.C. Evaluation of the basalt fiber reinforced pumice lightweight concrete. Magazine of Civil Engineering. 2020. № 2 (94). Pp. 81–92. DOI: 10.18720/MCE.94.7
4. Naumov A.E., Yudin D.A., Dolzhenko A.V., Prakhova A.A., Kucherenko A.S. Intellectualization of technological processes of construction and technical expertise [Intellectualizaciya tekhnologicheskikh processov stroitel'no-tekhnicheskoy ekspertizy]. Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 28–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-28-38 (rus)
5. Al-Hasnavi Ya.S.G., Laskov N.N., Efimov O.I., Zamaliev F.S. On the issue of designing a beam made of cellular concrete with rigid reinforcement. [K voprosu o proektirovanii balki iz yacheistogo betona s zhyostkoj armaturoj]. Regional architecture and construction. 2021. No. 3 (48). Pp. 137–143. (rus).
6. Efimov O., Salimov A. Stress-strain state prediction for statically indeterminate system with accounting for malfunctioning of rod elements production. IOP Conference series. Materials Science and Engineering. Kazan, Russia, 2020. 012067. DOI:10.1088/1757-899X/890/1/012067
7. Fedjuk R.S., Baranov A.V., Mugahed Amran Y.H. Effect of porous structure on sound absorption of cellular concrete. Construction Materials and Products. 2020. 3 (2). Pp. 5–18. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-2-5-18
8. Kladiyeva P.V., Mozgovoy V.M., Moiseev M.V. Theoretical substantiation of increasing the efficiency of reinforcement of bent cellular concrete structures. [Teoreticheskoe obosnovanie povysheniya effektivnosti armirovaniya izgibaemykh yacheistobetonnnykh konstrukcij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 6. Pp. 27–35. DOI:10.34031/2071-7318-2021-6-6-27-35 (rus).
9. Al-hasnavi Ya.S.G. Investigation of the work of beams made of cellular concrete reinforced with light-steel thin-walled structures [Issledovanie raboty balok iz yacheistogo betona, armirovannykh legkimistal'nyimi tonkostennymi konstrukciyami]. In the collection: Innovative methods of designing building structures of buildings and structures. collection of scientific papers of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Southwestern State University. 2019. 11 p. (rus).
10. Kladiyeva P.V. Steel reinforcement bands of bent cellular concrete structures. [Stal'nye lenty armirovaniya izgibaemykh yacheistobetonnnykh konstrukcij]. In the collection: VII International Student Construction Forum - 2022. Collection of reports of the VII International Student Construction Forum. Belgorod, 2022. Pp. 43–46. (rus).
11. Otsokov K.A. Innovative technologies in construction and their use in organizational and technological events. Construction Materials and Products. 2020. 3 (1). Pp. 7–13. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-1-7-13
12. Kladiyeva P.V., Koshlich Yu.A. Improvement directions of technical regulations in the field

of reinforced cellular concrete structures. *Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 945 012059. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012059

13. Al-Hasnavi Ya.S.G., Laskov N.N., Efimov O.I., Zamaliev F.S. Coupling of rigid reinforcement and cellular concrete. [Cceplenie zhyostkoj armatury i yacheistogo betona]. *Regional architecture and construction*. 2021. No. 4 (49). Pp. 79–87. (rus)

14. Efimov O., Gimranov L., Fattakhova A. Calculations of the rigidity and the strength of concrete filled steel deck diaphragms. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 274. 3014. DOI:10.1051/e3sconf/202127403014

15. Varlamov A.A., Gavrilov B.V., Davydova A.M. Destruction model of idealized concrete structure by sawing. *Construction Materials and Products*. 2020. 3 (2). Pp. 46–54. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-2-46-54

Information about the authors

Kladieva Polina V., Postgraduate student. E-mail: davidenkopolly@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 28.02.2023

Для цитирования:

Кладиева П.В. Экспериментальные исследования расчетной прочности стальных зубчатых лент в составе армированных ячеистобетонных балок // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 6. С. 26–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-26-34

For citation:

Kladieva P.V. Experimental investigations of the design strength of steel toothed belts in the composition of reinforced cellular concrete beams. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023. No. 6. Pp. 26–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-26-34

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-35-47

Мозголов М.В., *Козлова Е.В.

Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета

*E-mail: lizakozlova2014@gmail.com

ВЕРИФИКАЦИЯ СТЕРЖНЕВОЙ И ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МОДЕЛЕЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА SCAD РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО КЕССОННОГО ПЕРЕКРЫТИЯ

Аннотация. В соответствии с современными требованиями на проектирование зданий, проектировщики обязаны использовать конструктивные решения, устойчивые к прогрессирующему обрушению. Одним из таких решений является пространственно-работающее перекрытие кессонного типа. Пространственные конструкции являются многократно статически неопределимыми системами и их расчет выполняется на ЭВМ в программных комплексах, основанных на методе конечных элементов. Ребристую модель можно создать из различных типов конечных элементов и получить данные, значительно отличающиеся друг от друга. Одним из способов контроля метода конечных элементов является расчет конструкций при помощи разных моделей.

Цель работы - поиск простой и наиболее точной конечно-элементной модели для расчета ребристого железобетонного кессонного перекрытия.

Работа является продолжением верификационных исследований моделей SCAD расчета железобетонного кессонного перекрытия размером $9,0 \times 11,55$ м. Сравниваются изгибающие моменты в балках, полученные аналитическим методом, при помощи стержневой модели и модели, созданной из объемных элементов.

Значения изгибающих моментов, вычисленные аналитическим способом и при помощи твердотельной модели, имеют близкие значения. Максимальные отклонения МКЭ от аналитического способа расчета составляют от -0,9 до +11,6 %. Значения изгибающих моментов, вычисленные при помощи твердотельной модели и стержневой, имеют близкие значения. Максимальные отклонения составляют от -9,7 до +6,3 %. Конечно-элементная модель, расчет которой основан на решении объемной задачи теории упругости, является эффективной, но трудоемкой при ее создании и непростой при анализе полученных данных.

Ключевые слова: железобетонные кессонные перекрытия, конечно-элементная модель, твердотельная объемная модель, изгибающие моменты, верификация, сходимость результата.

Введение. Ребристые железобетонные конструкции перекрытий получили широкое применение в современном монолитном строительстве. По сравнению с безбалочными перекрытиями при наличии главных балок из них создаются более жесткие и устойчивые рамные и рамно-связевые системы. Эффективной, пространственно-работающей конструкцией, является часторебристое перекрытие кессонного типа. В настоящее время, как за рубежом, так и в нашей стране при строительстве ребристых перекрытий получают распространение опалубочные системы Skydome, Holedeck, Победа и другие.

В соответствии с современными требованиями на проектирование зданий (СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения») проектировщики обязаны использовать конструктивные решения объектов нормальной КС-2 и повышенной КС-3 ответственности с определенной устойчивостью против прогрессирующего обрушения. Пространственно-работающие конструкции как раз и относятся к таким решениям. С точки зрения строительной механики пространственные

системы являются многократно статически неопределимыми и их расчет без использования современных компьютерных программ затруднителен, или невозможен. В соответствии с п. 7.1 СП 385.1325800.2018 для расчета сооружений на устойчивость против прогрессирующего обрушения следует использовать пространственную расчетную модель. Кроме этого, в соответствии с требованиями градостроительного законодательства (Градостроительный кодекс РФ от 29.12.2004 № 190-ФЗ, СП 333.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на разных стадиях жизненного цикла») прочностной расчет строительных конструкций объектов, подлежащих экспертизе, в скором времени должен будет выполняться по BIM технологии, путем создания цифровой информационной модели здания. Расчет на ЭВМ осуществляется в программных комплексах, реализующих метод конечных элементов, при котором вычисленные в элементах усилия или напряжения могут оказаться недостоверными и причин этому достаточно. «В методе конечных элементов конструкция с бесконечным числом степеней

свободы заменяется расчетной моделью с конечным числом степеней свободы. Поэтому результат расчета может быть только приближенным. При этом точность решения задачи зависит прежде всего от числа КЭ и выбора функций, аппроксимирующих перемещения или напряжения» [1]. «К сожалению, в программных комплексах могут встречаться конечные элементы, не имеющие сходимости, то есть при сгущении сетки как будто бы имеется сходимость к какому-то решению, но это решение может отстоять очень далеко от точного» [2]. Создав сетку конечных элементов неверной густоты, расчетчик получит результат, значительно отличающийся от правильного [3-6].

Современные программные комплексы включают в себя большой набор различных типов конечных элементов, из которых можно создать ребристую конечно-элементную модель. Авторами работ [2, 3] указывается, что «При составлении компьютерной модели комбинированных систем (плита, подпертая ребрами; плоские или пространственные рамно-связевые системы; плита, опирающаяся на вертикальные стержни и др.) могут возникнуть различные трудности». По состоянию на 2022 г. в работе [7] отмечается, что на современном этапе развития компьютерных расчетов при моделировании ребристых конструкций «До сих пор не предложена оптимальная расчетная схема, с одной стороны, обладающая достаточной простотой для проведения инженерного анализа, а с другой стороны, позволяющая с большой точностью отражать особенность работы элементов перекрытия». Имеющиеся в литературе данные расчета ребристых железобетонных конструкций показывают, что в зависимости от созданной конечно-элементной модели, усилия в балках могут существенно отличаться [8-10]. Например, при расчете железобетонных кессонных перекрытий в моделях, в которых полка плиты задается оболочечными конечными элементами, а ребра стержневыми элементами, отнесенными от полки жесткой вставкой, максимальные отклонения усилий в балках, полученных методом конечных элементов от аналитического расчета, составляют: 50 % [8], 40 %, [9], 22,1 % [10].

Для обоснования надежности расчетов, созданных моделей МКЭ в п.6 ГОСТ Р 57700.10-2018 «Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области» перечислены требования к порядку верификации и валидации расчетной модели для численного моделирования в

упругой области НДС сложных элементов конструкций. Одним из методов контроля полученных данных по МКЭ является расчет конструкции при помощи разных моделей.

Данная работа является продолжением верификационных исследований конечно-элементных моделей вычислительного комплекса SCAD расчета железобетонного кессонного перекрытия размером в плане $9,0 \times 11,55$ м (в осях) [10, рис. 1] на основании уточненного аналитического метода, учитывающего как пролеты конструкции, так и ее ортогональную жесткость [10, 11]. Ранее рассматривалась стержневая конечно-элементная модель, которая показала хорошую сходимость с уточненным аналитическим методом расчета, однако есть предположение, что данная модель не в полной мере учитывает пространственную работу кессонной конструкции [10]. В работах [7, 12, 13] при расчете железобетонных конструкций, рассматриваются пространственные конечно-элементные модели, состоящие из объемных, плоских и линейных элементов. Отмечается, что при помощи моделей, решение которых основано на объемной задаче теории упругости, получается близкая к действительности картина НДС. В работе [14] при анализе причин обрушения конструкций покрытия СОК «Трансвааль-парк» указано, что критические зоны стыковки ребер и скорлупы необходимо изучать на объемных бетонных элементах, а тестовые расчеты показали адекватность объемной модели даже при одном слое элементов по толщине.

Методика выполнения работы предусматривает сравнение усилий – изгибающих моментов, полученных уточненным аналитическим способом, с учетом пролетов и жесткости конструкции, а также методом конечных элементов в вычислительном комплексе SCAD во всех пролетных балках кессонного перекрытия размером в плане $9,0 \times 11,55$ м с кессонами $1,5 \times 1,65$ м (по осям).

Целью работы является поиск простой и наиболее точной конечно-элементной модели для расчета ребристого железобетонного кессонного перекрытия, а также выявление теоретических резервов несущей способности по изгибающему моменту у стержневой модели при сравнении ее с моделью, созданной из объемных элементов.

Материалы и методы исследования. За основу численного эксперимента принята конструкция кессонного перекрытия размером в плане ($L_x \times L_y$) $9,0 \times 11,55$ м с кессонами $1,5 \times 1,65$ м (по осям), данные которой представлены в работе [10]. Высота перекрытия составляет 460 мм, толщина полки 60 мм, ширина ребер балок 200

мм. Конструкция запроектирована из бетона класса В25.

Основная часть. В соответствии с требованиями п. 6.2.5 СП. 430.1325800.2018 «Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования» и п. 2.1.1.1. Методического пособия [15] для учета ползучести бетона и наличия трещин, как и в работе [10] начальный модуль упругости бетона всей конструкции умножался на коэффициент 0,2.

Выполним расчет конструкции на ЭВМ в вычислительном комплексе SCAD в линейной постановке задачи, как основного исследовательского инструмента строительной механики [16], но с учетом коэффициентов редуцирования начального модуля упругости бетона, учитывающих его ползучесть и трещинообразование [15].

Для создания необходимой густоты сетки конечных элементов и правильного ее расположения в твердотельной модели обратим внимание на ряд требований технических норм и рекомендаций [3-6]. В соответствии с п.п. 5.3.1, 5.3.3 ГОСТ Р 57700.10-2018 «Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области» не допускается при генерации КЭМ с применением твердотельных элементов использовать для тонкостенных конструкций менее трех элементов по толщине, нежелательно использовать тетраэдральные элементы первого порядка при проведении численного моделирования в 3D постановке. Точность расчета зависит не только от типа конечного элемента, но и от способа расположения конечных элементов и их ориентации по отношению к потокам основных напряжений [6]. При

назначении расчетной сетки предпочтение нужно отдавать равносторонним элементам (равносторонний треугольник, квадрат, равносторонний тетраэдр, куб) [3-6]. Если не получается оптимальное разбиение, то для четырехугольных элементов следует ограничить их стремление к «игольчатой форме». Вытянутость четырехугольников рекомендуется ограничить в пределах 0,25...1, а рекомендуемый коэффициент формы должен быть 1...4 [6].

Выполняя данные рекомендации, в «ручном» режиме с разбиением элементарных фигур для объемной модели создана регулярная сетка конечных элементов из пространственного изопараметрического восьмиузлового конечного элемента № 36. Полка по высоте разбита на 3 параллелепипеда размером 33,333(х₁)×32,955(у₁)×20,0(з₁) мм. Ребра состоят из элементов, размером 33,333(х₁)×32,955(у₁)×33,333(з₁) мм. Для удобства приложения равномерно-распределенной нагрузки $q = 0,9 \text{ Т/м}^2$ сверху полки по объемным элементам уложена «пленка» из оболочечных конечных элементов КЭ № 41 толщиной 1 мм размером в плане 33,333(х)×32,955(у) мм с физикомеханическими характеристиками, соответствующими бетону конструкции. Данная модель состоит из 758688 узлов и 707232 элементов. При расчете конструкции, в протоколе выполнения расчета уведомления о геометрически-изменяемой системе отсутствовало. 3D модель представлена на рисунке 1.

Для объемной модели, состоящей только из одного материала, в нашем случае бетона, величины изгибающих моментов $M_{Bi,x}$, $M_{Bi,y}$ в балках, расположенных вдоль осей X и Y определяются следующим образом [13].

$$M_{Bi,x} = I_x \times \frac{\sigma_{xht,max} - \sigma_{xhc,max}}{h}, \quad (1)$$

$$M_{Bi,y} = I_y \times \frac{\sigma_{yht,max} - \sigma_{yhc,max}}{h}, \quad (2)$$

$$\sigma_{xht,max} = \frac{\sigma_{xht,max,1} + \sigma_{xht,max,2} + \dots + \sigma_{xht,max,n}}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{xht,max,i}}{n}, \quad (3)$$

$$\sigma_{yht,max} = \frac{\sigma_{yht,max,1} + \sigma_{yht,max,2} + \dots + \sigma_{yht,max,n}}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{yht,max,i}}{n}, \quad (4)$$

$$\sigma_{xhc,max} = \frac{\sigma_{xhc,max,1} + \sigma_{xhc,max,2} + \dots + \sigma_{xhc,max,n}}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{xhc,max,i}}{n}, \quad (5)$$

$$\sigma_{yhc,max} = \frac{\sigma_{yhc,max,1} + \sigma_{yhc,max,2} + \dots + \sigma_{yhc,max,n}}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{yhc,max,i}}{n}, \quad (6)$$

где I_x и I_y – моменты инерции балок; h – высота конструкции; n – количество анализируемых конечных элементов; $\sigma_{xht,max}$ и $\sigma_{yht,max}$ – усредненные максимальные напряжения растяжения в нижней

крайней фибре бетона; $\sigma_{xhc,max}$, $\sigma_{yhc,max}$ – усредненные максимальные напряжения сжатия в верхней крайней фибре бетона.

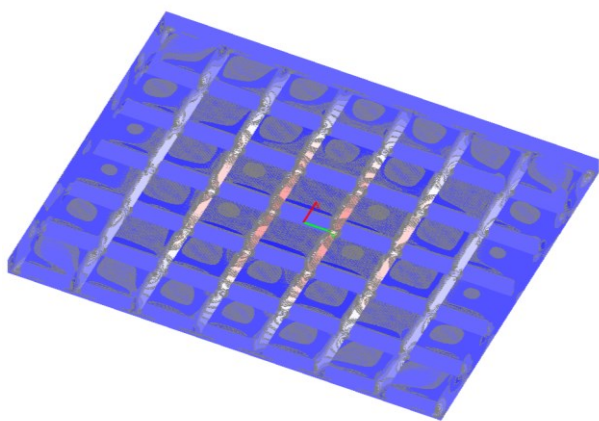


Рис. 1. Конечно-элементная модель, вид снизу. Поля напряжений σ_x

Важным является выбор анализируемого поперечного сечения коротких балок, установленных вдоль оси X. Середина пролета данных балок приходится на место пересечения с длинными балками, в этом месте имеется значительный разброс величин напряжений. Определив необходи-

мое поперечное сечение (~330 мм от центра пересечения балок), начинаем изучать интересные нас напряжения с максимальным значением во всех конечных элементах нижней, а затем верхней зон (рис. 2-6). В случае приложения нагрузки на верхнюю полку конструкции напряжения в консольных участках тавровых балок увеличиваются. Это связано с суммированием напряжений, возникающих от изгиба балок и изгиба полки, опирающейся на ребра. Анализ НДС полки должен включать в себя комбинации загрузок (по всей площади, в четных отсеках, в нечетных отсеках, в шахматном порядке, смежные пролеты, полосовая нагрузка...). В случае отсутствия в анализируемом месте нагрузки на полку, напряжения от ее изгиба по причине неразрезности и многопролетности полки могут оказаться другого знака. Поэтому мы должны учитывать в расчете только напряжения от изгиба балок. Для определения напряжений по сечению тавров без учета изгиба полок применялся второй вариант приложения нагрузки, к нижним поверхностям балок (рис. 7).

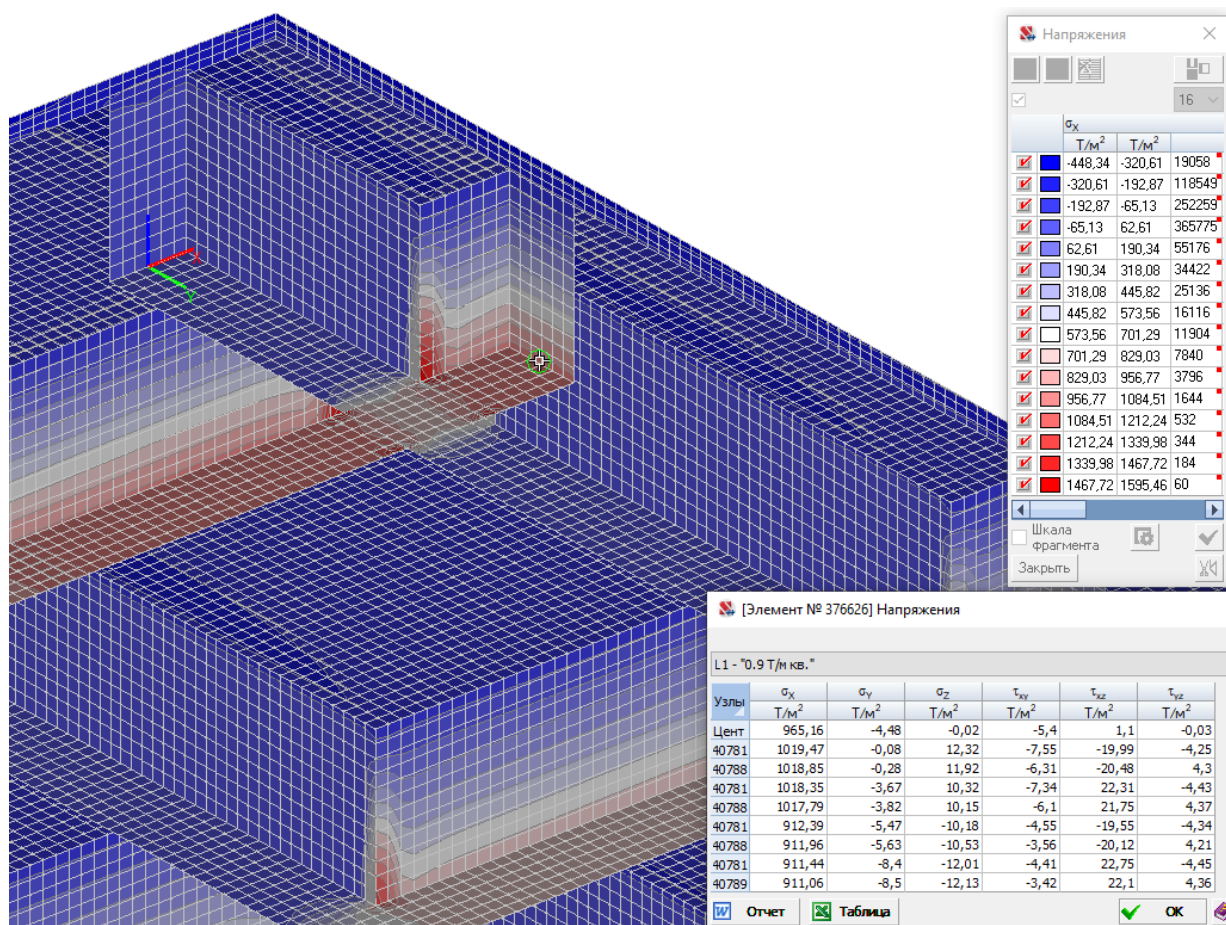


Рис. 2. Фрагмент центральной части перекрытия. Поля напряжений σ_x . Напряжения в нижней зоне балки КЗ

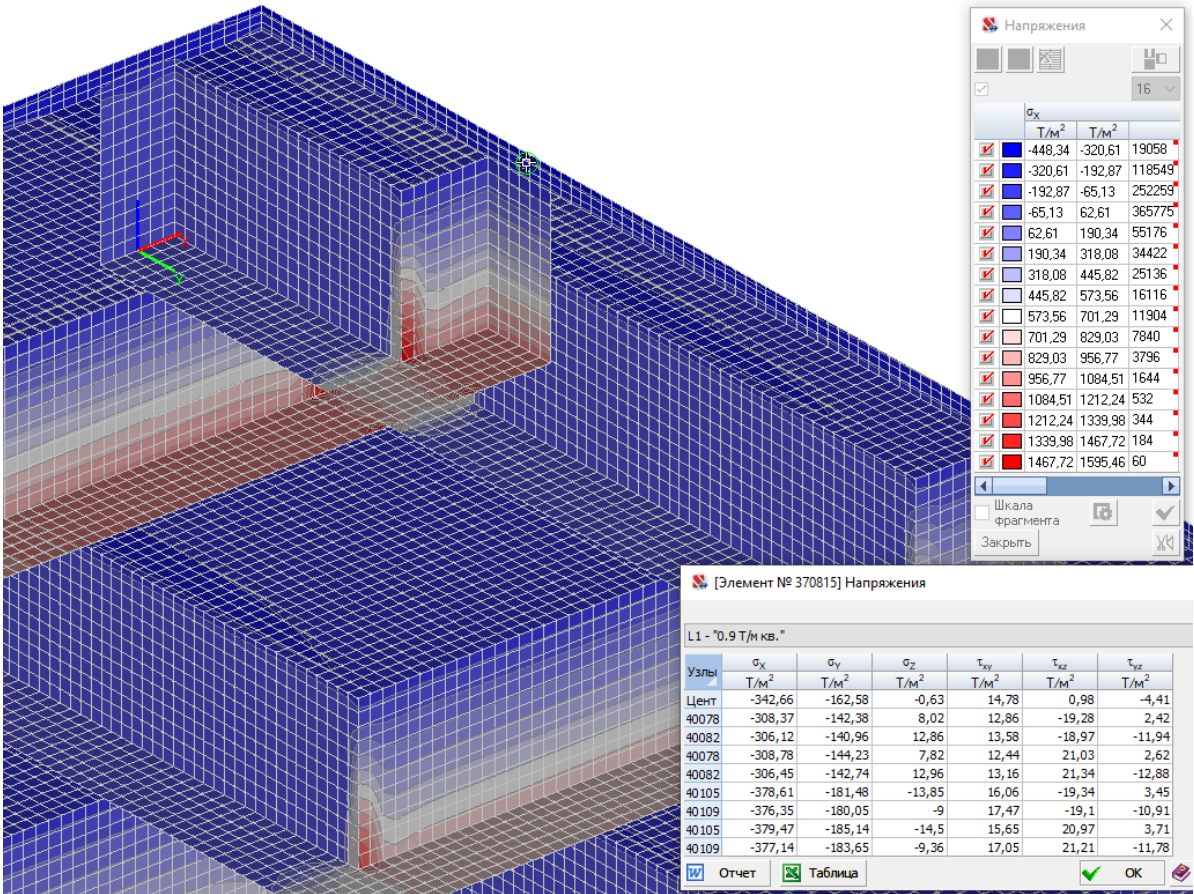


Рис. 3. Фрагмент центральной части перекрытия. Поля напряжений σ_x . Напряжения в верхней зоне балки КЗ

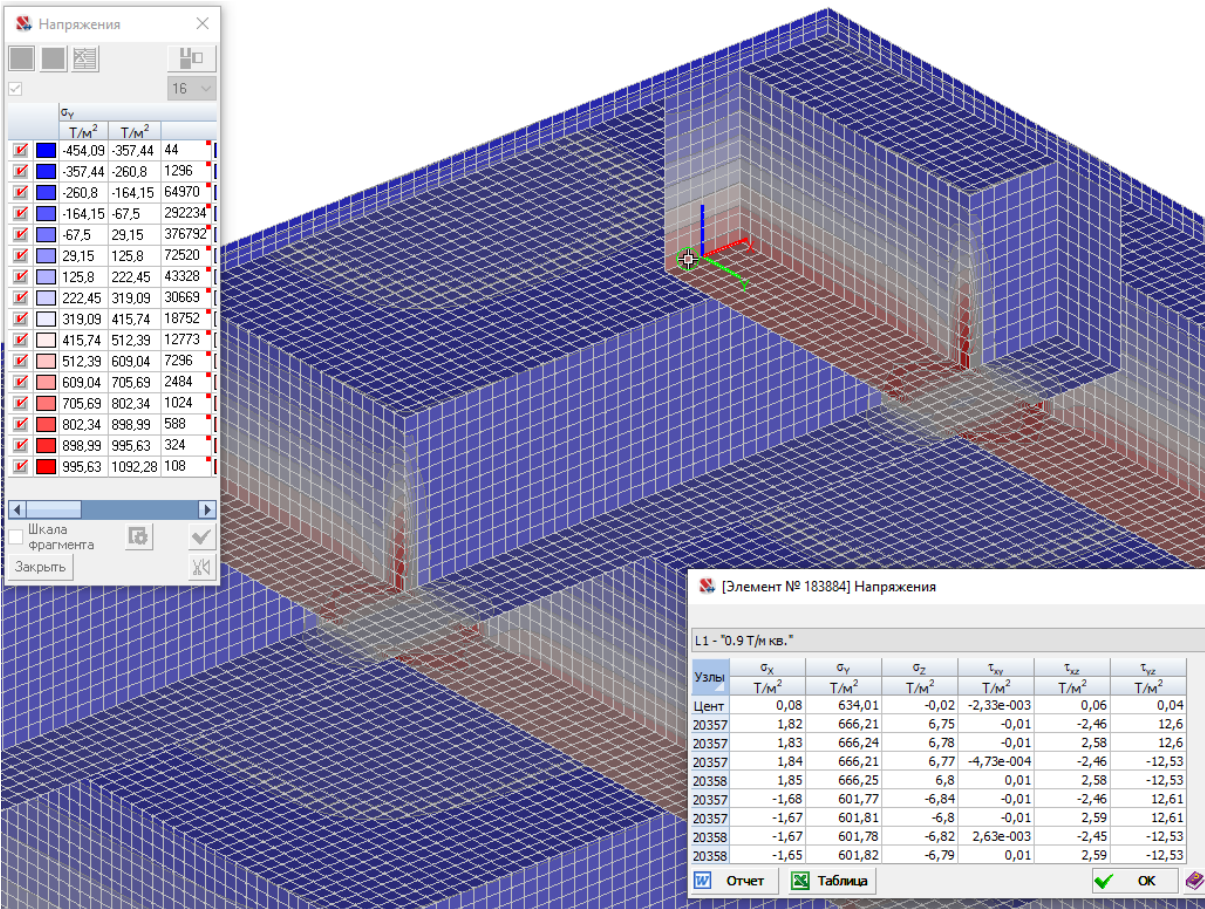


Рис. 4. Фрагмент центральной части перекрытия. Поля напряжений σ_y . Напряжения в нижней зоне балки ДЗ

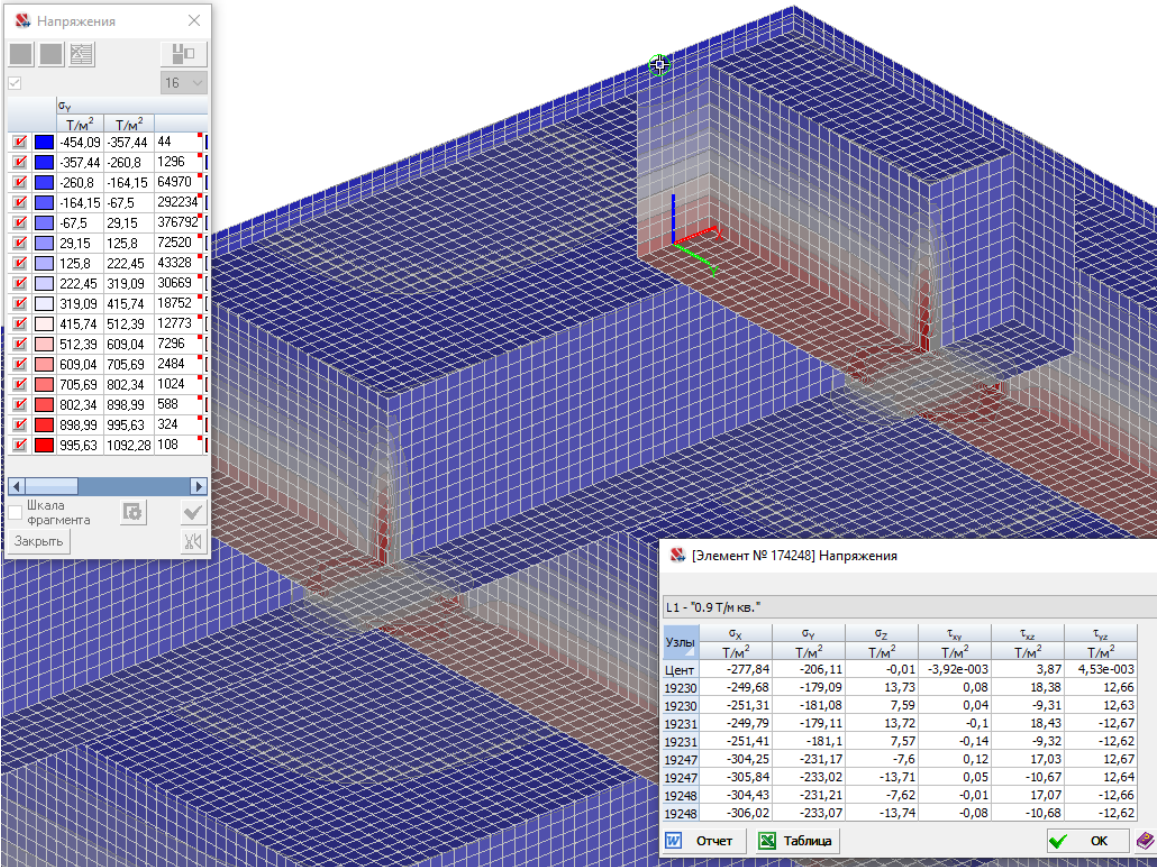


Рис. 5. Фрагмент центральной части перекрытия. Поля напряжений σ_y . Напряжения в верхней зоне балки ДЗ

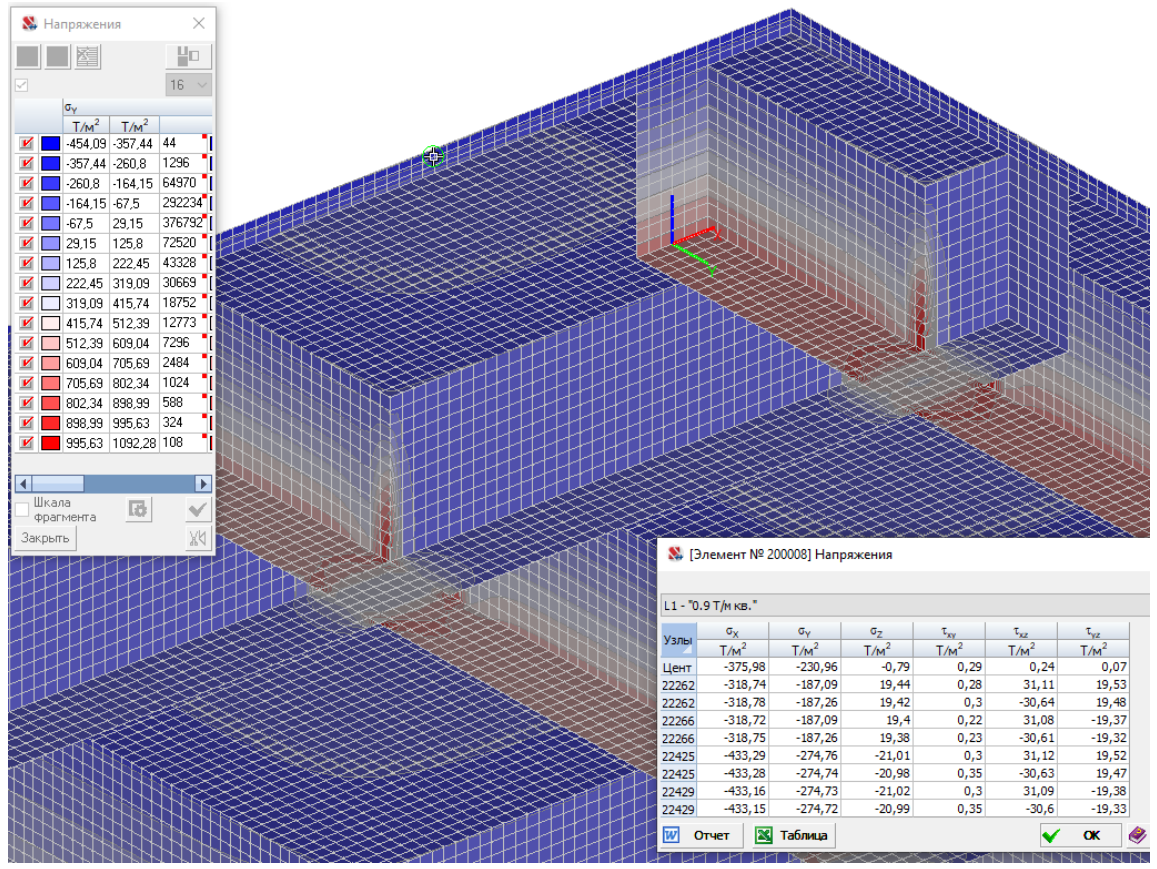


Рис. 6. Фрагмент центральной части перекрытия. Поля напряжений σ_y . Напряжения в консольном участке полки балки ДЗ

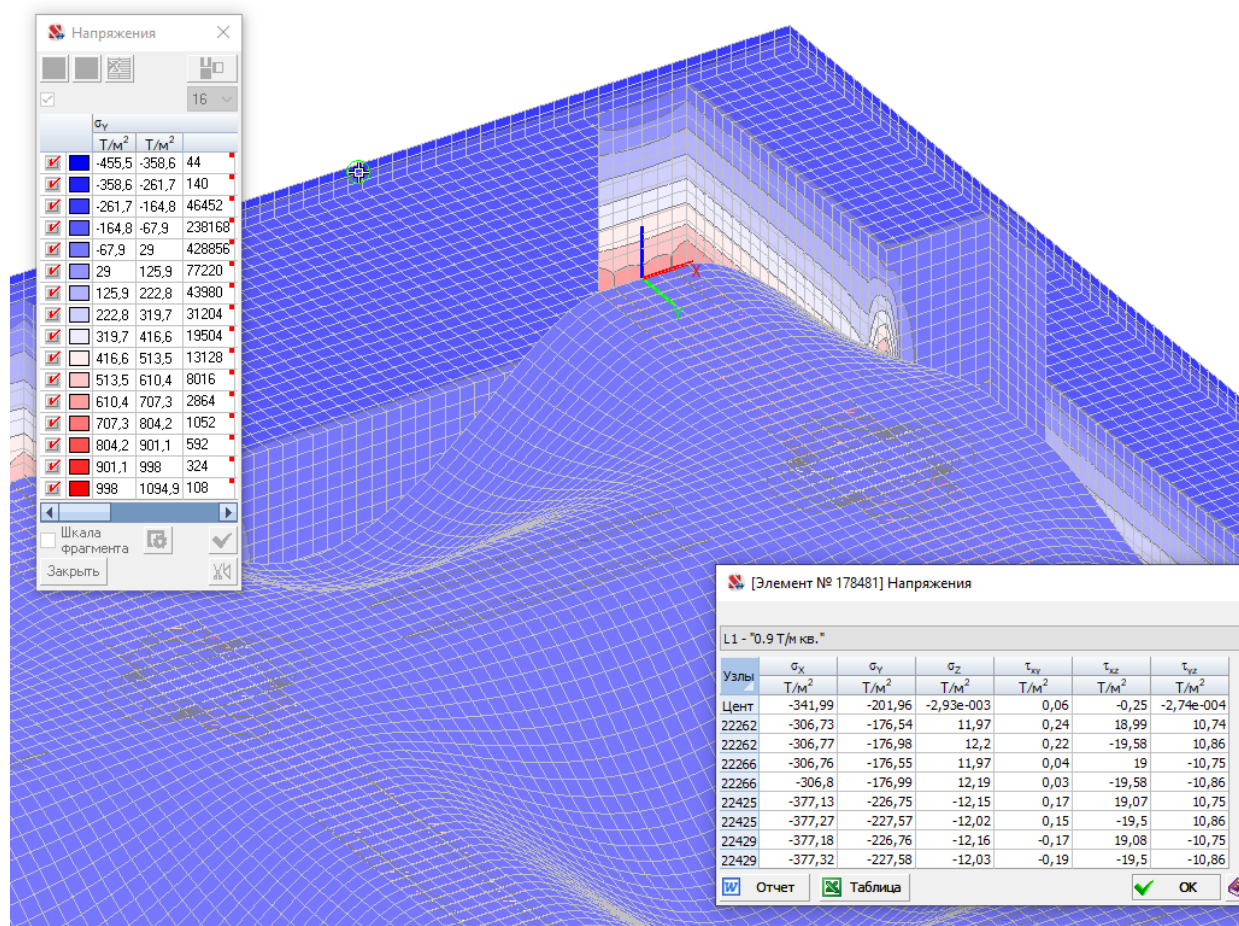


Рис. 7. Фрагмент центральной части перекрытия. Вторая схема приложения нагрузки. Поля напряжений σ_y . Напряжения в консольном участке полки балки ДЗ при приложении нагрузки к нижним поверхностям балок

Максимальные значения напряжений в конечных элементах поперечного сечения балок по нижним и верхним фибрам бетона.

ДЛИННЫЕ БАЛКИ

НАГРУЗКА НА ВЕРХНЮЮ ПОЛКУ ПЛИТЫ

Напряжения σ_y в верхней полке длинных балок таврового сечения по направлению от опоры в пролет. *Жирным выделены значения над ребром балки.

Балка Д1: -176, -178, -180, -181, -182, -183, -183, -183, -182, -180, -179, -176, -174, -170, -167, -163, -159, -156, -154, **-155, -156, -156, -156, -155, -152**, -148, -150, -155, -161, -166, -172, -178, -184, -190, -196, -201, -206, -211, -216, -220, -224, -227, -230, -233. ($\sigma_{y, \text{cp.}} = -180 \text{ T/m}^2$).

Балка Д2: -237, -238, -239, -240, -240, -240, -239, -238, -237, -235, -233, -230, -227, -224, -221, -217, -213, -210, -209, **-211, -212, -210, -210, -210, -210**, -207, -208, -212, -217, -223, -228, -233, -238, -243, -247, -251, -255, -259, -262, -265, -268, -270, -272, -273. ($\sigma_{y, \text{cp.}} = -233 \text{ T/m}^2$).

Балка Д3: -275, -275, -274, -274, -273, -271, -269, -267, -265, -262, -259, -255, -251, -247, -243, -238, -234, -231, -230, **-232, -233, -231, -231, -233, -231**, -230, -231, -234, -238, -243, -247, -251, -255, -259, -262, -265, -267, -269, -271, -273, -274, -274, -275, -275. ($\sigma_{y, \text{cp.}} = -254 \text{ T/m}^2$).

Напряжения σ_y в нижней зоне длинных балок по направлению от опоры в пролет.

Балка Д1: 331, 326, 321, 316, 311, 306. ($\sigma_{y, \text{cp.}} = 319 \text{ T/m}^2$).

Балка Д2: 582, 580, 577, 575, 572, 570. ($\sigma_{y, \text{cp.}} = 576 \text{ T/m}^2$).

Балка Д3: 666, 666, 666, 666, 666, 666. ($\sigma_{y, \text{cp.}} = 666 \text{ T/m}^2$).

НАГРУЗКА НА НИЖНИЕ ПОВЕРХНОСТИ БАЛОК

Напряжения σ_y в верхней полке длинных балок таврового сечения по направлению от опоры в пролет. *Жирным выделены значения над ребром балки.

Балка Д1: -124, -128, -131, -134, -138, -141, -144, -147, -150, -153, -156, -158, -161, -164, -166, -168, -171, -174, -176, **-176, -171, -167, -167, -169, -171**, -169, -168, -167, -167, -167, -167, -167, -167, -167, -168, -169, -170, -171, -173, -175, -177, -178, -181, -183. ($\sigma_{y, \text{cp.}} = -163 \text{ T/m}^2$).

Балка Д2: -187, -190, -192, -194, -197, -199, -202, -204, -207, -209, -212, -214, -217, -219, -222, -224, -227, -230, -232, **-233, -228, -222, -221, -227, -231**, -229, -227, -226, -225, -224, -223, -222, -222, -221, -221, -221, -221, -221, -221, -221, -221, -222, -223, -223. ($\sigma_{y, \text{cp.}} = -217 \text{ T/m}^2$).

Балка ДЗ: -225, -226, -227, -228, -229, -231, -232, -233, -235, -236, -238, -239, -241, -243, -243, -246, -248, -251, -253, **-254, -249, -243, -243, -249, -254, -253, -251, -248, -246, -243, -243, -241, -239, -238, -236, -235, -233, -232, -231, -229, -228, -227, -226, -225.** ($\sigma_{y,ср.} = -238 \text{ Т/м}^2$).

Напряжения σ_y в нижней зоне длинных балок по направлению от опоры в пролет.

Балка Д1: 378, 310, 325, 314, 300, 348. ($\sigma_{y,ср.} = 329 \text{ Т/м}^2$).

Балка Д2: 629, 568, 582, 577, 563, 593. ($\sigma_{y,ср.} = 585 \text{ Т/м}^2$).

Балка ДЗ: 713, 657, 652, 652, 657, 713. ($\sigma_{y,ср.} = 674 \text{ Т/м}^2$).

КОРОТКИЕ БАЛКИ

НАГРУЗКА НА ВЕРХНЮЮ ПОЛКУ ПЛИТЫ

Напряжения σ_x в верхней полке коротких балок таврового сечения по направлению от опоры в пролет. *Жирным выделены значения над ребром балки.

Балка К1: -128, -131, -133, -136, -138, -141, -144, -147, -150, -153, -156, -160, -163, -167, -170, -174, -177, -181, -184, -187, -189, -192, **-194, -194, -193, -193, -194, -194, -193, -195, -198, -203, -207, -211, -215, -219, -222, -225, -228, -231, -234, -236, -238, -241, -243, -245, -247, -249, -251, -254.** ($\sigma_{x,ср.} = -193 \text{ Т/м}^2$).

Балка К2: -256, -258, -260, -263, -265, -268, -270, -273, -275, -278, -280, -283, -286, -289, -291, -294, -297, -300, -302, -305, -307, -309, **-312, -312, -311, -311, -313, -315, -314, -315, -317, -319, -321, -323, -325, -327, -329, -331, -332, -334, -335, -336, -337, -339, -340, -341, -342, -343, -344, -346.** ($\sigma_{x,ср.} = -308 \text{ Т/м}^2$).

Балка К3: -347, -348, -350, -351, -353, -354, -356, -357, -359, -360, -362, -363, -365, -367, -368, -370, -371, -373, -374, -375, -377, -378, **-379, -379, -377, -377, -379, -380, -380, -380, -380, -381, -381, -381, -381, -381, -381, -380, -380, -380, -379, -379, -379, -379, -379, -379.** ($\sigma_{x,ср.} = -372 \text{ Т/м}^2$).

Напряжения σ_x в нижней зоне коротких балок по направлению от опоры в пролет.

Балка К1: 481, 474, 469, 460, 449, 436. ($\sigma_{x,ср.} = 462 \text{ Т/м}^2$).

Балка К2: 838, 836, 836, 832, 823, 812. ($\sigma_{x,ср.} = 830 \text{ Т/м}^2$).

Балка К3: 1015, 1019, 1019, 1019, 1015, 1006. ($\sigma_{x,ср.} = 1016 \text{ Т/м}^2$).

НАГРУЗКА НА НИЖНИЕ ПОВЕРХНОСТИ БАЛОК

Напряжения σ_x в верхней полке коротких балок таврового сечения по направлению от опоры в пролет. *Жирным выделены значения над ребром балки.

Балка К1: -130, -133, -135, -138, -140, -143, -146, -149, -151, -154, -158, -161, -165, -169, -173, -177, -181, -186, -190, -195, -199, -203, **-205, -203, -200, -200, -202, -204, -204, -204, -206, -209, -212, -216, -219, -222, -225, -228, -231, -234, -237, -239, -242, -244, -247, -249, -251, -254, -256, -258.** ($\sigma_{x,ср.} = -198 \text{ Т/м}^2$).

Балка К2: -260, -263, -265, -267, -269, -272, -274, -276, -279, -281, -284, -287, -290, -293, -296, -299, -303, -307, -311, -315, -319, -322, **-324, -323, -320, -320, -323, -326, -327, -326, -327, -327, -328, -330, -331, -332, -334, -335, -337, -338, -340, -341, -343, -344, -345, -347, -348, -349, -350, -352.** ($\sigma_{x,ср.} = -314 \text{ Т/м}^2$).

Балка К3: -353, -354, -356, -357, -358, -359, -361, -362, -364, -365, -367, -368, -370, -372, -374, -376, -379, -381, -384, -387, -390, -392, **-393, -391, -387, -387, -391, -394, -394, -393, -392, -390, -389, -388, -388, -387, -386, -386, -386, -386, -385, -385, -385, -385, -385, -385, -385.** ($\sigma_{x,ср.} = -380 \text{ Т/м}^2$).

Напряжения σ_x в нижней зоне коротких балок по направлению от опоры в пролет.

Балка К1: 500, 466, 471, 456, 447, 442. ($\sigma_{x,ср.} = 464 \text{ Т/м}^2$).

Балка К2: 859, 834, 840, 829, 822, 820. ($\sigma_{x,ср.} = 834 \text{ Т/м}^2$).

Балка К3: 1033, 1018, 1023, 1019, 1014, 1019. ($\sigma_{x,ср.} = 1021 \text{ Т/м}^2$).

Усредненные максимальные величины напряжений в верхних и нижних фибрах бетона балок представлены в таблице 1.

Таблица 1

Усредненные максимальные напряжения по верхней и нижней граням балок

Место приложения нагрузки		Усредненные максимальные напряжения, Т/м ²					
		Балка вдоль оси Х			Балка вдоль оси Y		
		К1	К2	К3	Д1	Д2	Д3
К верхней полке	Верхняя зона	-193	-308	-372	-180	-233	-254
	Нижняя зона	462	830	1016	319	576	666
К нижней поверхности	Верхняя зона	-198	-314	-380	-163	-217	-238
	Нижняя зона	464	834	1021	329	585	674

Вычислим изгибающие моменты в балках. Моменты инерции I_x и I_y определены в стержневой конечно-элементной модели ВК SCAD работы [10].

Балка, расположенная вдоль оси X: $I_x = 343697 \text{ см}^4$.

Балка, расположенная вдоль оси Y: $I_y = 333413,73 \text{ см}^4$.

ПРИЛОЖЕНИЕ НАГРУЗКИ НА ВЕРХНЮЮ ПОЛКУ

Балка К1

$$M_{BK1} = I_x \times \frac{\sigma_{xht,max} - \sigma_{xhc,max}}{h} = \frac{343697}{10^8} \times \frac{462+193}{0,46} = 4,89 \text{ Тм}, \quad (7)$$

Балка К2

$$M_{BK2} = I_x \times \frac{\sigma_{xht,max} - \sigma_{xhc,max}}{h} = \frac{343697}{10^8} \times \frac{830+308}{0,46} = 8,5 \text{ Тм}, \quad (8)$$

Балка К3

$$M_{BK3} = I_x \times \frac{\sigma_{xht,max} - \sigma_{xhc,max}}{h} = \frac{343697}{10^8} \times \frac{1016+372}{0,46} = 10,37 \text{ Тм}, \quad (9)$$

Балка Д1

$$M_{BD1} = I_y \times \frac{\sigma_{yht,max} - \sigma_{yhc,max}}{h} = \frac{333413,73}{10^8} \times \frac{319+180}{0,46} = 3,62 \text{ Тм}, \quad (10)$$

Балка Д2

$$M_{BD2} = I_y \times \frac{\sigma_{yht,max} - \sigma_{yhc,max}}{h} = \frac{333413,73}{10^8} \times \frac{576+233}{0,46} = 5,86 \text{ Тм}, \quad (11)$$

Балка Д3

$$M_{BD3} = I_y \times \frac{\sigma_{yht,max} - \sigma_{yhc,max}}{h} = \frac{333413,73}{10^8} \times \frac{666+254}{0,46} = 6,67 \text{ Тм}, \quad (12)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ НАГРУЗКИ НА НИЖНЮЮ ПОВЕРХНОСТЬ БАЛОК

Балка К1

$$M_{BK1} = I_x \times \frac{\sigma_{xht,max} - \sigma_{xhc,max}}{h} = \frac{343697}{10^8} \times \frac{464+198}{0,46} = 4,95 \text{ Тм}, \quad (13)$$

Балка К2

$$M_{BK2} = I_x \times \frac{\sigma_{xht,max} - \sigma_{xhc,max}}{h} = \frac{343697}{10^8} \times \frac{834+314}{0,46} = 8,58 \text{ Тм}, \quad (14)$$

Балка К3

$$M_{BK3} = I_x \times \frac{\sigma_{xht,max} - \sigma_{xhc,max}}{h} = \frac{343697}{10^8} \times \frac{1021+380}{0,46} = 10,47 \text{ Тм}, \quad (15)$$

Балка Д1

$$M_{BD1} = I_y \times \frac{\sigma_{yht,max} - \sigma_{yhc,max}}{h} = \frac{333413,73}{10^8} \times \frac{329+163}{0,46} = 3,57 \text{ Тм}, \quad (16)$$

Балка Д2

$$M_{BD2} = I_y \times \frac{\sigma_{yht,max} - \sigma_{yhc,max}}{h} = \frac{333413,73}{10^8} \times \frac{585+217}{0,46} = 5,81 \text{ Тм}, \quad (17)$$

Балка Д3

$$M_{BD3} = I_y \times \frac{\sigma_{yht,max} - \sigma_{yhc,max}}{h} = \frac{333413,73}{10^8} \times \frac{674+238}{0,46} = 6,61 \text{ Тм}. \quad (18)$$

Прогиб центра перекрытия стержневой конечно-элементной модели составил $f = 47,43 \text{ мм}$, модели из объемных конечных элементов $f = 40,98 \text{ мм}$, что можно объяснить влиянием жесткости мест пересечения балок. В стержневой модели это можно учесть, установив в узлы балок жесткие вставки [17].

Данные аналитического расчета и компьютерных моделей представлены в таблице 2.

Выводы.

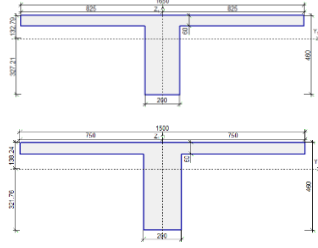
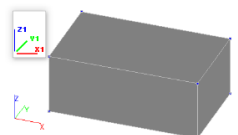
1. Значения изгибающих моментов в балках шарнирно-опертого по контуру перекрытия прямоугольного в плане с прямоугольными кессонами, вычисленные при помощи аналитического способа расчета с учетом величин пролетов и жесткости конструкции, а также методом конечных элементов ВК SCAD при помощи модели, состоящей из объемных конечных элементов с

приложением нагрузки на верхнюю полку, имеют близкие значения. Максимальные отклонения метода конечных элементов от аналитического способа расчета составляют от -1,9 до +13 %.

2. Значения изгибающих моментов в балках шарнирно-опертого по контуру перекрытия прямоугольного в плане с прямоугольными кессонами, вычисленные при помощи аналитического способа расчета с учетом величин пролетов и жесткости конструкции, а также методом конечных элементов ВК SCAD при помощи модели, состоящей из объемных конечных элементов с приложением нагрузки на нижние грани балок, имеют близкие значения. Максимальные отклонения метода конечных элементов от аналитического способа расчета составляют от -0,9 до +11,6 %.

Таблица 2

Сравнение значений изгибающих моментов в балках кессонного перекрытия ($L_x \times L_y$) 9,0 × 11,55 м с кессонами 1,5 × 1,65 м (в осях), полученные аналитическим методом и при помощи компьютерных моделей вычислительного комплекса SCAD

Метод расчета		Изгибающие моменты M, Тм				
		Балка вдоль оси X			Балка вдоль оси Y	
		К1	К2	К3	Д1	Д2
Аналитический [10]		4,76 100 %	8,52 100 %	10,57 100 %	3,2 100 %	5,48 100 %
Балочная модель [10]						
		5,18 108,8 %	9,33 109,5 %	11,6 109,7 %	3,36 105%	5,76 105,1%
Тавровые балки – пространственный стержень тип КЭ 5						
Твердотельная модель из объемных конечных элементов тип КЭ 36 	Нагрузка сверху	4,89 102,7 % (94,4 %)	8,5 99,8 % (91,1 %)	10,37 98,1 % (89,4 %)	3,62 113 % (107,7 %)	5,86 106,9 % (101,7 %)
	Нагрузка снизу	4,95 104 % (95,6 %)	8,58 100,7 % (92 %)	10,47 99,1 % (90,3 %)	3,57 111,6 % (106,3 %)	5,81 106 % (100,9 %)

*Примечание: в скобках представлены данные при сравнении твердотельной модели с балочной КЭМ

3. Значения изгибающих моментов в балках шарнирно-опертого по контуру перекрытия прямоугольного в плане с прямоугольными кессонами, вычисленные методом конечных элементов BK SCAD при помощи модели, состоящей из объемных конечных элементов с приложением нагрузки на верхнюю полку и стержневой модели, имеют близкие значения. Максимальные отклонения объемной модели от стержневой составляют от -10,6 до +7,7 %.

4. Значения изгибающих моментов в балках шарнирно-опертого по контуру перекрытия прямоугольного в плане с прямоугольными кессонами, вычисленные методом конечных элементов BK SCAD при помощи модели, состоящей из объемных конечных элементов с приложением нагрузки на нижние грани балок и стержневой модели, имеют близкие значения. Максимальные отклонения объемной модели от стержневой составляют от -9,7 до +6,3 %.

5. Теоретических запасов несущей способности по изгибающему моменту у стержневой конечно-элементной модели по сравнению с моделью из объемных элементов не выявлено. Имеющиеся отклонения значений изгибающих мо-

ментов моделей можно объяснить математическими особенностями расчета метода конечных элементов и сложностью анализа твердотельной модели.

6. Конечно-элементная модель, расчет которой основан на решении объемной задачи теории упругости, является эффективной верификационной моделью изучения сложных систем, но трудоемкой при ее создании и непростой при анализе полученных данных. Твердотельную модель, состоящую из объемных, плоских и линейных конечных элементов можно рекомендовать только для расчета отдельных конструкций или их критических зон.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хечумов Р.А., Кепплер Х., Прокопьев В.И. Применение метода конечных элементов к расчету конструкций. М.: АСВ, 1994. 351 с.
2. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. К.: Факт, 2005. 344 с.
3. Городецкий А.С., Барабаш М.С., Сидоров В.Н. Компьютерное моделирование в задачах строительной механики. М.: АСВ, 2016. 337 с.

4. Секулович М. Метод конечных элементов. М.: Стройиздат; 1993. 664 с.
5. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. М.: ДМК Пресс; 2007. 600 с.
6. Перельмутер А.В. Беседы о строительной механике. М.: Издательство SCAD Soft, Издательский дом АСВ; 2016. 304 с.
7. Никитин К.Е., Кирсанов О.А. Сравнительное исследование конечно-элементных методов расчета ребристых железобетонных перекрытий // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. №18(3). С. 242–254. DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-3-242-254.
8. Малахова А.Н. Монолитные кессонные перекрытия зданий // Вестник МГСУ. 2013. № 1. С. 79–86.
9. Шибаета В.Д. Исследование напряженно-деформированного состояния монолитных кессонных перекрытий // Молодой ученый. 2021. № 16(358). С. 119–123.
10. Мозголов М.В., Козлова Е.В. Верификация моделей SCAD железобетонного кессонного перекрытия на основе аналитического метода расчета, учитывающего пролеты и жесткость конструкции // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №2. С. 29–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-29-40
11. Мозголов М.В., Козлова Е.В. О применении жесткостей аналитического метода расчета прямых железобетонных кессонных перекрытий. Часть 2. Расчет с относительной жесткостью балок // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. №35(4). С. 62–79. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-2(33)-60-138
12. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М.: ДМК Пресс. 2010, 464 с.
13. Пекин Д.А. Плитная сталежелезобетонная конструкция. М.: АСВ, 2010. 440 с.
14. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И. Анализ причин обрушения конструкций покрытия СОК «Трансвааль-парк». ANSYS SOLUTIONS // Инженерно-технический журнал. Русская редакция. 2007. С. 5–12.
15. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве». Плоские безбалочные железобетонные перекрытия: [Электронный ресурс]. Москва; 2017. URL: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp60_2017.pdf (дата обращения 20.02.2023)
16. Перельмутер А.В., Тур В.В. Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. №13(3). С. 86–102. DOI: 10.22337/1524-5845-2017-13-3-86-102
17. Мозголов М.В., Белан Е.А. О влиянии абсолютно жестких вставок на напряженно-деформированное состояние балок железобетонных кессонных перекрытий при расчете конструкций в вычислительном комплексе SCAD // Всероссийская научно-практическая конференция «Наука-Общество-Технологии-2022». ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» 2022. С. 211–219.

Информация об авторах

Мозголов Михаил Валентинович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство». E-mail: mvmozglov@yandex.ru. Коломенский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет». Россия, 140402, Коломна, ул. Октябрьской революции, д. 408.

Козлова Елизавета Вадимовна, студент 4-го года обучения направления «Строительство». E-mail: lizakozlova2014@gmail.com. Коломенский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Россия, 140402, Коломна, ул. Октябрьской революции, д. 408.

Поступила 03.03.2023 г.

© Мозголов М.В., Козлова Е.В., 2023

Mozglov M.V., *Kozlova E.V.

Kolomna Institute (branch) Moscow Polytechnic University

**E-mail: lizakozlova2014@gmail.com*

VERIFICATION OF CORE AND SOLID-STATE MODELS OF THE SCAD COMPUTING COMPLEX FOR THE CALCULATION OF REINFORCED-CONCRETE WAFFLE SLAB FLOOR SYSTEM

Abstract. In accordance with modern requirements for the design of buildings, designers are needed to use structural solutions that are resistant to progressive collapse. A space-working caisson-type overlap is

one of such solutions. Spatial constructions are repeatedly statically indeterminate systems and their calculation is performed on a computer in software complexes based on the finite element method. A ribbed model can be created from various types of finite elements and get data that varies. One of the ways to control the finite element method is to calculate structures using different models. The purpose of the work is to search for the simplest and most accurate finite element model for calculating a ribbed reinforced concrete waffle slabs.

The work is a continuation of verification studies of SCAD models for calculating reinforced concrete waffle slabs with a size of 9.0×11.55 m. The bending moments in the beams obtained by the analytical method using a rod model and a model created from three-dimensional elements are compared. The values of bending moments calculated analytically and using a solid-state model have similar values. The maximum deviations of the FEM from the analytical method of calculation are from -0.9 to +11.6 %. The values of bending moments calculated using a solid-state model and a rod model have similar values. The maximum deviations range from -9.7 to +6.3 %. The finite element model, the calculation of which is based on solving the volumetric problem of elasticity theory, is effective, but time-consuming to create and difficult to analyze the data obtained.

Keywords: reinforced concrete waffle slabs, finite element model, solid-state volumetric model, bending moments, verification, convergence of the result.

REFERENCES

1. Khechumov R.A., Keppler Kh., Prokop'ev V.I. Application of the finite element method to the calculation of structures [Primenenie metoda konechnykh elementov k raschetu konstruksiy]. Moscow: ASV Publ., 1994. 351 p. (rus)
2. Gorodetskiy A.S., Evzerov I.D. Computer models of structures [Komp'yuternye modeli konstruksiy]. Kyiv: Fakt Publ., 2005. 344 p. (rus)
3. Gorodetskiy A.S., Barabash M.S., Sidorov V.N. Computer modeling in tasks of constructions [Komp'yuternoe modelirovanie v zadachakh stroitel'noy mekhaniki]. Moscow: ASV Publ., 2016. 337 p. (rus)
4. Sekulovich M. Finite element method. [Metod konechnykh elementov]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1993. 664 p. (rus)
5. Perel'muter A.V., Slivker V.I. Design models of structures and the possibility of their analysis [Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost' ikh analiza]. Moscow: DMK Press Publ.; 2007. 600 p. (rus)
6. Perel'muter A.V. Conversations about construction mechanics [Besedy o stroitel'noy mekhanike]. Moscow: SCAD Soft Publ., ASV Publ., 2016. 304 p. (rus)
7. Nikitin K.E., Kirsanov O.A. Comparative study of finite element methods of calculation of ribbed reinforced concrete floors [Sravnitel'noe issledovanie konechno-elementnykh metodik rascheta rebristykh zhelezobetonnykh perekrytiy]. Construction mechanics of engineering structures and structures. 2022. No. 18(3). Pp. 242–254. doi:10.22363/1815-5235-2022-18-3-242-254 (rus)
8. Malakhova A.N. Monolithic caisson floors of buildings [Monolitnye kessonnye perekrytiya zdaniy]. Vestnik MGSU. 2013. No 1. Pp. 79–86. (rus)
9. Shibaeva V.D. Investigation of the stress-strain state of monolithic coffered ceilings [Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya monolitnykh kessonnykh perekrytiy]. Molodoi uchenyi. 2021. No. 16 (358). Pp. 119–123 (rus)
10. Mozolov M.V., Kozlova E.V. Verification of SCAD models of reinforced concrete coffered floor based on an analytical calculation method that takes into account spans and structural rigidity [Verifikatsiya modeley SCAD zhelezobonnogo kessonogo perekrytiya na osnove analiticheskogo metoda rascheta, uchityvayushchego prolety i zhestkost' konstruksii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 2. Pp. 29–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-29-40. (rus)
11. Mozolov M.V., Kozlova E.V. Use of analytical method for calculating stiffnesses of straight waffle slabs. Part 2. Calculation using relative stiffness of beams [O primenении zhestkostey analiticheskogo metoda rascheta pryamykh zhelezobetonnykh kessonnykh perekrytiy. Chast' 2. Raschet s otnositel'noy zhestkost'yu balok]. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. No. 35(4). Pp. 62–79. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-4(35)-62-79 (rus)
12. Alyamovskiy A.A. Engineering calculations in SolidWorks Simulation [Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation]. Moscow: DMK Press Publ., 2010. 464 p. (rus)
13. Pekin D.A. Plate steel-reinforced concrete construction [Plitnaya stalezhelezobonnaya konstruksiya]. Moscow: DIA, 2010. 440 p. (rus)
14. Belostotsky A.M., Dubinsky S.I. Analysis of the causes of the collapse of the structures of the coating of the Transvaal Park SOC [Analiz prichin obrusheniya konstruksiy pokrytiya SOK «Transvaal'-park»]. ANSYS SOLUTIONS. Engineering and Technical Journal. Russian edition. 2007. Pp. 5–12.
15. Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii,

Federal'noe avtonomnoe uchrezhdenie «Federal'nyy tsentr normirovaniya, standarti-zatsii i otsenki sootvetstviya v stroitel'stve» flat girderless reinforced concrete floors [Ploskie bezbalochnye zhelezobetonnye perekrytiya: Moscow, 2017. URL: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp60_2017.pdf (date of treatment: 20.02.2023) (rus)

16.Perelmuter A.V., Tur V.V. Whether we are ready to proceed to a nonlinear analysis at designing? [Gotovy li my pereyti k nelineynomu analizu pri proektirovanii?] International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. No.

13(3). Pp. 86–102. DOI:10.22337/1524-5845-2017-13-3-86-102 (rus)

17.Mozgolov M.V., Belan E.A. On the effect of absolutely rigid inserts on the stress-strain state of reinforced concrete coffered beams when calculating structures in the SCAD computing complex [O vliyaniy absolyutno zhestkikh vstavok na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie balok zhelezobetonnykh kessonnykh perekrytiy pri raschete konstruktsiy v vychislitel'nom komplekse SCAD]. Vse-rossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Nauka-Obshchestvo-Tekhnologii-2022». FGAOU VO «Moskovskiy politehnicheskiy universitet» 2022. Pp. 211–219 (rus)

Information about the authors

Mozgolov, Mikhail V. PhD. E-mail: mvmozgolov@yandex.ru. Kolomna Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University. Russia, 140402, Kolomna, October Revolution str., 408.

Kozlova, Elizaveta V. 4rd year student on "Construction", E-mail: lizakozlova2014@gmail.com. Kolomna Institute (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow Polytechnic University" Russia, 140402, Kolomna, October Revolution str., 408.

Received 03.03.2023

Для цитирования:

Мозголов М.В., Козлова Е.В. Верификация стержневой и твердотельной моделей вычислительного комплекса SCAD расчета железобетонного кессонного перекрытия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 6. С. 35–47. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-35-47

For citation:

Mozgolov M.V., Kozlova E.V. Verification of core and solid-state models of the scad computing complex for the calculation of reinforced-concrete waffle slab floor system. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 6. Pp. 35–47. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-35-47

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-48-54

Долженко А.В., Наумов А.Е., Щенятский О.А.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: da7182@mail.ru*

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ПЛОСКИХ РУЛОННЫХ КРОВЕЛЬ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТОВ ОЦЕНКИ ИХ ФИЗИЧЕСКОГО ИЗНОСА

Аннотация. Качество управления жизненным циклом плоских рулонных кровель зависит от эффективности технологии оценки их физического износа, на величину которого существенно влияют условия эксплуатации кровель и источники воздействий на них. Плоские рулонные кровли являются наиболее распространёнными техническими решениями на рынке недвижимости и весьма дефектоёмкими строительными системами, физический износ которых влияет на конструктивную безопасность и функциональную надёжность не только их, но и всего здания в целом. Дефекты плоских рулонных кровель, как и дефекты строительных конструкций в целом, находятся в тесной организационно-технологической взаимосвязи, при которой жизненный цикл отдельного дефекта может представлять собою синергетическое умножение или нивелирование параметров жизненного цикла сопутствующих дефектов.

Ключевыми недостатками современных методик оценки физического износа является исходная ориентация разработчика и преимущественное практическое исполнение сопутствующих инструментальных исследований вручную, в связи с чем методики излишне упрощены, шаблонизированы, субъективны в результатах натуральной оценки ресурсоёмкости жизненного цикла, так и его продолжительности.

В этой связи представляется перспективным совершенствование программного обеспечения, повышающего достоверность и качество фактологического результата обследования, а также алгоритмов построения прогнозных оценок жизненного цикла отдельных дефектов.

В работе представлены направления совершенствования экспертно-нормативного метода оценки физического износа плоских рулонных кровель, количественно учитывающих совместное влияние дефектов на техническое состояние строительной системы на жизненном цикле, существенно расширяющего оперативный инструментарий строительного эксперта и технического управляющего зданием.

Ключевые слова: плоские рулонные кровли, физический износ, оценка физического износа, дефект, удельный вес дефекта, метод анализа иерархий.

Введение. Важнейшими аспектами управления жизненным циклом здания являются мероприятия по поддержанию его конструктивной безопасности и функциональной надёжности [1]. Наиболее распространёнными и, при этом, наиболее проблемными конструктивными элементами здания на являются плоские рулонные кровли, характеризующиеся большим разнообразием типов конструкций и составляющих их материалов [2]. Каждый тип плоской рулонной кровли имеет свои особенные дефекты, отличные от остальных, что требует от строительного эксперта наличия специфических знаний об особенностях её эксплуатации и ремонта [3].

Основным методом, используемым при оценке физического износа зданий, является экспертно-нормативный [4], основанный на визуальном осмотре строительных конструкций и последующего соотношения выявленных дефектов с их количественными выражениями, описанными в нормативных документах. Однако, результаты оценки по этому методу часто приводят

к занижению величины физического износа [5], что вызвано:

- неучтённостью всей номенклатуры дефектов;
- предусмотренной точностью расчетов $\pm 5\%$;
- субъективностью оценки параметров дефектов экспертом;
- погрешностью измерений, обратно пропорциональной опыту эксперта.

Совершенствование экспертно-нормативного метода оценки физического износа плоских рулонных кровель, по мнению авторов, должно строиться на повышении количества, периодичности и достоверности получения фактологического материала [6], расширении номенклатуры учитываемых расчётом дефектов и учете удельного веса отдельного дефекта в общем объеме, предложении аппаратно-программного ведения динамического анализа дефектов, реализующих дифференцированные жизненные циклы.

Методология. Исследование возможности совершенствования инструментов оценки физического износа плоских рулонных кровель проводилось авторами путем:

- изучения регламентирующей правила эксплуатации плоских рулонных кровель нормативно-технической документации, проведения обследования их технического состояния, а также научных исследований в области исследования причин возникновения дефектов плоских рулонных кровель, динамики их развития и способов предотвращения и устранения;

- структурирования данных, получаемых при проведении строительно-технической экспертизы и описывающих наиболее распространенные типовые дефекты плоских рулонных кровель на фото- и видеоматериалах, получаемых экспертом в процессе проведения обследования, в том числе и с помощью беспилотных летательных аппаратов;

- тестирования практикующих строительных экспертов на распознавание типовых дефектов плоских рулонных кровель на примере типовых фотографий участков имеющей повреждения кровли и их ранжирование по степени влияния на конструктивную безопасность и функциональную надежность плоской рулонной кровли;

- изучения существующих подходов и технологий информационного моделирования зданий (Building Information Model) и поиска методов насыщения BIM-модели зданий выявленными при проведении строительно-технической экспертизы плоских рулонных кровель дефектов.

Основная часть. Кровлей технически называется элемент крыши, предохраняющий здание от проникновения атмосферных осадков; включает в себя водоизоляционный слой из разных материалов, основание под водоизоляционный слой, аксессуары для обеспечения вентиляции, примыканий, безопасного перемещения и эксплуатации, снегозадержания и др. Таким образом от технического состояния кровли зависит не только её работоспособность, но и техническое состояние нижележащих строительных конструкций, оборудования и других функциональных элементов, которые могут получить возрождения в результате нарушения её герметичности.

Плоские рулонные кровли являются самыми распространёнными в многоэтажном строительстве [7] в связи с их относительной дешевизной и возможностью сплошной гидроизоляции. В то же время плоские рулонные кровли являются одними из самых дефектоёмких кровельных систем [8], средняя продолжительность жизненного цикла которых не превышает 15 лет, при продолжительности стадии безотказной эксплуатации до 7 лет [9].

Среди основных причин образования дефектов рулонных кровель следует отметить ошибки, допущенные при проектировании, в процессе устройства, эксплуатации кровли и естественные процессы деградации материалов и узлов [10].

На стадии эксплуатации своего жизненного цикла плоская рулонная кровля подвергается и реагирует на сложные воздействия, сочетающие в себе температурные, механические, химические, биологические и др. [11], что усложняет, удорожает и снижает достоверность результатов дефектоскопии, осуществляемой традиционными технологиями ручной инструменталистики и визуальной аналитики [4].

Таблица 41 ВСН 53-86(р) Правила оценки физического износа жилых зданий, наиболее часто используемого строителями экспертами, разделяет степень физического износа плоских рулонных кровель по 4-м категориям, учитывающим вид дефекта и расплывчато описанных признаков физического износа, трактуемых экспертом в широком диапазоне субъективного восприятия. При этом использованный перечень дефектов содержит наименее трудоемкие для определения вручную, но далеко не исчерпывающие характеристики технического состояния кровли, а рекомендуемый нормами состав работ по результатам оценки узок, категоричен и не согласуется с принципами рационального управления жизненным циклом объекта строительства.

Существующие технологии строительно-технической дефектоскопии, в этой связи, не позволяют в полной мере оценивать, систематизировать и оптимизировать стоимость жизненного цикла здания – расчетной величины денежного выражения совокупных издержек владения жилым домом, включающих в себя расходы на выполнение строительно-монтажных работ, последующие обслуживание, эксплуатацию в течение срока их службы, ремонт, утилизацию созданного в результате выполнения работы объекта [12]. В то же время стоимость жизненного цикла здания является важным показателем, регулируемым государством, и учитываемым не только на стадии эксплуатации объекта недвижимости, но и предварительно рассчитываемым при его проектировании. В связи с этим правильно принятое решение о необходимости, своевременности и объемах ремонтно-восстановительных работ, особенно для муниципальных объектов, финансируемых из государственного бюджета, позволит рациональнее и эффективнее управлять ими, распределяя бюджетные средства по объектам в соответствии с реальными потребностями.

Авторами проведено исследование комплексного влияния типовых дефектов плоских рулонных кровель на величину её физического

износа. Ранжирование дефектов, дифференцируемо учитываемых в линейной модели комплексного взаимного влияния осуществлено методом анализа иерархий [13, 14]. Приведение к единой унифицированной форме классифицирующей атрибутики строительных дефектов как системотехнически ценных элементов (иерархических классов) информационной модели здания, обладающих собственным жизненным циклом планируется в рамках, подготовленных Министерством строительства методических указаний по классификации и кодированию информационных моделей объектов капитального строительства промышленного назначения.

Исследование проводилось на следующих типовых, наиболее часто встречающихся, визуально определяемых дефектах:

Отсутствие водоизоляционного ковра – дефект, характеризующийся полным или частичным на большой площади отсутствием рулонного ковра, вызванным его отрывом от подстилающей поверхности в результате ветрового или иного воздействия;

Отсутствие защитного слоя – дефект, вызванный нарушением технологии устройства кровли, заключающийся в отсутствии защитного слоя гравия

Механическое повреждение рулонного ковра (пробоины) – дефекты, вызванный воздействием атмосферных осадков в виде града, человеческого фактора (при передвижении по поверхности, монтаже и креплении крышных конструкций, сбрасывании мусора с вышележащих уровней крыши).

Расслоение швов полотен – дефект, вызванный нарушением технологии устройства кровли (не соблюдена величина нахлеста, предварительно не раскатывались и не подгонялись соседние рулоны кровельного материала и пр.), а также наклейкой верхнего слоя стыка против направления господствующих ветров, выраженный зазорами между слоями кровельного материала в местах стыков.

Растрескивание водоизоляционного ковра – дефект, вызванный растягивающими усилиями в подстилающих слоях кровли, возникающих при ошибках, допущенных при устройстве кровли, а также температурных деформаций и проявляющийся в виде сквозных трещин – разрывов рулонного ковра.

Разрушение покровного слоя материала – дефект, проявляющийся в виде хаотично расположенных нитевидных трещин, появление которых вызвано воздействием солнечных лучей, ультрафиолетового излучения и старением материала.

Сползание рулонного ковра. Складки – дефект, вызванный размягчением битумного материала под воздействием солнечной радиации и последующими температурными его деформациями

Вздутие водоизоляционного ковра – дефект, проявляющийся в виде деформации рулонного ковра, вызванной избыточным давлением паровоздушной смеси в замкнутой полости под его поверхностью.

Впадины. Образование зон застоя воды – дефект, вызванный отклонениями, допущенными при устройстве основания (неровности, выбоины, углубления), чаще всего проявляющийся скоплением воды или песка.

Биологическое повреждение – дефект, характеризующийся гниением материалов кровли и их механическим повреждением корневой системой растений.

Отслоение рулонного ковра от вертикальных поверхностей – дефект, вызванный нарушениями, допущенными при устройстве и эксплуатации кровли (отсутствие крепления к вертикальным конструкциям, перегибы кровельного материала).

Отсутствие элементов из оцинкованной стали – дефект, вызванный нарушениями, допущенными при устройстве кровли или выполнении ремонтно-восстановительных работ, выраженный локальным или полным отсутствием элементов парапета из оцинкованной стали.

Отсутствие крышек элементов организованного водостока – дефект, вызванный нарушениями устройства или эксплуатации кровли.

Коррозия металлических элементов – дефект стальных конструкций крыши и кровли, вызванный истиранием защитного слоя и воздействием атмосферных осадков.

А также на следующих критериях конструктивной безопасности и функциональной надежности:

Герметичность – способностью объекта препятствовать прохождению жидкости или газа.

Долговечность – способность строительного объекта сохранять физические и другие свойства, устанавливаемые при проектировании и обеспечивающие его нормальную эксплуатацию в течение расчетного срока службы при надлежащем техническом обслуживании.

Ремонтопригодность – способность элемента или конструкции оставаться в состоянии, в котором они могут выполнять требуемые функции, или быть восстановленными до этого состояния при возникновении неисправности.

Работоспособность – способность исполнять требуемые функции в соответствии с предполагаемыми условиями использования (эксплуатации).

Поликритериальное сравнение методом анализа иерархий осуществлялось с использованием

следующих показателей технического состояния строительной системы, зависящих от диагностируемых дефектов: герметичность, долговечность, ремонтпригодность и работоспособность в трактовке этих технических определений (табл. 1).

Таблица 1

Принятая классификация визуально определимых дефектов плоской рулонной кровли

Дефект	Иерархическая классификация	Характеристика
Отсутствие водоизоляционного ковра (локальное или полное)	CEн / PMн / CMa / Def_001 / ID_Def_xxx	Полное или частичное на большой площади отсутствие рулонного ковра,
Отсутствие защитного слоя на поверхности кровли	CEн / PMн / CMa / Def_002 / ID_Def_xxx	Отсутствие защитного слоя гравия
Механическое повреждение рулонного ковра (пробоины)	CEн / PMн / CMa / Def_003 / ID_Def_xxx	Пробоины в толще рулонного ковра
Расслоение швов на стыке полотен	CEн / PMн / CMa / Def_004 / ID_Def_xxx	Зазоры между слоями кровельного материала в местах стыков
Растрескивание водоизоляционного ковра	CEн / PMн / CMa / Def_005 / ID_Def_xxx	Разрывы рулонного ковра
Разрушение покровного слоя материала	CEн / PMн / CMa / Def_006 / ID_Def_xxx	Хаотично расположенные нитевидные трещины
Сползание рулонного ковра. Складки	CEн / PMн / CMa / Def_007 / ID_Def_xxx	Складки рулонного материала вдоль уклона
Вздутие водоизоляционного ковра	CEн / PMн / CMa / Def_008 / ID_Def_xxx	Выпуклые деформации рулонного ковра
Впадины. Образование зон застоя воды	CEн / PMн / CMa / Def_009 / ID_Def_xxx	Скопление воды или песка в углублениях
Биологическое повреждение	CEн / PMн / CMa / Def_010 / ID_Def_xxx	Гниение материалов кровли и их механическое повреждение корневой системой растений
Отслоение рулонного ковра от вертикальных поверхностей	CEн / PMн / CMa / Def_011 / ID_Def_xxx	Отсутствие крепления к вертикальным конструкциям, перегибы кровельного материала
Отсутствие элементов из оцинкованной стали	CEн / PMн / CMa / Def_012 / ID_Def_xxx	Локальное или полное отсутствие элементов парапета из оцинкованной стали
Отсутствие крышек элементов организованного водостока	CEн / PMн / CMa / Def_013 / ID_Def_xxx	Отсутствие крышек элементов организованного водостока
Коррозия металлических элементов	CEн / PMн / CMa / Def_014 / ID_Def_xxx	Коррозионные повреждения на поверхности стальных элементов кровли

Результаты иерархического сравнения дефектов позволяют предложить следующий ранговый ряд их влиятельной значимости на техническое состояние и состояние функционального соответствия, принимаемый как показатель синергетической свертки эффектов жизненного цикла дефектов в динамическом моделировании плоской рулонной кровли на эксплуатационной стадии жизненного цикла [15] (рис. 1).

Выводы. Поскольку основной причиной снижения срока эффективной эксплуатации плоских рулонных кровель является их высокая дефектоемкость, малоизученное агрессивное взаимное влияние дефектов, а также недостатки нормативных методов качественной оценки величины физического износа, эффективное управление жизненным циклом дефекта и плоской рулонной кровли как строительной системы с пози-

ций динамического прогнозирования и системно-технического анализа дефектов является перспективным направлением совершенствования технологий строительно-технической дефектоскопии, соответствующего актуальным требованиям к инструментам и механизмам управления жизненным циклом строительных систем [16].

Предложенные авторами рекомендации по совершенствованию экспертно-нормативного метода оценки физического износа плоских рулонных кровель на основе синергетической свертки эффектов жизненного цикла дефектов в динамическом моделировании позволит повысить достоверность, проверяемость и эффективность результатов экспертно-строительной деятельности. Использование дополненного в соответствии с рекомендациями авторов экспертно-нормативного метода оценки физического из-

носа плоских рулонных кровель позволит собственникам объектов недвижимости своевременно принять меры по устранению наиболее

опасных дефектов, сохранению эксплуатационных качеств кровли, продлить срок службы объекта недвижимости и снизить стоимость жизненного цикла объекта.

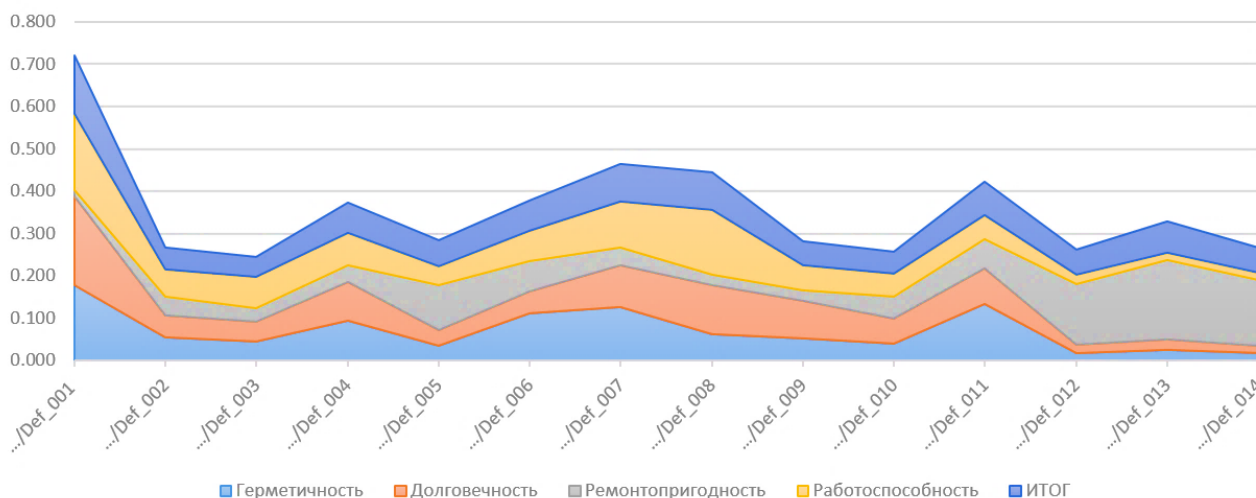


Рис. 1. Ранговый ряд влияющей значимости дефектов на техническое состояние и состояние функционального соответствия плоской рулонной кровли

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Темикеев К., Зулпуев А.М., Болотбек Т. Масылканова Б.А., Абдуллаев У.Д. Общие положения и определения жизненного цикла и ресурса конструктивной безопасности зданий и сооружений // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2022. № 7. С. 16–20. DOI: 10.26104/NNTIK.2022.55.40.004.
2. Жолобов А.Л. Современные технологические решения по ремонту многослойных кровель // Вестник гражданских инженеров. 2008. № 4(17). С. 55–62.
3. Жолобов А.Л., Жолобова Е.А. Систематизация методов увеличения срока службы строительных конструкций // Научное обозрение. 2014. № 10-3. С. 633–636.
4. Гнам П.А. Анализ методик технического обследования объектов с целью определения их физического износа // AlfaBuild. 2019. № 4(11). С. 7–22.
5. Лихачев А.А., Усольцева О.А. Обзор и сравнение современных отечественных и зарубежных методов оценки технического состояния зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона. 2022. № 10(94). С. 1–12.
6. Yudin D., Naumov A., Dolzhenko A., Patrakova E. Software for roof defects recognition on aerial photographs // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015(3). 032152.
7. Зельманович Я.И. Состояние рынка мягких кровельных и гидроизоляционных материалов в России в 2009- 2010 гг. // Строительные материалы. 2011. № 3. С. 63–67.
8. Сысоев А.К., Жолобова Е.А., Жолобов А.Л. О причинах преждевременного разрушения кровель из полимерных мембран // Инженерный вестник Дона. 2021. № 5(77). С. 81–87.
9. Ярцев В.П., Долженкова М.В. Прогнозирование долговечности кровельных битумно-полимерных композитов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2012. Т. 18, № 4. С. 1042–1050.
10. Евтушенко С.И., Крахмальний Т.А. Дефекты и повреждения конструкций кровли производственных зданий // Строительство и архитектура. 2022. Т. 10, № 1. С. 2–5. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-10-1-2-5.
11. Andenæs E., Engebø A., Kvande T., Bohn R.A., Lohne J. Flat Roofs Defects – Norwegian Building Sector Perspectives // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 290. DOI:10.1088/1755-1315/290/1/012069
12. Paramitha P., Stefanus K., Niken S. The study of building inspection reliability and life cycle cost analysis in Universitas Sebelas Maret Surakarta // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2482. 050009. DOI:10.1063/5.0132011.
13. Thomas S., Luis V., St, Cahyono. The Analytic Hierarchy Process. Springer Science+Business Media New York 2012. 345 p.
14. Valentino S., Luis V., Fabio F., Francesco F. The Analytic Hierarchy Process in the Building Sector // New Approaches for Multi-Criteria Analysis in Building Constructions. 2022. DOI:10.1007/978-3-030-83875-1_2.
15. Shilov L., Shilova L. Methodology of Coding Building Information Model Elements at the

Stages of the Life Cycle // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 231. Pp. 239–247. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7_25.

16. Grabovoy P.G., Volkov R.V., Volgin V.V. Intellectual Real Estate Management // Real estate: economics, management. 2023. Vol. 1. Pp. 6–20.

Информация об авторах:

Долженко Александр Валериевич, старший преподаватель кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: da7182@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Наумов Андрей Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: andrena@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Щенятский Олег Александрович, старший преподаватель кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: oleg.che1972@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 21.04.2023 г.

© Долженко А.В., Наумов А.Е., Щенятский О.А., 2023

***Dolzhenko A.V., Naumov A.E., Schenyatsky O.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: da7182@mail.ru*

FLAT ROLL ROOFS LIFE CYCLE MANAGEMENT IMPROVING WITH ADVANCED TECHNICAL STATE INSPECTION

Abstract. *The quality of life cycle management of flat rolled roofs depends on the effectiveness of the technology for assessing their physical deterioration, the value of which is significantly affected by the operating conditions of roofs and sources of impacts. Flat rolled roofs are the most common technical solutions in the real estate and are very defect-intensive building systems, the physical deterioration of which affects the structural safety and functional reliability not only of them, but of the entire building as a whole. Defects in flat rolled roofs, as well as defects in building structures in general, are in close organizational and technological relationship, in which the life cycle of an individual defect can be a synergistic multiplication or subtraction in defects life cycle parameters.*

The key flaw of modern methods for assessing physical deterioration are the initial and predominantly manual instrumental studies, in connection with which the methods are overly simplified, templated, subjective in natural assessment of life cycle resource intensity. In this regard, it seems promising targeted research related to the comprehensive improvement for construction and technical flaw detection methods, both in software improving that increases the reliability and quality of the factual result, and algorithms for predictive estimation of individual defects and building systems life cycles. That manages life cycle more effectively in the media of practical methods for dynamic defects analyzing and assessing the technical condition of structures in general.

The paper presents mainline in improving of method for assessing the physical deterioration of flat rolled roofs, quantitatively taking into account the combined impact of defects on building system technical condition at its life cycle, significant expanding the operational tools for building technical management.

Key words: *flat rolled roofs, physical deterioration, physical deterioration assessment, defect, defect ratio, hierarchy analysis process.*

REFERENCES

1. Temikeev K., Zulpuyev A.M., Bolotbek T., Masykanova B., Abdullaev U. General provisions and definitions of the life cycle and resource of constructive safety of buildings and structures. Science [Obshchie polozheniya i opredeleniya zhiznennogo cikla i resursa konstruktivnoj bezopasno-sti zdaniy i sooruzhenij]. New technologies and innovations of Kyrgyzstan. 2022. No. 7. Pp. 16–20. DOI: 10.26104/NNTIK.2022.55.40.004. (rus)

2. Zholobov A.L. Modern technological solutions for repair of multilayer roofs [Sovremennye tekhnologicheskie resheniya po remontu mnog-oslojnyh krovel']. Bulletin of Civil Engineers. 2008. № 4(17). Pp. 55–62 (rus).

3. Zholobov A.L., Zholobova E.A. Systematization of methods for increasing the service life of building structures [Sistematizaciya metodov uvelicheniya sroka sluzhby stroitel'nyh konstrukcij]. Scientific review. 2014. No. 10-3. Pp. 633–636.

4. Nam 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 fizi cheskogo iznosa]. AlfaBuild. 2019. No. 4(11). Pp. 7–22.
5. Likhachev A.A., Usoltseva O.A. Review and comparison of modern domestic and foreign methods for assessing the technical condition of buildings and structures [Obzor i sravnenie sovremennyh otechestvennyh i zarubezhnyh metodov ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy i sooruzhenij]. Engineering Bulletin of the Don. 2022. No. 10(94). Pp. 1–12.
6. Yudin D., Naumov A., Dolzhenko A., Patrakova E. Software for roof defects recognition on aerial photographs. Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015(3). 032152.
7. Zelmanovich Ya. I. The state of the market of soft roofing and waterproofing materials in Russia in 2009 – 2010 [Sostoyanie rynka myagkih krov el'nyh i gidroizolyacionnyh materialov v Rossii v 2009- 2010 gg.]. Building materials. 2011. No. 3. Pp. 63–67.
8. Sysoev A.K., Zholobova E.A., Zholobov A.L. On the causes of premature destruction of roofs made of polymer membranes [O prichinah prezhddevremennogo razrusheniya krov el' iz polimernykh membrane]. Engineering Bulletin of the Don. 2021. No. 5(77). Pp. 81–87.
9. Yartsev V.P., Dolzhenkova M.V. Forecasting the durability of roofing bitumen-polymer composites [Prognozirovanie dolgovechnosti krov el'nykh bitumno-polimernykh kompozitov]. Bulletin of the Tambov State Technical University. 2012. Vol. 18, No. 4. Pp. 1042–1050.
10. Yevtushenko S.I., Krakhmalny T.A. Defects and damages of roof structures of industrial buildings [Defekty i povrezhdeniya konstrukcij krovli proizvodstvennykh zdaniy]. Construction and architecture tour. 2022. Vol. 10, No. 1. Pp. 2–5. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-10-1-2-5.
11. Andenæs E., Engebø A., Kvande T., Bohne R.A., Lohne J. Flat Roofs Defects – Norwegian Building Sector Perspectives. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 290. DOI:10.1088/1755-1315/290/1/012069
12. Paramitha P., Stefanus K., Niken S. The study of building inspection reliability and life cycle cost analysis in Universitas Sebelas Maret Surakarta. AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2482. 050009. DOI:10.1063/5.0132011.
13. Thomas S., Luis V., St, Cahyono. The Analytic Hierarchy Process. Springer Science+Business Media New York 2012. 345 p.
14. Valentino S., Luis V., Fabio F., Francesco F. The Analytic Hierarchy Process in the Building Sector. New Approaches for Multi-Criteria Analysis in Building Constructions. 2022. DOI:10.1007/978-3-030-83875-1_2.
15. Shilov L., Shilova L. Methodology of Coding Building Information Model Elements at the Stages of the Life Cycle. Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 231. Pp. 239–247. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7_25.
16. Grabovy P.G., Volkov R.V., Volgin V.V. Intellectual Real Estate Management. Real estate: economics, management. 2023. Vol. 1. Pp. 6–20.

Information about the authors

Dolzhenko, Alexandr V. Senior lecturer. E-mail: da7182@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Naumov, Andrey E. PhD, Assistant professor. E-mail: andrena@mail.ru; naumov.ae@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Schenyatsky Oleg A. Senior lecturer. E-mail: oleg.che1972@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 21.04.2023

Для цитирования:

Долженко А.В., Наумов А.Е., Щенятский О.А. Повышение качества управления жизненным циклом плоских рулонных кровель совершенствованием инструментов оценки их физического износа // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 6. С. 48–54. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-48-54

For citation:

Dolzhenko A.V., Naumov A.E., Schenyatsky O.A. Flat roll roofs life cycle management improving with advanced technical state inspection. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 6. Pp. 48–54. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-48-54

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-55-64

***Тиратурян А.Н., Семененя-Дусенко К.И., Дунча П.П.**

Донской государственный технический университет

*E-mail: tiraturjan@list.ru

ДИССИПАЦИЯ ЭНЕРГИИ КАК КРИТЕРИЙ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТАДИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Аннотация. Проанализированы современные подходы к оценке эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильной дороги. Отмечена необходимость совершенствования критериев, характеризующих состояние автомобильной дороги на данном этапе, учитывающих как структурные свойства дорожной одежды, так и функциональные параметры, отражающие комфорт и безопасность пользователей. В качестве основного показателя состояния автомобильной дороги на эксплуатационной стадии жизненного цикла предложен показатель – суммарная диссипация энергии. Рассмотрена возможность использования показателя «суммарная диссипация энергии» – как интегрального критерия характеризующего эксплуатационную стадию жизненного цикла автомобильной дороги, учитывающего совокупное влияние транспортных нагрузок, структурного состояния дорожной одежды и влияние различных видов управляющих воздействий на изменение продолжительности ее срока службы и представлены результаты моделирования влияния управляющих воздействий в виде ремонта на изменение фактической кривой суммарной диссипации энергии, сформулированы перспективы развития данного показателя, как основного, для реализации методики «life-cycle assessment», предполагающей выделение из общей суммарной диссипации энергии – «опасной» энергии, затрачиваемой на разрушение дорожной одежды автомобильной дороги, а также доли энергии коррелирующей с топливными затратами пользователей, и акустическим загрязнением окружающей среды от транспортного потока. Определены направления развития соответствующих математических моделей для решения поставленных задач.

Ключевые слова: Транспортный поток, моделирование, диссипация энергии, расчетная нагрузка, жизненный цикл, состояние конструкции, многослойное полупространство

Введение. Автомобильные дороги являются важными инженерными и социально-экономическими объектами, призванными обеспечивать как безопасность и удобство пользователей, передвигающихся по ним, так и устойчивое развитие регионов их проложения. В современном понимании устойчивое развитие – это комплексный процесс, учитывающий, как технологические, так и социально-экономические и экологические факторы, направленные на удовлетворение потребностей человека. В этой связи традиционная парадигма исключительно-технических решений, принимаемых на разных этапах функционирования автомобильной дороги, должна быть дополнена понятием анализа жизненного цикла «life cycle assessment» на основе которой становится возможной оценка всех или части вышеуказанных факторов.

Жизненный цикл автомобильной дороги может включать в соответствии с [1] включает в себя этапы производства материалов, выбора и обоснования рационального типа дорожной одежды и покрытия, ее конструирования и расчета необходимого для обеспечения заданного межремонтного срока службы, строительства, эксплуатации и технического обслуживания (содержания), а также завершения срока службы на

котором может быть выполнен капитальный ремонт или реконструкция, либо осуществлен полный демонтаж.

После ввода завершенной строительством автомобильной дороги в эксплуатацию, особое значение принимает эксплуатационная стадия жизненного цикла. Неверные управленческие решения, принимаемые на этом этапе, могут привести к значительной сдвигке фактических межремонтных сроков службы автомобильной дороги и как следствие необходимости выполнения новых работ по строительству в виде внеочередного капитального ремонта.

Следует отметить, что основной причиной недоучета многих негативных факторов, возникающих в процессе эксплуатации автомобильной дороги, является отсутствие комплексного рассмотрения процессов взаимодействия транспортного потока с конструкцией дорожной одежды. Это отмечалось в ряде отечественных и зарубежных работ [2–5]. Обычно в практике диагностики и оценки состояния дорог рассматриваются только показатели продольной и поперечной ровности, а также наличие визуально определяемых дефектов на покрытии, причем даже измере-

ние фактического общего модуля упругости дорожной одежды автомобильной дороги становится чисто факультативным [6–7].



Рис. 1. Жизненный цикл автомобильной дороги

Более оправданным с позиций оценки эксплуатационной стадии жизненного цикла выглядит декомпозиция всех факторов

определяющих эксплуатационную стадию жизненного цикла непосредственно дорожной одежды в следующем виде [1]:

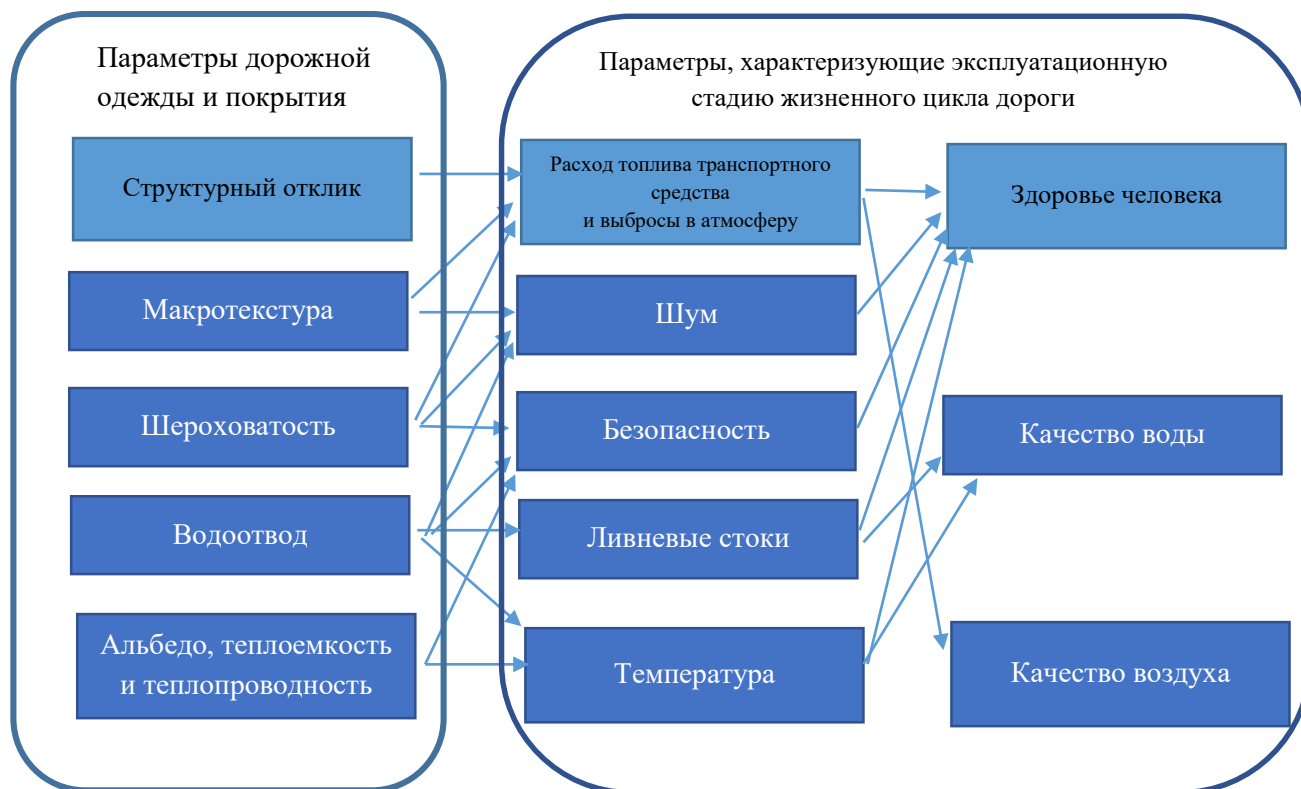


Рис. 2. Связь параметров дорожной одежды и покрытия дороги с параметрами жизненного цикла

Как видно из рисунка 2 в наибольшей степени структурный отклик дорожной одежды,

макротекстура покрытия, и шероховатость оказывают влияние на расход топлива транспортных

средств и выбросы в окружающую среду, а также шум и общую безопасность движения. Нужно отметить, что под структурным откликом здесь понимается напряженно-деформированное состояние, формируемое в дорожной конструкции при воздействии на нее динамической нагрузки. Для изучения ее влияние на расход топлива в зарубежной практике были проведены как экспериментальные, так и теоретические исследования. Экспериментальные исследования проводились в Калифорнии на 17 тестовых участках с заложенными в их конструкцию датчиками напряженно-деформированного состояния и связаны с работами [8–10]. В работах [11–14] рассматривалось численное моделирование динамического напряженно-деформированного состояния многослойной дорожной конструкции в вязкоупругой постановке, в том числе с учетом различных моделей распределения давления в шинах транспортных средств. В работах [15–18] для характеристик структурного отклика использовалась концепция внешней работы на деформирование среды, подтверждаемая результатами полевых испытаний установками динамического нагружения.

Нельзя также не отметить, что показатели температуры покрытия и воздуха, макротекстуры и шероховатости, также могут быть заданы при численном моделировании в виде эмпирически определяемых коэффициентов, и периодических законов изменения неровности на поверхности покрытия. Все это обосновывает возможность вывода единого интегрального показателя, на основе которого представляется возможным определение основных параметров жизненного цикла автомобильной дороги на эксплуатационной стадии.

Анализ литературы показывает, что большинство интегральных показателей, характеризующих состояние автомобильной дороги являются феноменологическими, базирующимися либо на различных оценках продольной ровности покрытия в единицах IRI, либо на визуальном ее состоянии – показатели PCI, PSI и проч., либо описывают комплексное влияние ровности и дефектов и характеризуют качество движения пользователя по дороге (показатели RCI – riding comfort index, Riding Comfort Rating (RCR)) [19–20]. Вместе с тем актуальным видится разработка нового показателя, связывающего эксплуатационное и структурное состояние автомобильной дороги с параметрами жизненного цикла на эксплуатационной стадии, а также с чисто пользовательскими показателями, характеризующими комфорт его передвижения. Общность данного критерия для разных задач позволяет предположить, что наиболее целесообразно определять

его исходя из фактической энергии транспортного средства, закачиваемой в дорожную конструкцию, так как энергия является в данном случае наиболее общей и физически понятной мерой характеризующей состояние объекта.

Методы. Суммарное воздействие транспортного потока на автомобильную дорогу может быть выражено в виде суммарной работы по ее деформированию A . Которая может быть записана в виде:

$$A = \int_0^t F(t)u(t)dt; \quad (1)$$

где $F(t)$ – импульс силы от прикладываемой нагрузки,

$u(t)$ – амплитудно-временная характеристика деформирования поверхности покрытия автомобильной дороги.

В соответствии с законом сохранения энергии, связывающем удельную работу с полной энергией деформирования W , можно записать:

$$\int_0^t F(t)u(t)dt = \int_0^t \sigma(t)\varepsilon(t)dt \quad (2)$$

где $\sigma(t)$ – импульс силы от прикладываемой нагрузки,

$\varepsilon(t)$ – амплитудно-временная характеристика деформирования поверхности покрытия автомобильной дороги.

Правая часть уравнения также описывает диссипацию энергии, происходящую в теле.

Диссипация энергии напрямую связана с топливными затратами пользователей автомобильных дорог, так является показателем интегрально объединяющем свойства как источника нагружения, так и среды, по которой он движение осуществляет. Очевидно, что топливные затраты пользователей могут быть функцией состояния и в значительной степени связаны как с параметрами источника нагружения, так и с состоянием поверхности, по которой осуществляется движение. Далее будем пренебрегать деформациями источника нагружения считая его бесконечно жестким телом. Тогда суммарная диссипация энергии деформирования может быть представлена в виде:

$$W = W_{стр} + W_{кач} \quad (3)$$

где $W_{стр}$ – диссипация энергии в структуре среды, по которой перемещается источник колебаний;

$W_{кач}$ – диссипация энергии связанная, исключительно с сопротивлением качению источника колебаний.

В свою очередь

$$W_{стр} = E_{упр} + E_{в.тр} + E_{разр} + E_t \quad (4)$$

$E_{упр}$ – энергия упругого деформирования;

$E_{в.тр}$ – энергия, рассеиваемая за счет вязкого трения в материале;

$E_{разр}$ – энергия, рассеиваемая из-за разрушений и дефектов во внутренней структуре материала;

E_t – энергия, рассеиваемая в виде тепла.

Аналогично диссипация энергии качения можно записать в виде:

$$W_{кач} = E_{неровн} + E_{текс} + E_{акуст} + E_t, \quad (5)$$

где $E_{неровн}$ – диссипация энергии связанная с макронеровностями;

$E_{текс}$ – диссипация энергии, связанная с впадинами микрошероховатости;

$E_{акуст}$ – энергия, рассеиваемая в акустических волн.

Таким образом определение диссипации энергии за срок службы автомобильной дороги может позволить осуществить прогноз и оценку топливных затрат пользователей исходя из состава и интенсивности транспортного потока.

Результаты и обсуждение. Энергия диссипации за цикл деформирования может быть рассчитана в соответствии с методами изложенными в [21] по математической модели динамического напряженно-деформированного состояния многослойного полупространства. В качестве примера ниже представлены результаты расчета компонент напряженно-деформированного состояния многослойной среды при воздействии на ее поверхность нагрузки величиной $F=57.5$ кН, равномерно распределенной по круговому отпечатку колеса $D=300$ мм, со скоростью 60 км/ч.

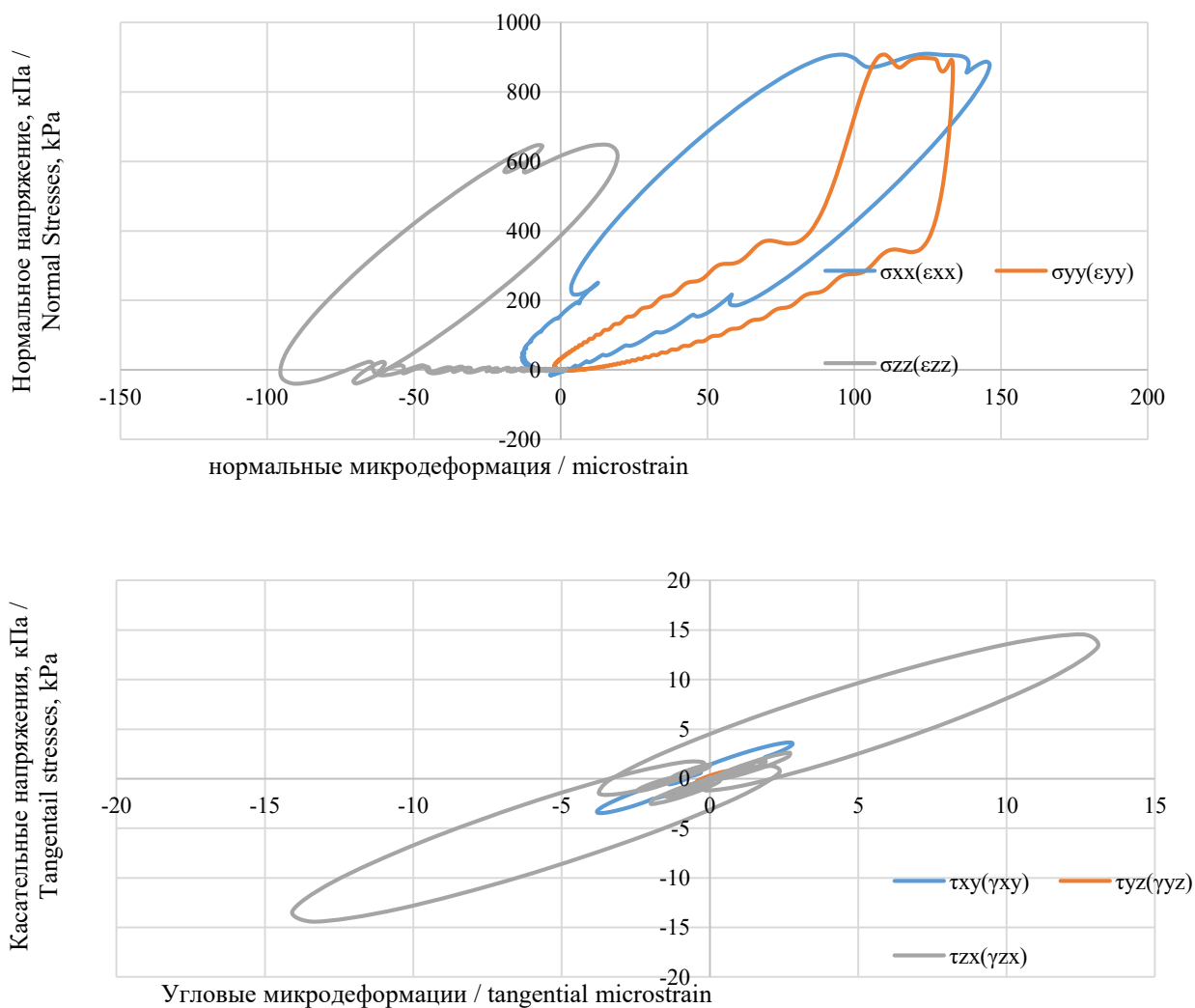


Рис. 3. Петли гистерезиса на поверхности дорожной одежды автомобильной дороги

Количественные значения величины удельной диссипации энергии представлены в таблице 1.

Таблица 1

Величина удельной диссипации энергии за единичный проезд расчетного автомобиля

Удельная диссипация энергии, Дж/м ³					
$\sigma_{xx}(\varepsilon_{xx})$	$\sigma_{yy}(\varepsilon_{yy})$	$\sigma_{zz}(\varepsilon_{zz})$	$\tau_{xy}(\gamma_{xy})$	$\tau_{yz}(\gamma_{yz})$	$\tau_{zx}(\gamma_{zx})$
60.998	34.1223	31.884	0.008	0.001	0.18

Учитывая, что известна удельная диссипация энергии за цикл деформирования возможно посчитать полную суммарную диссипацию энергии за весь срок службы как:

$$W^{\text{полн}} = W \sum_{i=1}^{T_{\text{сл}}} N_p, \quad (6)$$

где $W^{\text{полн}}$ – суммарная диссипация энергии деформирования за срок службы автомобильной дороги;

$\sum_{i=1}^{T_{\text{сл}}} N_p$ – суммарное количество приложений

расчетной нагрузки;

W – энергия деформирования за единичный цикл нагружения.

Ниже представлены примеры расчета энергии деформирования дорожных одежд на автомобильных дорогах на эксплуатационной стадии жизненного цикла построенные для ряда участков автомобильной дороги М4 «ДОН».

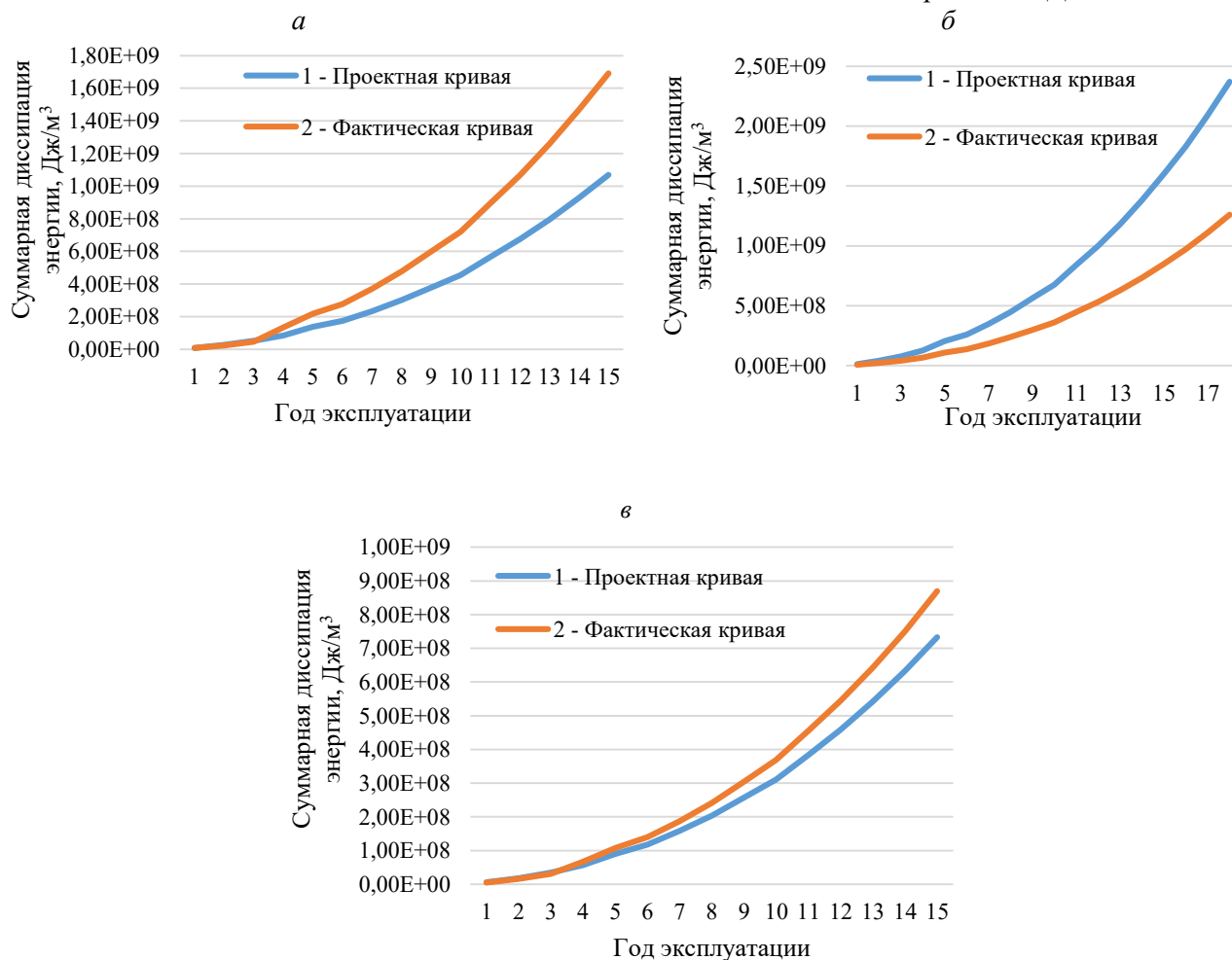


Рис. 4. Прогнозирование суммарной диссипации энергии деформирования на эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильной дороги

(а – участок М4 «ДОН» км 877+000 – 892+000, б – участок М4 «ДОН» км 492+000 – 517+000, в – участок М4 «ДОН» км 1373+000 – 1383+000)

Как видно фактическая кривая суммарной диссипации энергии на графиках а и б (рисунок

4) проходит выше, чем проектная кривая, рассчитанная исходя из проектных значений фактического суммарного числа приложений расчетных

нагрузок и проектных значений расчетных механических параметров слоев дорожной конструкции. Такое расположение кривых свидетельствует о возможном преждевременном исчерпании проектного ресурса на участках дорог км 877+000-892+000 и км 1373-1383. Обратная ситуация наблюдается на участке км 492+000 – 517 + 000, конфигурация кривых на нем позволяет предположить, что его срок службы будет обеспечен, даже без применения управляющих воздействий.

В качестве видов управляющих воздействий, принимаемых на эксплуатационной стадии жизненного цикла, могут быть выполнены работы по восстановлению изношенных верхних

слоев покрытий, относимые к содержанию, работы по замене слоев покрытий в рамках ремонта, а также выполнение капитального ремонта, при полном исчерпании ресурса. Моделирование влияния на изменение проектной кривой диссипации энергии каждого вида ремонтных работ возможно, только при наборе статистики, предполагающей мониторинг изменения прочности и продольной ровности после каждого вида ремонтных мероприятий. Однако теоретически влияние ремонтных работ может быть оценено для случая требуемых показателей, регламентируемых СТО АВТОДОР 10.2-2014 для дорог Государственной компании (таблица 2).

Таблица 2

Требования по продольной ровности покрытия в течении гарантийного периода ГК АВТОДОР

Категория дороги	Гарантийный период					Ремонт	Постгарантийный срок				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
I	1.4	1.6	1.9	2.2	2.6		1.4	1.6	1.9	2.2	2.6
II	1.7	1.9	2.2	2.5	2.9		1.7	1.9	2.2	2.5	2.9

Эти проектные значения продольной ровности покрытия в течение эксплуатационной стадии жизненного цикла дороги могут быть учтены как путем математического моделирования неровности покрытия с заданными параметрами, так и в соответствии с методикой учета продольной ровности в единицах IRI при расчете суммарного числа приложений расчетной нагрузки, разработанной А.С. Коноревым [22].

Рассмотрим результаты моделирования эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильной дороги на участке 877-892, если в качестве основного вида управляющих воздействий будет приниматься только ремонт, предполагающий восстановление продольной ровности покрытия для дороги I категории в идеальном случае до $IRI=1.4$ (рисунок 5).

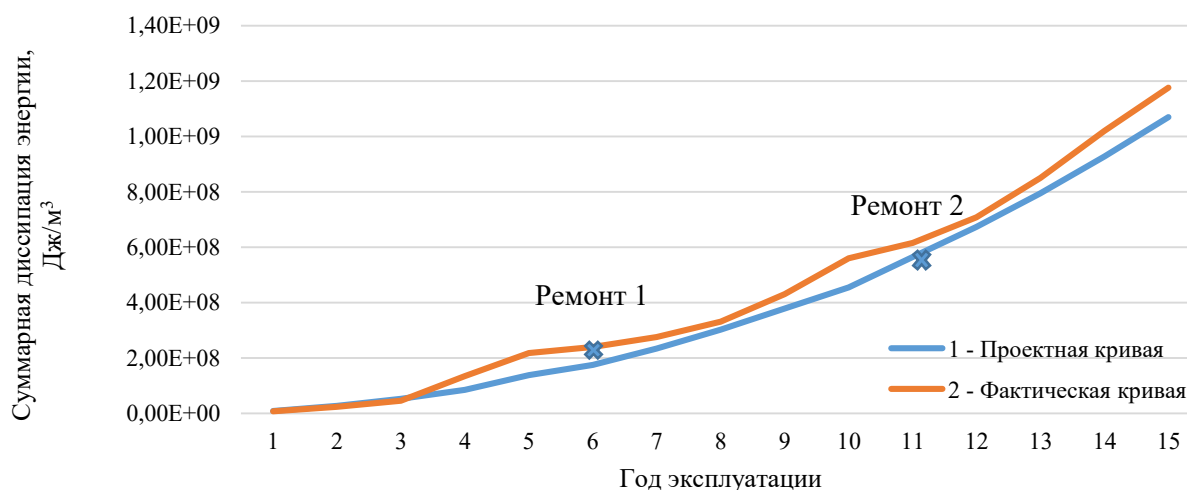


Рис. 5. Суммарная диссипация энергии с учетом выполнения работ по ремонту покрытия на 5-й и 10-й год эксплуатации на участке км 877+000 – 892+000

Таким образом, как видно на представленном рисунке ремонтные работы позволяют значительно сблизить фактическую и проектную кривую изменения суммарной диссипации энергии деформирования в течении эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильной дороги. А сам показатель суммарная диссипация энергии эффективно характеризует совокупное

влияние транспортных нагрузок, структурное состояние дорожной одежды и влияние различных видов управляющих воздействий на изменение продолжительности ее срока службы.

В заключении следует отметить, что из суммарной диссипации энергии деформирования, определяемой на эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильной дороги могут

быть выделены составляющие характеризующие как происходящие в дорожной одежде автомобильной дороги структурные процессы (такие как – развитие трещин, процессы разупрочнения и доуплотнения), так и топливные затраты, и величину акустического загрязнения, что следует из зависимостей (1-3). Несомненно, решение подобного класса задач потребует совершенствования существующих математических моделей и подходов. Так в части выделения «опасной» энергии деформирования необходимо совершенствование аналитических решений задачи определения динамического напряженно-деформированного состояния многослойной среды с учетом граничных условий, описывающих изменение напряжений и перемещений в области возникновения вертикально и горизонтально ориентированных трещин, и иных видов разрушений и пластических деформаций. С точки зрения адаптации предлагаемого подхода к решению задач прогнозирования топливных затрат и акустического загрязнения, необходимо совершенствование подходов к решению контактных задач взаимодействия между колесом транспортного средства с покрытием, с учетом микро- и макрошероховатости, а также проведение комплекса экспериментальных исследований направленных на установление зависимостей между жесткостными свойствами дорожной конструкции, которые могут быть зарегистрированы в полевых условиях и фактическим топливными затратами пользователей.

Выводы:

- Обоснована возможность использования показателя «суммарная диссипация энергии» - как интегрального критерия характеризующего эксплуатационную стадию жизненного цикла автомобильной дороги, учитывающего совокупное влияние транспортных нагрузок, структурного состояния дорожной одежды и влияние различных видов управляющих воздействий на изменение продолжительности ее срока службы.
- Впервые представлены результаты моделирования влияния управляющих воздействий в виде ремонта на изменение фактической кривой суммарной диссипации энергии, и обоснована возможность количественной оценки данного показателя на эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильной дороги;
- Сформулированы перспективы развития данного показателя, как основного, для реализации методики «life-cycle assessment», предполагающей выделение из общей суммарной диссипации энергии – «опасной» энергии, затрачиваемой на разрушение дорожной одежды автомобильной дороги, а также доли энергии, коррелирующей с топливными затратами пользователей,

и акустическим загрязнением окружающей среды от транспортного потока. Определены направления развития соответствующих математических моделей для решения поставленных задач.

Благодарности. Исследования проводятся в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (заявка МК-242.2022.4.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Harvey J., Meijer J., Ozer H., Al-Qadi I. L., Saboori A., Kendall A. Pavement life cycle assessment framework // United States. Federal Highway Administration. 2016. Vol. 1(42). 246 p.
2. Elshamy M.M.M, Tiraturyan A.N., Uglova E. V., Zakari M. Evaluation of Pavement Condition Deterioration Using Artificial Intelligence Models // Advanced Engineering Research. 2022. Vol. 22(3). Pp. 272–284. DOI:10.23947/2687-1653-2022-22-3-272-284
3. Elshamy M.M.M. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Zakari M. Development of the non-destructive monitoring methods of the pavement conditions via artificial neural networks // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020. Vol. 1614(1). 012099. DOI:10.1088/1742-6596/1614/1/012099
4. Sharma M., Kumar P., Suman S. K. A review of pavement condition rating models for flexible pavements // Int Res J Eng Technol. 2019. Vol. 6. Pp. 2218–2223.
5. Tiraturyan A.N. New approach to technical monitoring of the condition of flexible roadway pavements // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture & Civil Engineering. 2019. Vol. 43(3). DOI: 10.25987/VSTU.2019.54.2.011
6. Буртыль Ю.В., Капский Д.В. Моделирование взаимосвязи ровности и прочности нежестких дорожных одежд на основании теоретическо-практических исследований // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2022. Vol. 19 №4(86). С. 570–583. DOI:10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583
7. Жустарева Е.В., Орлова А.И. Совершенствование методики комплексной оценки транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог с учетом современных средств измерения продольной ровности // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2020. №. 4 (26). С. 9–16.
8. Coleri E., Harvey J.T., Zaabar I., Louhghalam A., Chatti, K. Model development, field section characterization, and model comparison for excess vehicle fuel use attributed to pavement structural response // Transportation Research Record. 2016. Vol. 2589 (1). С. 40–50.

9. Harvey J., Lea J. D., Kim C. Preliminary Results of Simulation of Annual Excess Fuel Consumption from Pavement Structural Response for California Test Sections. Submitted for presentation and publication at the 95th TRB Annual Meeting, Paper reference. 2016. No. 16–6932.
10. Harvey J., Kendall A., Lee I. S., Santero N., Van Dam T., Wang T. 2010. Pavement Life Cycle Assessment Workshop: Discussion Summary and Guidelines. UCPRC-TM-2010-03. University of California, Davis, CA. 64 p.
11. Shakiba M. Ozer, H., Ziyadi, M., & Al-Qadi, I. L. Mechanics based model for predicting structure-induced rolling resistance (SRR) of the tire-pavement system // Mechanics of Time-Dependent Materials. 2016. T. 20. C. 579–600. DOI:10.1007/s11043-016-9313-0
12. Liu X., Al-Qadi I. Integrated vehicle–tire–pavement approach for determining pavement structure-induced rolling resistance under dynamic loading // Transportation Research Record. 2022. Vol. 2676(5). Pp. 398–409. DOI:10.1177/03611981211067797
13. Zhou Q., Al-Qadi I. L. Economic and Environmental Impacts of Platoon Trucks on Pavements // Transportation Research Record. 2022. Vol. 2676 (10). Pp. 460–473. DOI:10.1177/0361198122109024
14. Said I., Imad L. Al-Qadi, Hasan Ozer and Adrian Ricardo Archilla. Impact of dynamic loading on confined asphalt Concrete surface // Transportation Research Record. 2022. Vol. 2676(7). Pp. 249–263. DOI:10.1177/03611981221077998
15. Estaji M., Coleri E., Harvey J.T., Butt A.A. Predicting excess vehicle fuel use due to pavement structural response using field test results and finite element modelling // International Journal of Pavement Engineering. 2021. Vol. 22(8). Pp. 973–983. DOI:10.1080/10298436.2019.1655563
16. Liu X., Al-Qadi I. L. Development of a simulated three-dimensional truck model to predict excess fuel consumption resulting from pavement roughness // Transportation Research Record. 2021. Vol. 2675(9). Pp. 1444–1456. DOI:10.1177/03611981211007849
17. Ziyadi M. Ozer H., Shakiba M., Al-Qadi I.L. Vehicle excess fuel consumption due to pavement deflection. // Road Materials and Pavement Design. 2022. Vol. 24(3). Pp. 1–22. DOI:10.1080/14680629.2022.2027264
18. Ahmed F. Thompson J., Kim D., Carroll E., Huynh N. Cost-effectiveness of performing field investigation for pavement rehabilitation design of non-interstate routes // International Journal of Transportation Science and Technology. 2021. Vol. 10(3). Pp. 299–311. DOI:10.1016/j.ijtst.2020.06.001
19. Углова Е.В., Саенко С.С. Обзор инструментов управления состоянием дорожных конструкций // Транспортные сооружения. 2016. Т. 3. №. 1. С. 6–18. DOI:10.15862/02TS116
20. Uglova E.V., Saenko S.S. Review of longitudinal pavement roughness prediction tools // Транспортные сооружения. 2016. Т. 3, №. 4. С. 5–15. DOI:10.15862/05angTS416
21. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Nikolenko D.A., Nikolenko M.A. Model for determining the elastic moduli of road pavement layers. // Magazine of Civil Engineering. 2021. 103(3). No. 10308. DOI: 10.34910/MCE.103.8
22. Конорев А.С. Определение величины динамического воздействия транспортных средств на дорожную конструкцию для расчета значений коэффициентов приведения // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2011. №. 4. С. 118–127.

Информация об авторах:

Тиратурян Артём Николаевич, доктор технических наук, доцент кафедры автомобильные дороги. E-mail: tiraturjan@list.ru. Донской государственный технический университет. Россия, Ростовская область, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344002

Семененя-Дусенко Кирилл Иванович, аспирант кафедры автомобильные дороги. E-mail: kirilov-olezhka@mail.ru. Донской государственный технический университет. Россия, Ростовская область, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344002

Дунча Патрик Пангон Гислаин, аспирант кафедры автомобильные дороги. E-mail: pdeuntcha@yahoo.com. Донской государственный технический университет. Россия, Ростовская область, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344002

Поступила 10.02.2023 г.

© Тиратурян А.Н., Семененя-Дусенко К.И., Дунча П.П., 2023

***Tiraturyan A.N., Semeneny-Dusenko K.I., Duncha P.P.**

Don State Technical University, Rostov Region

**E-mail: tiraturjan@list.ru*

ENERGY DISSIPATION AS A CRITERION FOR ANALYZING THE CONDITION OF A HIGHWAY AT THE OPERATIONAL STAGE OF ITS LIFE CYCLE

Abstract. Modern approaches to the assessment of the operational stage of the life cycle of the highway are analyzed. The necessity of improving the criteria characterizing the condition of the highway at this stage, taking into account both the structural properties of the pavement and functional parameters reflecting the comfort and safety of users, is noted. As the main indicator of the condition of the highway at the operational stage of the life cycle, an indicator is proposed – the total energy dissipation. The possibility of using the indicator "total energy dissipation" is considered – as an integral criterion characterizing the operational stage of the life cycle of a highway, taking into account the cumulative effect of transport loads, the structural condition of the pavement and the influence of various types of control actions on the change in the duration of its service life, and the results of modeling the influence of control actions in the form of repairs on the change in the actual curve of total energy dissipation are presented, the prospects for the development of this indicator as the main one, to implement the "life-cycle assessment" methodology, assuming the allocation of the total energy dissipation – "dangerous" energy spent on the destruction of the pavement of the highway, as well as the share of energy correlated with the fuel costs of users, and acoustic pollution of the environment from the traffic flow. The directions of development of the corresponding mathematical models for solving the tasks are determined.

Keywords: Traffic flow, modeling, energy dissipation, design load, life cycle, design condition, multilayer half-space.

REFERENCES

1. Harvey J., Meijer J., Ozer H., Al-Qadi I. L., Saboori A., Kendall A. Pavement life cycle assessment framework. United States. Federal Highway Administration. 2016/ Vol. 1(42). 246 p.
2. Elshamy M.M.M. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Zakari M. Evaluation of Pavement Condition Deterioration Using Artificial Intelligence Models Advanced Engineering Research. 2022. Vol. 22 (3). Pp. 272–284. DOI:10.23947/2687-1653-2022-22-3-272-284
3. Elshamy M.M.M, Tiraturyan A. N., Uglova E. V., Zakari M. Development of the non-destructive monitoring methods of the pavement conditions via artificial neural networks. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2020. Vol. 1614. (1). 012099. DOI:10.1088/1742-6596/1614/1/012099
4. Sharma M., Kumar P., Suman S. K. A review of pavement condition rating models for flexible pavements. Int Res J Eng Technol. 2019. Vol. 6. Pp. 2218–2223.
5. Tiraturyan A.N. New approach to technical monitoring of the condition of flexible roadway pavements. Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture & Civil Engineering. 2019. Vol. 43(3). Pp. 81–94. DOI: 10.25987/VSTU.2019.54.2.011 (rus)
6. Burtul Yu.V., Kapsky D.V. Modeling the relationship between evenness and strength of non-rigid pavements based on theoretical and practical research [Modelirovanie vzaimosvyazi rovnosti i prochnosti nezhestkih dorozhnyh odezhd na osnovanii teoreticheskko-prakticheskikh issledovaniy]. Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii. 2022. Vol. 19. No. 4 (86). Pp. 570–583. DOI:10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583 (rus)
7. Zhustareva E.V., Orlova A.I. Improving the methodology for a comprehensive assessment of the transport and operational condition of highways, taking into account modern means of measuring longitudinal evenness [Sovershenstvovanie metodiki kompleksnoj ocenki transportno-ekspluatacionnogo sostoyaniya avtomobil'nyh dorog s uchetom sovremennyh sredstv izmereniya prodol'noj rovnosti]. Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura. 2020. Vol. 4(26). Pp. 9–16. (rus)
8. Coleri E., Harvey J.T., Zaabar I., Louhghalam A., Chatti K. Model development, field section characterization, and model comparison for excess vehicle fuel use attributed to pavement structural response. Transportation Research Record. 2016. Vol. 2589. No. 1. Pp. 40–50.
9. Harvey J., Lea J. D., Kim C. Preliminary Results of Simulation of Annual Excess Fuel Consumption from Pavement Structural Response for California Test Sections. Submitted for presentation and publication at the 95th TRB Annual Meeting, Paper reference. 2016. No. 16–6932.
10. Harvey J., Kendall A., Lee I.S., Santero N., Van Dam T., Wang T. Pavement Life Cycle Assessment Workshop: Discussion Summary and Guidelines. UCPRC-TM-2010-03. University of California, Davis, CA. 2010. 64 p.

11. Shakiba M., Ozer H., Ziyadi M., Al-Qadi I.L. Mechanics based model for predicting structure-induced rolling resistance (SRR) of the tire-pavement system. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2016. Vol. 20. Pp. 579–600. DOI:10.1007/s11043-016-9313-0
12. Liu X., Al-Qadi I. Integrated vehicle–tire–pavement approach for determining pavement structure-induced rolling resistance under dynamic loading *Transportation Research Record*. 2022. Vol. 2676 (5). Pp. 398–409. DOI:10.1177/03611981211067797
13. Zhou Q., Al-Qadi I. L. Economic and Environmental Impacts of Platoon Trucks on Pavements. *Transportation Research Record*. 2022. Vol. 2676. No. 10. Pp. 460–473. DOI:10.1177/0361198122109024
14. Said I., Al-Qadi I. L., H. Ozer, Archilla A.R. Impact of dynamic loading on confined asphalt Concrete surface. *Transportation Research Record*. 2022. Vol. 2676 (7). Pp. 249–263. DOI:10.1177/03611981221077998
15. Estaji M., Coleri E., Harvey J.T., Butt A.A. Predicting excess vehicle fuel use due to pavement structural response using field test results and finite element modeling. *International Journal of Pavement Engineering*. 2021. Vol. 22 (8). Pp. 973–983. DOI:10.1080/10298436.2019.1655563
16. Liu X., Al-Qadi I.L. Development of a simulated three-dimensional truck model to predict excess fuel consumption resulting from pavement roughness. *Transportation Research Record*. 2021. Vol. 2675. No. 9. Pp. 1444–1456. DOI:10.1177/03611981211007849
17. Ziyadi M., Ozer H., Shakiba M., Al-Qadi I.L. Vehicle excess fuel consumption due to pavement deflection. *Road Materials and Pavement Design*. 2022. Vol. 24. (3). Pp. 1–22. DOI:10.1080/14680629.2022.2027264
18. Ahmed F., Thompson J., Kim D., Carroll E., Huynh N. Cost-effectiveness of performing field investigation for pavement rehabilitation design of non-interstate routes. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2021. Vol. 10. (3). Pp. 299–311. DOI:10.1016/j.ijtst.2020.06.001
19. Uglova E.V., Saenko S.S. Overview of road structure health management tools [Obzor instrumentov upravleniya sostoyaniem dorozhnykh konstrukcij]. *Transportnye sooruzheniya*. 2016. Vol. 3(1). Pp. 6–18. DOI:10.15862/02TS116 (rus)
20. Uglova E.V., Saenko S.S. Review of longitudinal pavement roughness prediction tools *Transport facilities*. 2016. Vol. 3 (4). Pp. 5–15. DOI:10.15862/05angTS416
21. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Nikolenko D.A., Nikolenko M.A. Model for determining the elastic moduli of road pavement layers. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. 103(3). 10308. DOI: 10.34910/MCE.103.8
22. Konorev A.S. Determination of the magnitude of the dynamic impact of vehicles on the road structure to calculate the values of the reduction coefficients [Opredelenie velichiny dinamicheskogo vozdejstviya transportnykh sredstv na dorozhnuyu konstrukciyu dlya rascheta znachenij koeffitsientov privedeniya]. *Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*. 2011. No. 4. Pp. 118–127. (rus)

Information about the authors

Tiraturyan, Artem N. Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Highways. E-mail: tiraturjan@list.ru . Don State Technical University. Russia, Rostov region, Rostov-on-Don, Gagarin Square 1, 344002

Semenya-Dusenko, Kirill I. Postgraduate student of the Department of highways. E-mail: kirilov-olezhka@mail.ru . Don State Technical University. Russia, Rostov region, Rostov-on-Don, Gagarin Square 1, 344002

Deuntcha, Pangop Patrick G. Postgraduate student of the Department of highways. E-mail: pdeuntcha@yahoo.com. Don State Technical University. Russia, Rostov region, Rostov-on-Don, Gagarin Square 1, 344002.

Received 10.02.2023

Для цитирования:

Тиратурян А.Н., Семененя-Дусенко К.И., Дунча П.П. Диссипация энергии как критерий анализа состояния автомобильной дороги на эксплуатационной стадии жизненного цикла // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 6. С. 55–64. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-55-64

For citation:

Tiraturyan A.N., Semenya-Dusenko K.I., Duncha P.P. Energy dissipation as a criterion for analyzing the condition of a highway at the operational stage of its life cycle. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023. No. 6. Pp. 55–64. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-55-64

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-65-75

Качемцева Л.В., *Арслан М.И.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: maryam.rizaeva@bk.ru

**ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ «СОЦГОРОДА» В АРХИТЕКТУРНОЙ
И ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРАКТИКЕ НА ТЕРРИТОРИИ
БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ В 1930-Х ГГ.
(НА ПРИМЕРЕ МИКРОРАЙОНА СОЦГОРОДОК Г. ВАЛУЙКИ)**

Аннотация. Традиционно концепция «соцгорода» иллюстрируется примерами крупнейших градостроительных образований. В данной работе рассматривается малый населенный пункт – г. Валуйки Белгородской области, что редко делается в рамках заявленной проблематики. В статье прослеживается формирование концепции «соцгорода» и ее трансформация в середине 1930-х гг., в связи с изменением градостроительной и архитектурной парадигмы в Советском Союзе в этот период. Данное исследование направлено на выявление градостроительных и архитектурных особенностей реализации концепции «соцгорода» на территории малого населенного пункта. Авторами исследования применен комплексный подход. Определены географические и топографические особенности месторасположения населенного пункта. Изучены условия и история возникновения, основные этапы формирования рабочего поселка в довоенный период. Выявлен социальный состав жителей. Проанализированы градостроительно-планировочные особенности, специфика функционального решения поселения, сложившиеся в 1930-е гг. Графически восстановлены планировочная, транспортная структуры и функциональное наполнение Соцгородка на момент возникновения рабочего поселка и в довоенный период. Определены основные типы жилых домов селитебной территории Соцгородка, их архитектурные особенности и стилистическая принадлежность отдельных общественных зданий. Обозначен потенциал исследуемой градостроительной структуры и возможные перспективы развития данной территории, как части города Валуйки.

Ключевые слова: соцгород, концепция, планировочная структура, функциональное зонирование, типы жилых домов, архитектурные особенности.

Введение. Феномен «соцгорода» – образцового советского урбанизированного пространства периода индустриализации страны, в последнее время вызывает неподдельный интерес общественности, отечественных и зарубежных исследователей. В России и других постсоветских странах на сегодняшний день соцгорода в своем большинстве стали частью более крупных населенных пунктов, часто в качестве спальных районов. Краеведы часто включают уникальную застройку советского периода в список достопримечательностей своей малой Родины. Несколько городов России подавали заявки на включения соцгородов в список всемирного наследия ЮНЕСКО.

На современном этапе профессиональное сообщество формирует отношение к архитектурному и градостроительному наследию советского периода, что требует его научного изучения и осмысления. Учитывая исторические особенности становления территории Белгородской области, профессиональное изучение довоенных архитектурных объектов и градостроительных комплексов (которых сохранилось не много) особенно актуально. На территории Белгородской области примером реализации градостроительных концепций 1930-х гг. является бывший поселок Соцгородок, ныне микрорайон города Валуйки.

Цель работы – выявление архитектурных и градостроительных особенностей реализации концепции «соцгорода», как жилого поселка при градообразующем предприятии, в 1930-х гг. на территории нынешней Белгородской области, на примере микрорайона Соцгородок города Валуйки.

Материалы и методы. Авторами исследования применялся комплексный подход. В ходе работы проанализирован и систематизирован значительный объем историко-теоретических и краеведческих публикаций, периодики, архивных, проектных, иллюстративных и фотоматериалов. Были использованы методы градостроительного, ретроспективного анализа, проделана графоаналитическая работа, выполнена фотофиксация архитектурных объектов.

В советский период появлялись отдельные исследования, посвященные концепции «соцгорода» и ее реализации в градостроительной практике. Примером подобной работы может служить кандидатская диссертация В.Э. Алешина, в которой рассматривается развитие представлений о социалистическом поселении и их реализация в градостроительстве Украины в 1920-х — начале 1930-х гг. [1].

С.О. Хан-Магомедов в своем монументальном исследовании «Архитектура советского авангарда» [2, 3] в двух книгах, опубликованных

в 1996 и 2001 гг., дает объемное и всестороннее представление об особенностях архитектурного процесса, архитектурной профессиональной деятельности и зодчестве 1920-х–1930-х гг. в нашей стране. Касается он и градостроительных поисков и практики этого периода, рассматривает наиболее популярные градостроительные концепции и среди них упоминает и идею «соцгорода».

В работах М.Г. Мееровича [4,5], Е.В. Конышевой [5], Д.С. Хмельницкого [5, 6], Ю.Л. Косенковой [7] особое внимание уделялось градостроительной политике, градостроительному мышлению, доминировавшему в Советском Союзе в 1920-е – 1930-е гг.

Немецкий исследователь Л. Эррен, занимавшийся исследованием городских образований на Урале, созданных в период первых пятилеток, в своей публикации констатировал несовпадение содержания идеи «соцгорода» и реалий ее воплощения [8].

В последние годы различные аспекты темы «соцгорода» на материалах отдельных регионов рассматривались в публикациях: Н.В. Антоненко [9], К.Д. Бугрова [10, 11], А.П. Буряка [9], Е.И. Геллы [12], Е.В. Диденко [9], Л.В. Качемцевой [12], Е.Т. Черкасовой [13] и др. В России и за границей издаются монографии, и сборники статей, посвященные этой тематике [14–18].

В статье М.И. Ризаевой, Е.И. Ладик, М.В. Перьковой, О.В. Бик [19] проведен градостроительный анализ современного состояния исторической застройки г. Валуйки и выявлены основные градостроительные конфликты различных иерархических уровней. В монографии М.В. Перьковой и К.М. Трубенцовой [20] достаточно подробно исследована история возникновения города Валуйки и его развитие до Октябрьской революции. Однако последующие этапы становления градостроительной структуры Валоек малоизучены.

Основная часть. После Октябрьской революции изменившиеся политические, экономические, социальные и идеологические основания жизни государства, актуализировали необходимость строительства новых социалистических городов в Советском Союзе. Конкретные задачи индустриализации страны второй половины 1920-х – 1930-х гг. остро поставили перед архитекторами и градостроителями вопрос рационального размещения производственных сил, создания новой системы расселения.

В годы первой пятилетки (1928–1932 гг.) направления теоретических и творческих поисков архитекторов главным образом определяли градостроительные проблемы. Предметом об-

суждения становились теоретические концепции, планировочные схемы, проекты новых городов (Магнитогорск, Автострой, Чарджоу, Кузнецк, Коминтерновск, Зеленый город и др.).

В дискуссии рождались новые градостроительные идеи. Архитекторы-урбанисты (например – Л.М. Сабсович) представляли социалистические города как гигантские производственно-жилищные комбинаты при предприятиях [21, 22]. Дезурбанисты, в частности, М.А. Охитович и М.Я. Гинзбург, предлагали заменять города поселениями-лентами, состоящими из индивидуальных жилых элементов, расположенных вдоль автострад. Идея, связанная с теоретическим кредо Н.А. Ладовского [23], была положена в основу концепции АРУ и направлена на поиски такой схемы планирования города, которая позволяла бы усложнять его планировочную структуру в процессе его развития, не нарушая в то же время взаимоотношения основных функциональных зон.

Н.А. Милютин в книге «Соцгород. Проблема строительства социалистических городов» [24], вышедшей в 1930 г., сделал попытку соединить идею рациональной планировки городских зон с идеей развития, роста города во времени. В линейном городе промышленность должна была развиваться вдоль железных дорог, по другую сторону от промышленной зоны проектировалась автострада, обслуживающая районы жилой застройки. Параллельно всей этой системе располагались научные и административные учреждения, школы и объекты обслуживания.

Милютин, будучи председателем правительственной комиссии по строительству социалистических городов, принимал активное участие в профессиональной дискуссии 1929–1930 гг. В центре полемики, которая развернулась на страницах периодики и профессиональных изданий, были вопросы социалистического расселения, строительства новых промышленных центров, отношения к существующим крупным городам, уничтожения противоположности между городом и деревней, перестройка быта. В книге «Соцгород», которая возможно планировалась в качестве завершения этой дискуссии, все эти вопросы затронуты. Каждый новый населенный пункт, по мнению автора, должен был рассматриваться, как единое целое, в котором наиболее рационально и целесообразно располагались и увязывались между собой его основные части: промышленное и сельскохозяйственное производство, транспорт, энергетика, управление, быт, воспитание, учеба. Уже существующие населенные пункты, предполагалось расширять путем

создания поселков-спутников или путем перепланировки этих пунктов, или, в крайнем случае, (для крупных городов) их отдельных частей.

Для сторонников концепции «соцгорода» в основе социалистического расселения лежало создание компактных поселений при крупных промышленных предприятиях и совхозах (с населением в пределах 40-100 тысяч человек). Изначально соцгород рассматривался как градостроительное образование, состоящее из типовых структурных элементов – жилых комбинатов (жилкомбинатов), рассчитанных на 2-4 тысячи человек, как поселение с обобществленным бытом и коллективными формами жилья. Существовали проектные предложения, в которых жилую зону трактовали как дом-коммуну, выросшую до размера квартала, и как городской квартал, жилые и общественные здания которого соединены между собой переходами.

Первоначальная идея «соцгорода» в полной мере так и не была реализована. Власти перестали поддерживать леворадикальные идеи по

обобществлению быта уже в первой половине 1930-х гг. На смену социально-типологическим поискам архитектуры авангарда пришли парадные композиции «города-ансамбля». Таким образом, концепция «соцгорода» со временем трансформировалась. Смена градостроительной парадигмы и архитектурных стилей наложила свой отпечаток на строящиеся в этот период соцгорода.

Микрорайон Соцгородок города Валуйки, изначально был самостоятельным населенным пунктом. Город Валуйки находится на юге европейской части России, в 152 км к юго-востоку от Белгорода. Центральная, историческая часть города расположена на высоком правом берегу реки Валуй, в 3 км от ее впадения в реку Оскол. Нынешний микрорайон Соцгородок расположен к югу от исторической части Валоек, на низкой некогда заболоченной местности (рис. 1).

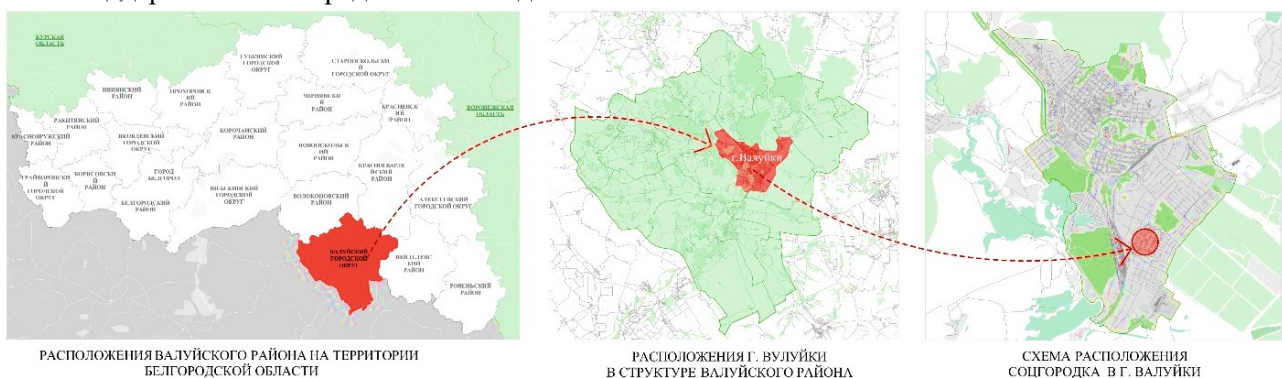


Рис. 1. Место нахождение поселка Соцгородок. Схема авторов

Соцгородок возник в 1932 г. в Валуйском районе на тот момент Курской области как посёлок работников железнодорожного транспорта при сортировочной станции, паровозном и вагонном депо, обслуживавших строящуюся тогда магистраль Москва – Донбасс. В 1940 г. Соцгородок получил статус посёлка городского типа. В 1954 г., после образования Белгородской области был включен в ее состав. В 1966 г. Соцгородок вошел в черту города Валуйки, и в настоящее время является одним из микрорайонов города.

Железная дорога Харьков – Балашов прошла через Валуйки еще в 1895 г. В годы первой пятилетке начались ее реконструкция с полной модернизацией, строительство новых путей магистрали Москва – Донбасс, сооружение новой линии железной дороги Валуйки – Старобельск-Кондрашевка – Несветай, реконструкция и расширение железнодорожного узла в городе. В апреле 1932 г. была принято постановление Правительства о начале этой ударной стройки, а во второй половине 1932 г. уже велись интенсивные

строительные работы. Вблизи сортировочной станции появились бараки для строителей. В соответствии с проектом развития железнодорожного узла в Валуйках создавалась большая сортировочная станция с двумя приемоотправочными парками, локомотивным депо на 30 паровозных стоил с собственным приписным парком на 100 паровозов, вагоноремонтные и паровозоремонтные мастерские, угольный и материальный склады протяженностью 2 км.

Железнодорожная магистраль Москва – Донбасс была завершена в 1936 г., а вторая новая линия – в 1937-м. К этому времени железнодорожный узел в Валуйках расширился и стал включать: локомотивное и вагонное депо (1935 г.), крупную сортировочную станцию, пункты технического осмотра поездов, бригадный дом, тепловую электростанцию на 1000 киловатт, службы связи.

В связи с намечавшимся увеличением числа работников на железнодорожном узле до пяти тысяч человек в 1932 г. началось строительство

рабочего поселка, который впоследствии был назван Соцгородок. В год основания поселка были построены пилорама и столярная мастерская, они располагались за пределами будущей селитебной территории, на месте нынешнего мини-рынка и ООО «Инесса» (рис. 2). Позже появились пожарная часть, военизированная охрана, магазины ОРСа (отдела рабочего снабжения), почта, хлебопекарня, столовые, бани, овощехранилища и др. Многие из этих объектов располагались на улице Центральной или в непосредственной близости от нее. Улица Центральная (позже улица 1 Мая, ныне улица Курячего) была ориентирована с юго-востока на северо-запад, и начиналась от железнодорожного полотна

на ст. Сортировочной (рис.3). Пожарная часть и военизированная охрана размещались в здании по адресу ул. Центральная, 5. Два магазина, продовольственный и промтоварный, оба располагались на улице Центральной, один – напротив клуба, другой – напротив пожарной части. Здания эти сохранились до сих пор и используются по тому же назначению. Хлебопекарня находилась на том месте, где впоследствии возвели цеха хлебозавода ОРСа (сейчас ул. Совхозная, 154). Техшкола, где обучали железнодорожных служащих: кондукторов, проводников и др., в 1930-е гг. находилась в здании по улице Дзержинского под № 2 (рис. 2).

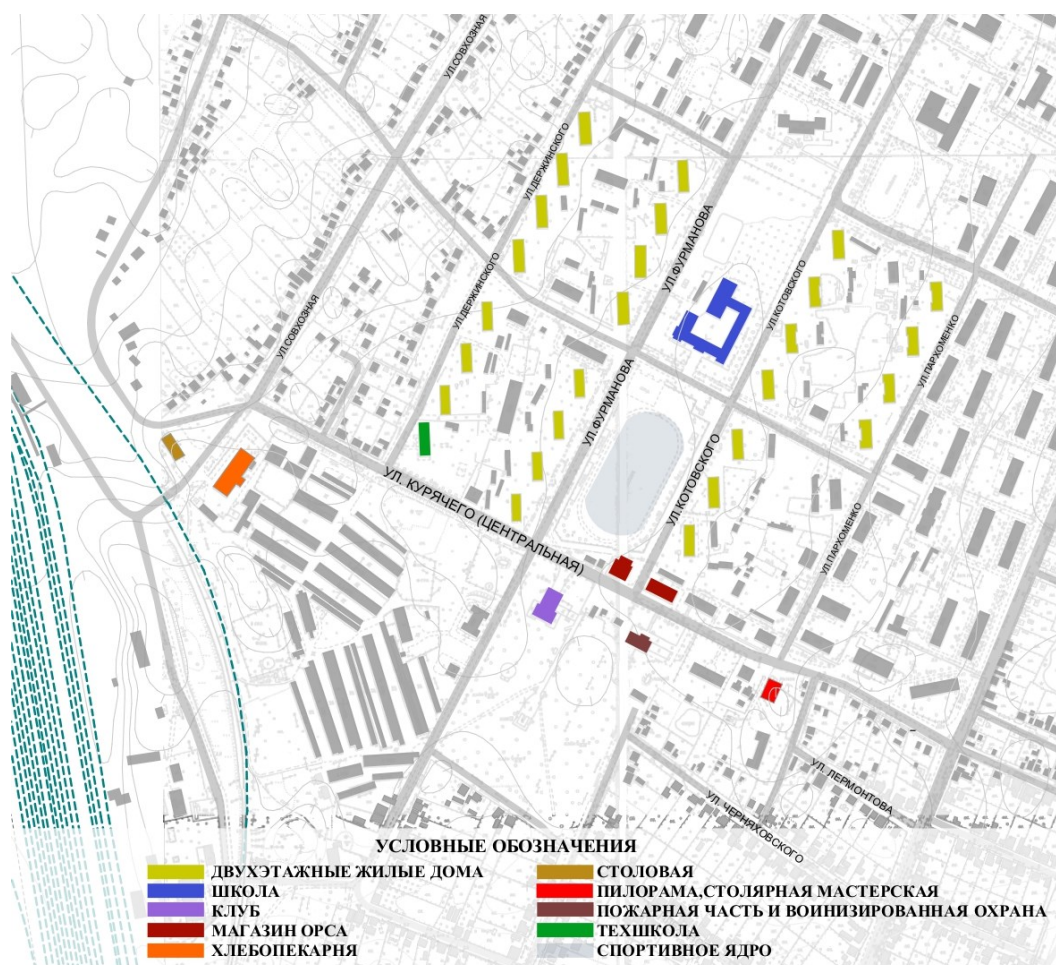


Рис. 2. Функциональное наполнение зданий и сооружений Соцгородка в довоенный период. Схема авторов

Перпендикулярные к улице Центральной и параллельные друг другу улицы Дзержинского, Фурманова, Котовского, Пархоменко (ориентированные с юго-запада на северо-восток) определили основной планировочный каркас жилой зоны поселка, получившей на тот момент почти квадратные очертания. Контуры этого квадрата задавались улицами Пархоменко, Центральной, Дзержинского и переулком Безымянным. При этом, планировочная структура не была замкнутой. Переулок 5-й Новоездочский, деливший этот

квадрат почти пополам, начинался от улицы Пархоменко, пересекал улицы Котовского, Фурманова и Дзержинского и продолжался на северо-запад от поселка вплоть до железной дороги. Улица Фурманова, пересекала улицу Центральную и доходила до складской и производственной зон, которые, находились между поселком и путями железной дороги. На северо-востоке планировочная структура поселка была открыта для дальнейшего роста (рис. 3).

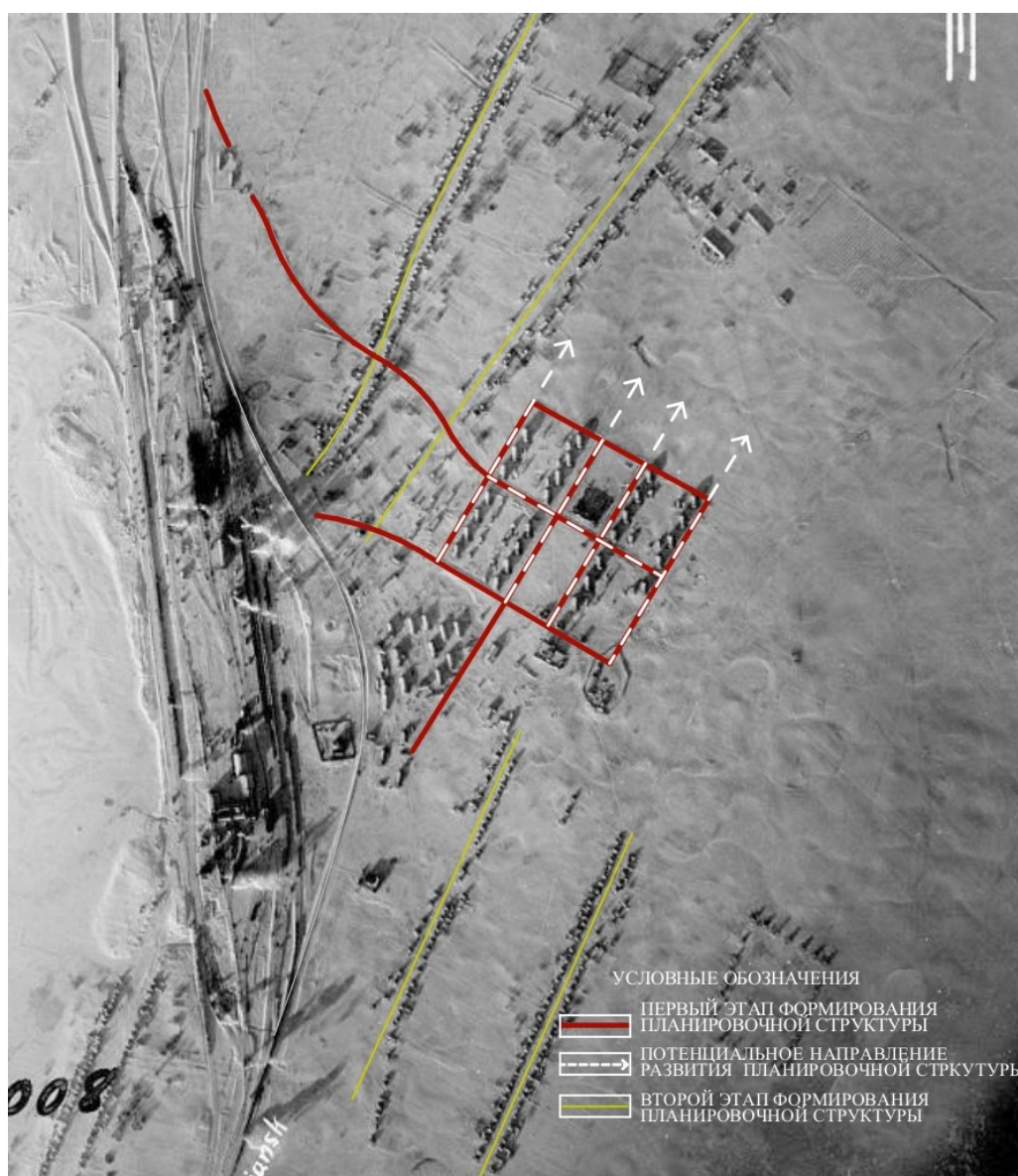


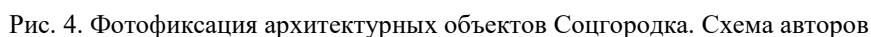
Рис. 3. Планировочная структура Соцгородка. Схема авторов

С 1934 г. по 1936 г. поселок застраивался двухэтажными жилыми домами, рассчитанными на восемь квартир. Прямоугольные в плане корпуса зданий располагались с юго-восточной стороны ул. Дзержинского и ул. Пархоменко, северо-западной стороны ул. Фурманова и ул. Котовского с небольшим отступом и под углом к основным направлениям улиц. Это позволило сформировать две полосы жилой застройки, разделенных зеленой полосой. Дома располагались на расстоянии друг от друга, фасады зданий ориентированы по сторонам света, продольные – на восток и запад, торцевые – на север и юг, что обеспечивало хорошую инсоляцию помещений. На улице Дзержинского было возведено 7 домов, на улице Фурманова – 8, Котовского – 7, Пархоменко – 5 домов.

Застройка жилой зоны осуществлялась в основном однотипными двухэтажными восьми

квартирными домами на два подъезда с четырехскатной крышей. Торцы здания – часто глухие. Гладкие стены продольных фасадов прорезаны прямоугольными оконными проемами. Два небольших ризалита обозначают входы в подъезды и лестничные клетки. Лестницы имеют вертикальное остекление. Лаконичная архитектура зданий несет на себе отпечаток конструктивизма (рис. 4).

В четырех домах по улице Фурманова (№ 35, 37) и Дзержинского (№ 10, 12) объем здания визуально разделен на пять частей путем чередования выступающих и заглубленных фрагментов главного фасада. Лестничных клеток нет, у каждой квартиры отдельный вход. Порталы входов первого этажа и наружные лестничные марши квартир второго этажа находятся в заглубленных частях здания. В целом архитектура этих домов имеет характер построек периода авангарда (рис. 4).



Рабочий поселок расположился в непосредственной близости к реконструируемому и активно развивающемуся узлу железнодорожной станции Валуйки-Сортировочная. На территории железнодорожного узла была сформирована зона производственных и коммунальных предприятий, складов, станционных строений (рис. 5).

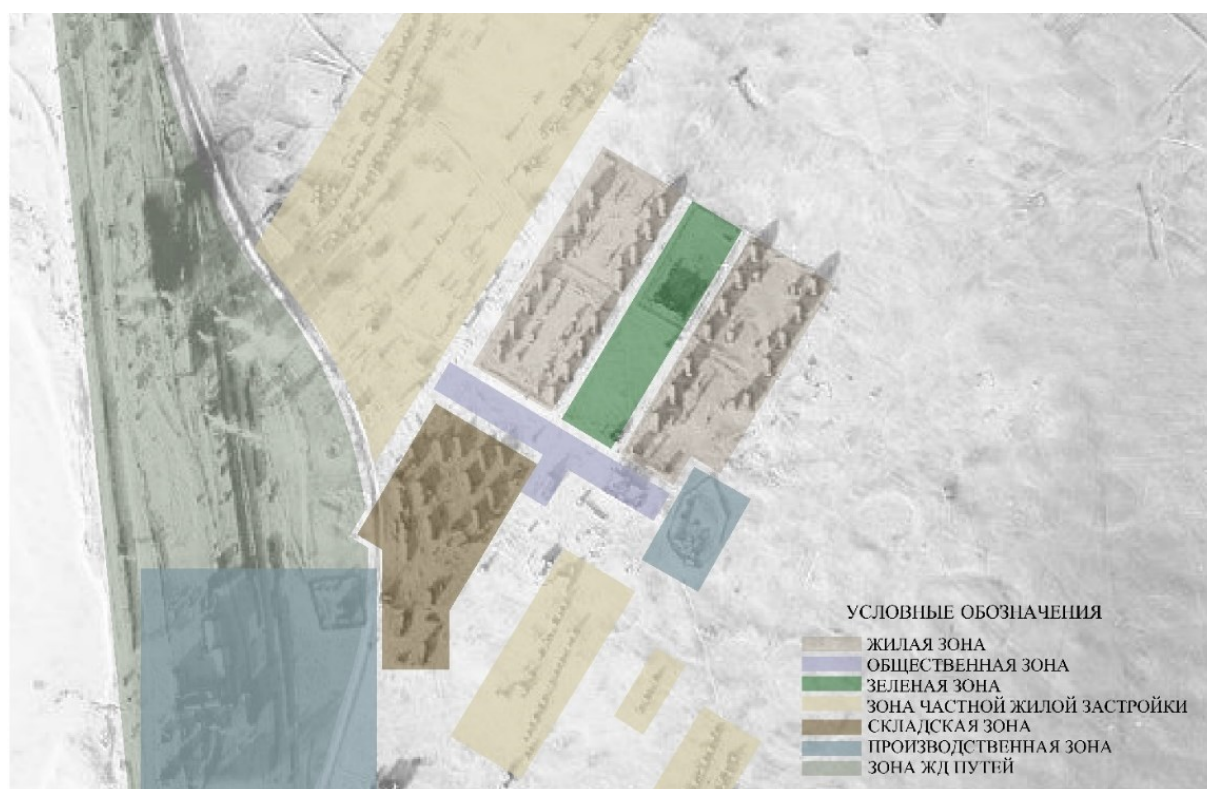


Рис. 5. Функциональное зонирование территории Соцгородка. Схема авторов

Селитебная зона, расположенная в пешеходной доступности от производства, состояла из двух полос двухэтажной жилой застройки, разделенных зеленой полосой (рис. 5). В этой части поселка находилось техническое учебное заведение, готовившее работников железной дороги. В границах зеленой полосы размещалась школа, и был сформирован спортивный узел.

Вдоль главной улицы поселка (ул. Центральная) располагались клуб, магазины, пожарная часть, военизированная охрана и другие здания поселковой инфраструктуры. Таким образом, была сформирована общественная зона населенного пункта, имевшая линейное развитие (рис. 5).

В довоенный период также начал создаваться частный сектор застройки между жилой зоной поселка и железнодорожной магистралью (рис. 5).

Планировочный каркас поселка был задан улицами Центральной, ориентированной с юго-востока на северо-запад и перпендикулярными к ней улицами Дзержинского, Фурманова, Котовского, Пархоменко, ориентированными с юго-запада на северо-восток. Планировочная структура имела открытый характер, была рассчитана на дальнейший рост и развитие (рис. 3).

На юго-востоке по касательной к поселку проходила автомобильная магистраль, отделенная от населенного пункта защитной полосой (рис. 6).

Застройка жилой зоны Соцгородка велась двухэтажными восьми квартирными домами. Среди них основная часть – это дома на два подъезда. Но встречаются и двухэтажные дома без подъездов с отдельными входами в каждую квартиру.

Архитектурные решения жилых и общественных зданий Соцгородка иллюстрируют смену парадигмы в профессии, переход от авангардной, конструктивистской стилистики к ретроспективной архитектуре следующего этапа советского зодчества.

Не смотря на серьезные разрушения во время Второй мировой войны, после последовавшего восстановительного периода в Соцгородке удалось восстановить и сохранить планировочную структуру, функциональное зонирование и архитектурные особенности застройки.

После вхождения в черту города Валулки в результате прокладки новых улиц, уплотнения застройки, освоения близлежащих территорий Соцгородок стал утрачивать свою самобытность. Но до сих пор в городской ткани прочитывается исходная градостроительная структура этого некогда самостоятельного населенного пункта. Потенциал этого градостроительного образования таков, что в соответствии с генеральным планом Валуек, на его основе уже в границах города в рамках микрорайона «Соцгородок» в настоящее время формируется новый общественный центр, альтернативный историческому центру (рис. 7).



Рис. 6. Транспортная схема Соцгородка в довоенный период. Схема авторов

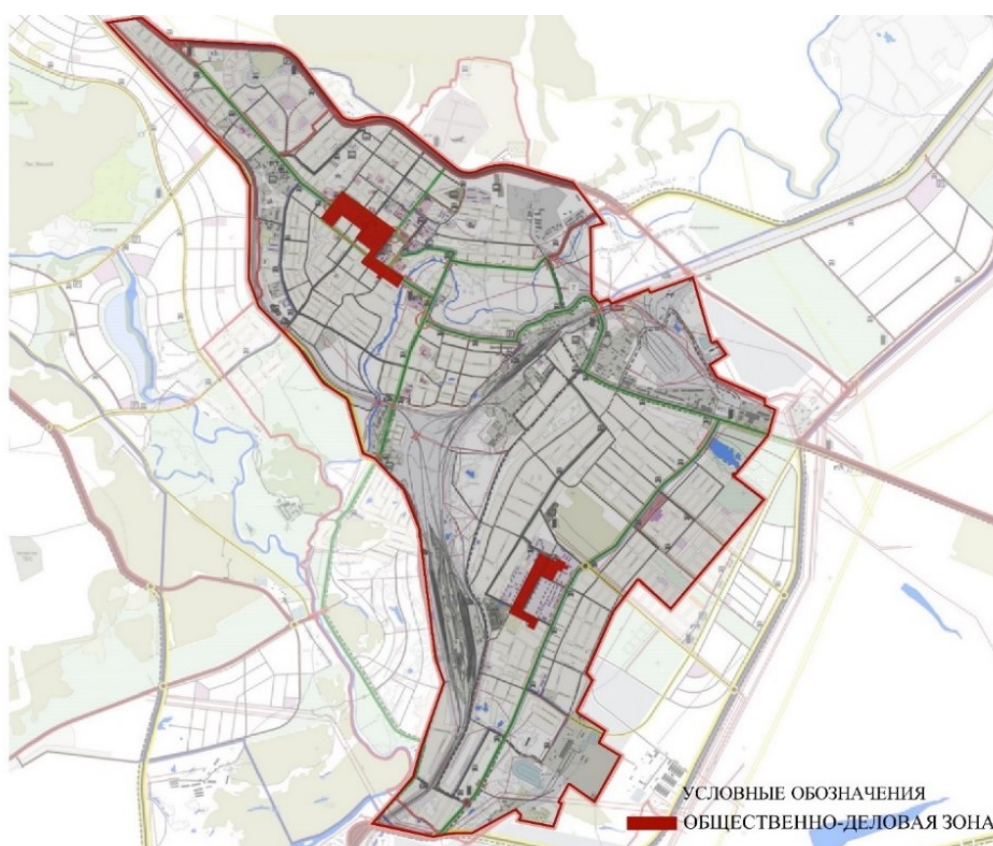


Рис. 7. Генеральный план г. Валуйки. Схема авторов

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алешин В.Э. Развитие представления о социалистическом поселении в градостроительстве Украины в 1920-х - начале 1930-х годов: дис...

канд. арх. наук: Алешин Вадим Эммануилович. Киев, 1988. 244 с.

2. Хан-Магомедов С.О. Архитектура советского авангарда. Проблемы формообразования. Мастера и течения. М.: Стройиздат, 1996. 709 с.

3. Хан-Магомедов С.О. Архитектура советского авангарда. Социальные проблемы. М.: Стройиздат, 2001. 712 с.
4. Меерович М.Г. Градостроительная политика в СССР (1917-1929). От города-сада к ведомственному рабочему поселку. М.: Новое литературное обозрение, 2017. 347 с.
5. Меерович М.Г., Коньшева Е.В., Хмельницкий Д.С. Кладбище соцгородов: градостроительная политика в СССР (1928 – 1932 гг.). М.: РОС-СПЭН; Президентский центр Б.Н. Ельцина, 2011. 270 с.
6. Хмельницкий Д. Соцгород Николая Милютин. Проблема строительства социалистических городов. Издательство: Dom Publisher, 2018. 84 с.
7. Косенкова Ю.Л. Градостроительное мышление советской эпохи: поиск устойчивых структур // Academia. Архитектура и строительство. 2008. №2. С. 2–15.
8. Эррен Л. Урал как кладбище социалистических городов. Городское планирование в первом пятилетии плане // В сб.: Горизонты локальной истории Восточной Европы в XIX-XX вв. Челябинск, 2003. С. 151–162.
9. Didenko C., Bouryak A., Antonenko N., Residential housing in Kharkov (Ukraine), 1920-1935 // ZARCH. 2015. №5. С. 68–85.
10. Бугров К.Д. Соцгорода Большого Урала. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 472 с.
11. Бугров К.Д. Красноуральск – забытый соцгород первой пятилетки // Советский проект. 1917–1930-е гг.: этапы и механизмы реализации: сборник научных трудов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. С. 353–364.
12. Гелла О.І., Качемцева Л.В. Соцмісто в архітектурній та містобудівній практиці на Харківщині в 1920 – 1930 рр. // Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2016. Вип. 45. С. 230–236.
13. Черкасова Е.Т. Проблемы сохранения архитектурного наследия Харьковского конструктивизма // Ватерпасс. 2002. № (40). С. 4–13.
14. Меерович М.Г. Рождение соцгорода: градостроительная политика в СССР. 1926-1932 гг. (концепция социалистического расселения – формирование населенных мест нового типа). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. 472 с.
15. Косенкова Ю.Л. Советское градостроительство 1920-1930-х годов: Новые исследования и материалы. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 384 с.
16. Mark Meerovič, Evgenija Konyševa, «Linkes Ufer, rechtes Ufer» Ernst May und die Planungsgeschichte von Magnitogorsk (1930–1933). Berlin, 2013. 254 с.
17. Меерович М.Г. Соцгорода – уникальный тип градостроительной системы в условиях советской государственности // Miasta nowych ludzi. Architektoniczna i urbanistyczna spuścizna komunizmu. Warszawa. 2007, T. 1. С. 85–101.
18. Коньшева Е.В., Меерович М.Г. Эрнст Май и проектирование соцгородов в годы первых пятилеток (на примере Магнитогорска). СПб.: Лепан, 2012. 224 с.
19. Ризаева М.И., Ладик Е.И., Перькова М.В., Бик О.В. Выявление градостроительных конфликтов в структуре исторической застройки малых городов (на примере г. Валуйки Белгородской области // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 11. С. 58–68. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-11-58-68.
20. Перькова М.В., Трубенцова К.М. Возникновение и развитие малых городов Белгородской области. Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. 141 с.
21. Сабсович Л.М. Социалистические города. М. Госиздат РСФСР. Московский рабочий. 1930. 124 с.
22. Сабсович Л. М. Города будущего и организация социалистического быта. М: Государственное техническое издательство, 1929. 64 с.
23. Ладовский Н. Планировка Автостроя и Магнитогорска в вузе // Советская архитектура 1931. №1-2. С. 21–28.
24. Милютин Н.А. Соцгород. Проблемы строительства социалистических городов: Основные вопросы рациональной планировки и строительства населённых пунктов СССР. М.; Ленинград: Государственное издательство, 1930. 81 с.

Информация об авторах

Качемцева Любовь Владимировна кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: kachemtsevalubov@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Арслан Марьям Ильхамовна, ассистент кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: maryam.rizaeva@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 15.03.2023 г.

© Качемцева Л.В., Арслан М.И., 2023

Kachemtseva L.V., *Arslan M.I

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: maryam.rizaeva@bk.ru

FEATURES OF THE IMPLEMENTATION OF THE CONCEPT OF "SOTSGOROD" IN ARCHITECTURAL AND URBAN PLANNING PRACTICE IN THE TERRITORY BELGOROD REGION IN THE 1930S. (ON THE EXAMPLE OF THE SOTSGORODOK MICRODISTRICT OF VALUYKI)

Abstract. Traditionally, the concept of a "social city" is illustrated by examples of the largest urban-planning entities. In this paper, a small settlement is considered – Valuyki, Belgorod region, which is rarely done within the framework of the stated issues. The article traces the formation of the concept of "sotsgorod" and its transformation in the mid-1930s, due to the change in the urban planning and architectural paradigm in the Soviet Union during this period. This study is aimed at identifying urban planning and architectural features of the implementation of the concept of "social city" on the territory of a small settlement. The authors of the study applied an integrated approach. The geographical and topographic features of the location of the settlement are determined. The conditions and history of the emergence, the main stages of the formation of the working settlement in the pre-war period are studied. The social composition of the inhabitants has been revealed. The article analyzes the town-planning and planning features, the specifics of the functional solution of the settlement that developed in the 1930s. The planning, transport structures and functional content of the Social Town at the time of the emergence of the work settlement and in the pre-war period are graphically restored. The main types of residential buildings in the residential area of the Social Town, their architectural features and stylistic affiliation of individual public buildings are determined. The potential of the studied urban planning structure and possible prospects for the development of this territory as part of the city of Valuyki are indicated.

Keywords: social city, planning structure, functional zoning, types of residential buildings, architectural features.

REFERENCES

1. Aleshin V.E. Development of the concept of a socialist settlement in the urban planning of Ukraine in the 1920s-early 1930s [Razvitiye predstavleniya o sotsialisticheskom poselenii v gradostroitel'stve Ukrainy v 1920-kh - nachale 1930-kh godov]: Kiev, 1988. 244 p. (rus)
2. Khan-Magomedov S.O. Architecture of the Soviet avant-garde. [Arhitektura sovetskogo avangarda: v 2 kn.]. M.: Stroyizdat, 1996. Problems of shaping. Masters and currents. 709 p. (rus)
3. Khan-Magomedov S.O. Architecture of the Soviet avant-garde; in 2 books. Book 2: Social problems [Arhitektura sovetskogo avangarda. Social'nye problemy]. Moscow: Stroyizdat, 2001. 712 p. (rus)
4. Meerovich M.G. Urban planning policy in the USSR (1917-1929). From the garden city to the departmental working settlement [Gradostroitel'naya politika v CCCR (1917-1929). Ot goroda-sada k vedomstvennomu rabochemu poselku]. M.: New Literary Review, 2017. 347 p. (rus)
5. Meerovich M.G., Konysheva E.V., Khmel'nitsky D.S., Sotsgorodov cemetery: urban planning policy in the USSR (1928–1932) [Kladbishche sotsgorodov: gradostroitel'naya politika v SSSR, 1928–1932 gg.]. Moscow: ROSSPEN; Presidential Center of B.N. Yeltsin, 2011. 270 p. (rus)
6. Khmel'nitsky D. Sotsgorod Nikolay Milyutin. The problem of building socialist cities [Socgorod Nikolaya Milyutina. Problema stroitel'stva sotsialisticheskikh gorodov]. Publishing house: Publisher "House Publisher", 2018. 84 p. (rus)
7. Kosenkova Y.L. New Scientific Approaches to the Study of Architectural and Town Planning Heritage in Soviet-era [Gradostroitel'noe myshlenie sovetskoj epohi: poisk ustojchivyh struktur]. Academia. Architecture and construction. 2008. No. 2. Pp. 2–15. (rus)
8. Erren, L. The Urals as a Cemetery of "Socialist Cities". Urban Planning in the First Five-Year Plan [Ural kak kladbishche "sotsialisticheskikh gorodov". Gorodskoe planirovanie v pervom pyatiletnem plane]. In Gorizonty lokal'noi istorii Vostochnoi Evropy v XIX–XX vv. Chelyabinsk, Kamennyi poyas. 2003. Pp. 151–163. (rus)
9. Didenko S., Buryak A., Antonenko N. Housing construction in Kharkiv (Ukraine), 1920-1935. ZARCH. 2015. No. 5. Pp. 68–85.
10. Bugrov K.D. Sotsgoroda of the Greater Urals [Socgoroda Bol'shogo Urala]. Yekaterinburg: Ural Publishing House. un-te, 2018. 472 p. (rus)
11. Bugrov K.D. Krasnouralsk the forgotten social city of the first five-year plan [Krasnouralsk – zabytyj socgorod pervoj pyatiletki]. The Soviet project. 1917-1930s: stages and mechanisms of implementation: collection of scientific papers. Yekaterinburg: Ural Publishing House. un-te, 2018. Pp. 353–364. (rus)

12. Gella O.I., Kachemtseva L. V. Sotsgorod in architectural and urban planning practice in Kharkiv region in 1920-1930 [Socgorod v arhitekturnoj i gradostroitel'noj praktike Na Har'kovshchine v 1920–1930 gg.]. Suchasni problemi arkhitekturi ta mistobuduvannya. 2016. 45. Pp. 230–236.

13. Cherkasova E.T. Problems of preserving the architectural heritage of Kharkiv constructivism [Problemy sohraneniya arhitekturnogo naslediya Har'kovskogo konstruktivizma]. Waterpass. 2002. No. (40). Pp. 4–13. (rus)

14. Meerovich M.G. The birth of a socialist city: urban planning policy in the USSR. 1926-1932. (the concept of socialist settlement is the formation of settlements of a new type) [Rozhdenie socgoroda: gradostroitel'naya politika v SSSR. 1926-1932 gg. (konceptiya socialisticheskogo rasseleniya – formirovanie naselennykh mest novogo tipa)]. Irkutsk: Publishing House of IrSTU, 2008. 472 p. (rus)

15. Kosenkova Yu.L. Soviet urban planning of the 1920s-1930s: New research and materials [Sovetskoe gradostroitel'stvo 1920-1930-h godov: Nove issledovaniya i materialy]. Moscow: Book House "LIBROCOM", 2010. 384 p. (rus)

16. Mark Meerovich, Evgenia Konysheva "Communications of the Ufer, speeches of the Ufer" Ernst May and his plans in Magnitogorsk (1930-1933). Berlin, 2013. 254 p.

17. Meerovich M.G. Sotsgoroda — a unique type of urban planning system in the conditions of Soviet statehood [Socgoroda — unikal'nyj tip gradostroitel'noj sistemy v usloviyah sovetskoj gosudarstvennosti]. Myasta novich ludzi. Architecture and urbanism are the salvation of communism. Warsaw. 2007. Vol. 1. Pp. 85-101.

18. Konysheva E.V., Meerovich M.G. Ernst May and the design of social cities during the first

five-year plans (on the example of Magnitogorsk) [Ernst Maj i proektirovanie socgorodov v gody pervyh pyatiletok (na primere Magnitogorska)]. St. Petersburg: Lenand, 2012. 224 p. (rus)

19. Rizaeva M.I., Ladik E.I., Perkova M.V., Bik O.V. Identification of urban conflicts in the structure of historical development of small towns, for example, of Valuika Belgorod region [Vyyavlenie gradostroitel'nykh konfliktov v strukture istoricheskoy zastrojki malych gorodov (na primere g. Valujki Belgorodskoj oblasti)]. Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2021. No. 11. Pp. 58–68. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-11-58-68 (rus)

20. Perkova M.V., Trubentsova K.M. The emergence and development of small towns in the Belgorod region [Vozniknovenie i razvitie malych gorodov Belgorodskoj oblasti]. Belgorod: Publishing House of BSTU, 2016. 141 p. (rus)

21. Sabsovich L.M. Socialist cities [Socialisticheskie goroda]. M. Gosizdat RSFSR. Moscow Worker, 1930. 124 p. (rus)

22. Sabsovich L. M. Cities of the future and the organization of socialist life [Goroda budushchego i organizaciya socialisticheskogo byta]. M. State Technical Publishing House, 1929. 64 p. (rus)

23. Ladovsky N. The layout of Avtostroy and Magnitogorsk at the university [Planirovka Avtostroja i Magnitogorska v vuze]. Soviet architecture. 1931. No. 1-2. Pp. 21–28. (rus)

24. Milyutin N.A. Sotsgorod. Problems of construction of socialist cities are the main issues of rational planning and construction of settlements of the USSR [Problemy stroitel'stva socialisticheskikh gorodov: Osnovnye voprosy racional'noj planirovki i stroitel'stva naselyonnykh punktov SSSR]. M.; Leningrad: State Publishing House. 1930. 81 p. (rus)

Information about the authors

Kachemtseva, Lubov V. PhD, Assistant professor. E-mail: kachemtsevalubov@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Arslan, Maryam I. Assistant. E-mail: maryam.rizaeva@bk.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Received 15.03.2023

Для цитирования:

Качемцева Л.В., Арслан М.И. Особенности реализации концепции «соцгорода» в архитектурной и градостроительной практике на территории Белгородской области в 1930-х гг. (На примере микрорайона Соцгородок г. Валуйки) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 6. С. 65–75. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-65-75

For citation:

Kachemtseva L.V., Arslan M.I. Features of the implementation of the concept of "sotsgorod" in architectural and urban planning practice in the territory belgorod region in the 1930s. (On the example of the Sotsgorodok microdistrict of Valuyki). Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 6. Pp. 65–75. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-65-75

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-76-84

*Григоренко А.А., Дуюн Т.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: grigorenko1998@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И АМПЛИТУДЫ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА

Аннотация. Статья содержит описание методики моделирования формы собственных колебаний, а также амплитуды и формы вынужденных колебаний вертикально-фрезерного станка HAAS VF-1. В качестве исходных данных принята имеющаяся в открытом доступе 3D модель несущих элементов, информация о массе и габаритах электродвигателя шпинделя. При подготовке к расчету исходная твердотельная модель идеализирована путем удаления малых фасок, скруглений и отверстий малого диаметра. Подвижные соединения с линейными направляющими качения и шариковыми подшипниками были заменены на жесткие неподвижные, так как гашение колебаний в данных узлах не рассматривалось. В ходе первого расчета были получены десять собственных частот с наибольшими значениями амплитуды колебания. По результатам второго расчета было выявлено влияние компоновки привода шпинделя (соосная установка электродвигателя со шпинделем через кулачковую муфту или соединение при помощи передачи с зубчатым ремнем) и дополнительных устройств для рассеивания энергии колебаний (массовые и структурные демпферы в виде элементов конструкции, сочлененных через пластмассовые втулки) на величину амплитуды вынужденных установившихся колебаний, которые могут возникнуть при обработке детали.

Ключевые слова: вертикально-фрезерный станок, собственные колебания, вынужденные колебания, конечно-элементный анализ.

Введение. Фрезерные станки являются одним из наиболее востребованных и распространенных видов металлорежущего оборудования. Большинство современных фрезерных станков, оснащенных числовым программным управлением, имеют схожую компоновку: вертикально расположенный шпиндель и крестовой стол. Процесс механической обработки сопровождается периодическим силовым воздействием на систему СПИД (станок-приспособление-инструмент-деталь). Действующие вынужденные колебания оказывают влияние на параметры качества обрабатываемой поверхности. При определенных технологических режимах обработки могут возникать условия, близкие к резонансным процессам, сопровождающиеся резким возрастанием амплитуды колебаний и негативно влияющих на параметры качества изделия [1, 2]. Конечно-элементное (КЭ) моделирование различных конструктивных исполнений и модификаций отдельных узлов может быть использовано для выявления и предотвращения нежелательных форм колебаний [3-6]. Моделирование собственных частот и амплитуды вынужденных колебаний металлорежущего оборудования позволяет выявить влияние конструктивных особенностей на амплитуду и форму колебаний [7, 8], избежать возникновения резонансных процессов и повысить качество обработки.

Основная часть. Объектом исследования являлся вертикально-фрезерный станок модели

HAAS VF-1. Моделирование выполнялось с использованием приложения Simcenter CAD/CAM/CAE системы NX. На первом этапе была использована полная твердотельная модель станка, имеющаяся в открытом доступе [9]. Для снижения трудоемкости расчетов полная модель идеализирована: удалены габаритные макеты листовых кожухов, устройства для смены инструмента, электрический шкаф, система удаления стружки, регулируемые опоры и прочие элементы, не воспринимающие нагрузку при выполнении обработки. Подшипники, линейные направляющие и двигатель привода шпинделя в модели были заменены на бобышки равной массы и габаритов. Кроме того, из исходной модели удалены мелкие геометрические элементы, такие как глухие и сквозные отверстия, фаски, скругления и проточки. При расчете данные элементы могут вызвать ошибки в процессе создания сетки или чрезмерное ее измельчение. Слишком мелкая сетка увеличивает затраты вычислительных мощностей и время анализа. Вышеупомянутые элементы геометрии были удалены при помощи команд синхронного моделирования. Удалены также выступающие на небольшое расстояние базовые плоскости вспомогательного оборудования и некоторые грани, которые были необходимы для формирования литьевых уклонов. Команды для синхронного моделирования были использованы для варьирования конфигурации элементов машины.

Возникающие в процессе эксплуатации вибрации могут поглощаться материалом конструкции, рассеиваться в соединениях деталей и поглощаться специально предназначенными для этого устройствами – демпферами [10, 11]. Так как нет точных сведений о способности поглощать энергию колебаний исследуемых соединений, этот фактор не учитывался при проведении

вычислительного эксперимента, а полученные итоговые абсолютные значения амплитуд вынужденных колебаний отличаются от реальных. Полученные результаты могут быть использованы для качественного анализа и минимизации амплитуды колебаний.

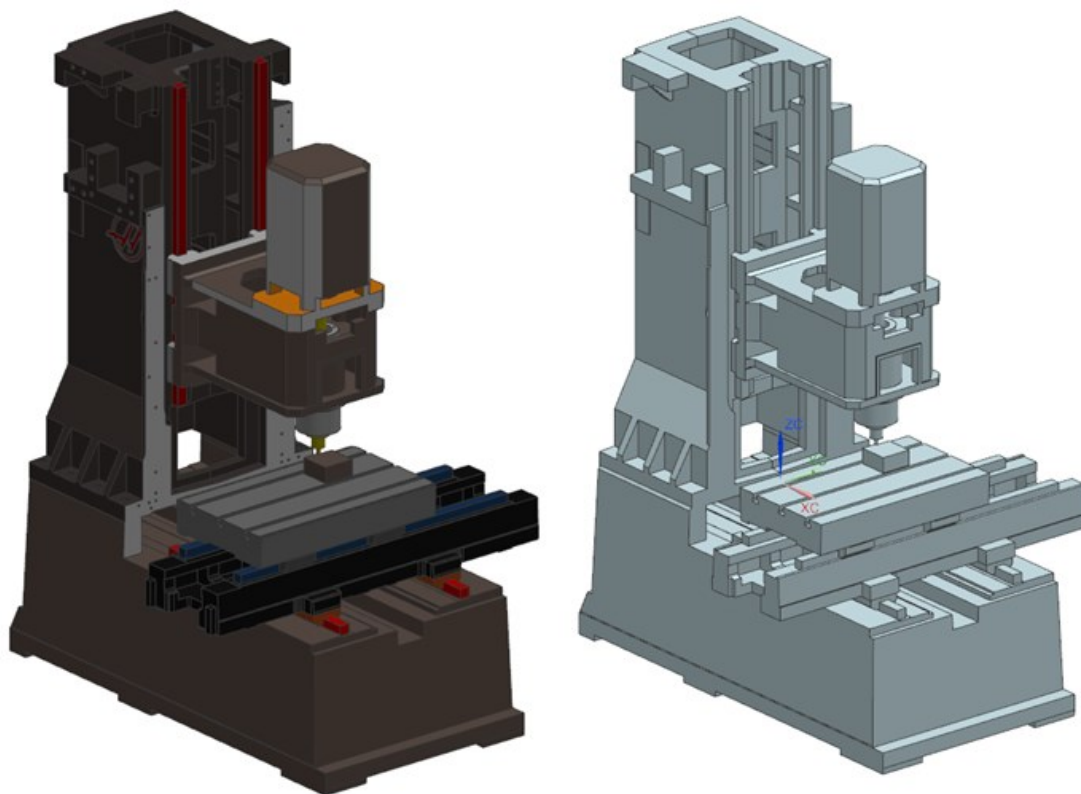


Рис. 1. Твёрдотельная модель, подготовленная к расчету

Создание расчетной модели включало построение конечно-элементной сетки и задание параметров решения. В данном случае, элементы фрезерного станка, созданные при формировании твердотельной модели, не являются простыми элементами вытягивания. Поэтому оптимальным вариантом конечного элемента будет 10 узловой гексаэдральный элемент. Размер элементов варьировался в зависимости от толщины стенок отливок и размеров мелких элементов геометрии. Среднее значение размера – 16 мм. Физические свойства всех конечных элементов были одинаковы и соответствовали серому чугуна СЧ18-30. Обязательным требуемым граничным условием при определении собственных частот конструкции является жесткая заделка. Для определения амплитуды вынужденных колебаний к конструкции прикладывался набор частотных возбуждений, диапазон которых был задан исходя из результатов определения собственных частот. Значение коэффициента структурного демпфирования G принято равным 3 % (0.03). У металлоконструкций этот коэффициент может

доходить до 10 %. Однако, действительный коэффициент можно определить только с помощью натурных испытаний машины [12, 13].

При анализе собственных частот свободных колебаний решатель использует метод Ланцоша. Этот метод пригоден для выполнения расчета неотрицательной матрицы масс и симметричной матрицы жесткости [14, 15]. Определение значений собственных частот выполняется за счет решения уравнения движения системы с конечным числом степеней свободы.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0, \quad (1)$$

где $[M]$ – матрица масс,

$\{\ddot{u}\}$ – векторы ускорений,

$[K]$ – матрица жесткости,

$\{u\}$ – векторы перемещений.

Из уравнения 1 следует, что собственные частоты не зависят от демпфирования системы и внешних воздействий. Параметры вынужденных колебаний определялись модальным методом. Этот метод использует частоты и формы свободных колебаний, учитывает демпфирование системы.

Целью исследования являлось выявление влияния различных конструктивных вариантов станка на форму вынужденных колебаний [16, 17]. Источником вынужденных колебаний при эксплуатации станка является шпиндельный узел, воспринимающий динамически изменяющуюся силу резания. В качестве исследуемого элемента конструкции принято расположение электродвигателя шпиндельного узла: крепление двигателя соосно шпинделю через переходную плиту непосредственно к шпиндельной бабке (первый вариант комплектации VF-1) и крепление электродвигателя шпинделя со смещением ближе к колонне, вращение шпинделю передается посредством зубчатой ременной передачи (второй вариант комплектации VF-1). Зубчатая муфта у конструкции с прямым приводом передает крутящий момент от электродвигателя к шпинделю и способна компенсировать их незначительную несоосность. На конечно-элементной модели шпиндель не соединен с макетом двигателя. Это связано с тем, что в вышеописанной конечно-элементной модели шпиндель не враща-

ется в своих опорах и не может передавать колебания крутящего момента, возникающие при обработке, к электродвигателю.

Вычислительный эксперимент по определению собственных частот колебаний проводился для двух представленных конструктивных вариантов. По результатам анализа был определен диапазон наиболее неблагоприятных частот, при котором в конструктивных вариантах наблюдаются наибольшие амплитуды колебаний инструмента относительно базовой системы координат (без учета амплитуды колебаний стола с закрепленной на нем деталью). Данный диапазон частот был использован в качестве исходных данных для определения параметров вынужденных колебаний [18] обоих вариантов конструкции. К детали, жестко закрепленной на столе, и инструменту были приложены частотные возбуждения в виде двух сил. Обе силы имеют одинаковый модуль и противоположны по направлению действия. Частота воздействия обеих сил равна и лежит в интервале вышеупомянутого диапазона частот. Сдвиг по фазе между двумя силами принят равным нулю.



Рис. 2 Прямой привод (справа) и ременной привод (слева) [9]

Результатами первых двух вычислительных анализов стали десять форм собственных колебаний с наибольшими амплитудами. В таблице 1 сведены частоты колебаний и условных амплитуд для двух вариантов конструкции.

По результатам расчета собственных частот можно сделать следующие заключения.

1. При анализе реальной конструкции, измерительную аппаратуру и источники колебаний можно располагать на вершине колонны, на верхнем торце электродвигателя, в центре боковой поверхности поперечных салазок.

2. Наибольшее влияние на взаимное расположение инструмента и детали оказывают колебания колонны и шпиндельной бабки.

3. Частота возбуждающих колебаний будет находиться в пределах от 50 до 500 Гц. В данном диапазоне частот возникают резонансы с наибольшей амплитудой перемещений колонны и шпиндельной бабки, сопряженные с наибольшими величинами смещения инструмента.

Результаты расчета параметров вынужденных колебаний содержат набор частот в пределах от 50 до 500 герц. Каждой частоте соответствуют своя форма колебаний и значения амплитуд (максимальных смещений в базовой системе координат).

Таблица 1

Результаты моделирования собственных колебаний

№	Прямой привод		Привод через ременную передачу	
	Частота колебаний, Гц	Амплитуда инструмента, мм Наибольшая амплитуда, мм (наименование элемента)	Частота колебаний, Гц	Амплитуда инструмента, мм Наибольшая амплитуда, мм (наименование элемента)
1	59,182	0.03 0.06 (двигатель)	61,662	0.03 0.05 (двигатель)
2	81,237	0.035 0.07 (двигатель)	91,133	0.035 0.055 (двигатель)
3	143,911	0.05 0.08 (колонна)	147,699	0.077 0.077 (фреза)
4	182,422	0.075 0.08 (двигатель)	215,948	0.07 0.07 (фреза)
5	187,374	0.06 0.078 (двигатель)	225,414	0.04 0.076 (двигатель)
6	233,898	0.03 0.096 (мотор)	274,167	0.025 0.074 (стол)
7	272,446	0.025 0.056 (стол)	297,411	0.02 0.068 (двигатель)
8	304,798	0.042 0.06 (стол)	306,514	0.05 0.07 (двигатель)
9	312,491	0.025 0.07 (стол)	317,625	0.017 0.068 (стол)
10	350,428	<0.01 0.3 (основание)	330,565	<0.01 0.4 (основание)

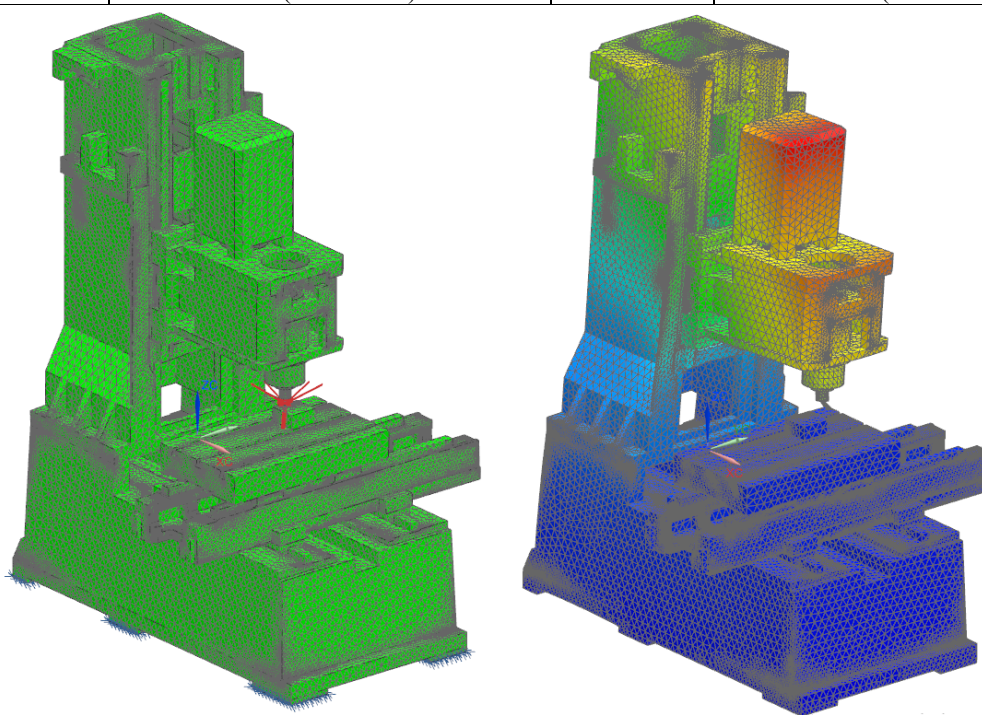


Рис. 3 Форма собственных колебаний 97.699 Гц

Выходные данные симуляции содержали несколько десятков результатов. Каждый результат представлен несколькими видами деформированной конструкции, которые показывают постепенную деформацию машины от изначального положения до амплитудного. Результаты вычисления собственных частот колебаний показывают, что наибольшее смещение инструмента

возникает при деформации колонны и шпиндельной бабки. Поэтому, при анализе результатов вычислений вынужденных установившихся колебаний измерялось смещение точки на торце оправки инструмента (вершина конечного элемента, лежащая на периметре окружности). Такое расположение позволяет снизить влияние жесткости концевой фрезы на итоговое значение максимального смещения.

Число форм колебаний ограничено вычислительным ресурсом. Для повышения числа точек на графике (рис. 4) было выполнено несколько последовательных симуляций с меньшим диапазоном частот. Результаты симуляций были экспортированы в общую электронную таблицу для построения графика зависимости от частоты внешнего воздействия.

В вышеупомянутом диапазоне есть две принципиально различных формы колебаний:

- смещение нижней плоскости шпиндельной бабки параллельно столу с сопутствующим смятием и скручиванием колонны;
- смещение шпиндельной бабки с ее скручиванием вокруг оси ОХ с сопутствующим изгибом колонны.

Полученные амплитуды колебаний, полученные в результате симуляции, были сведены в график, показанный на рисунке 5. Частота изменялась с шагом 2.5 герц. По вертикальной оси отложены значения амплитуды в миллиметрах. От диаметра режущего инструмента зависит не только частота его вращения и, как следствие, частота внешнего воздействия, но и величина силы резания. Эта сила моделируется внешним воздействием при симуляции. Внешнее воздействие задается через базовое значение в ньютонах и множитель в поле частот. В пределах от 100 до 300 герц были выполнены симуляции с базовым амплитудным значением усилия внешнего воздействия (красная линия на графике), с удвоенным базовым значением (синяя линия) и удвоенным множителем (зеленая линия).

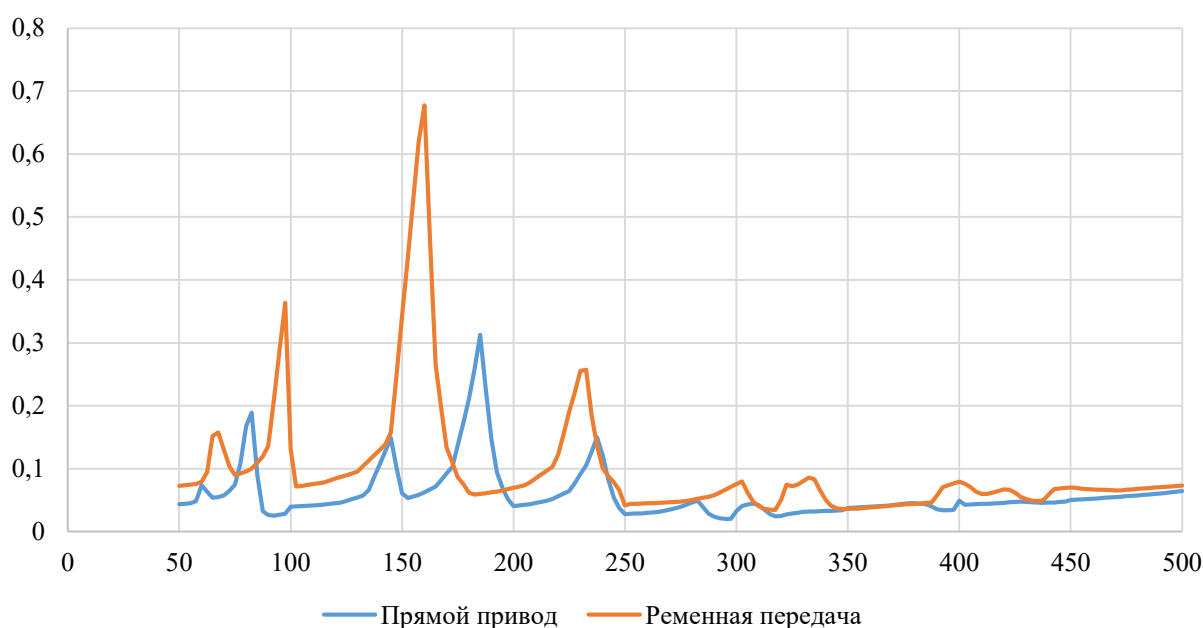


Рис. 4. Графики зависимости амплитуды вынужденных колебаний точки на торце шпинделя от частоты внешнего воздействия для прямого и ременного приводов

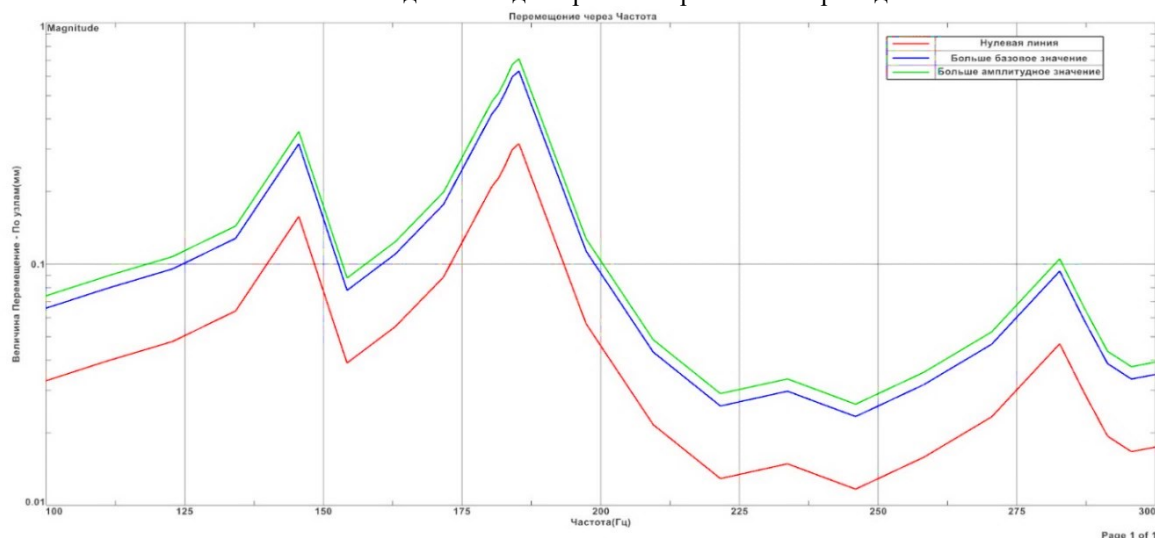


Рис. 5. Графики зависимости амплитуды вынужденных колебаний точки на торце шпинделя от частоты внешнего воздействия для различных величин амплитуды внешнего воздействия

На рисунке 5 координаты точек синей и зеленой линии графика совпадают, а линии рисунка разнесены для наглядности. Из вышеописанного анализа следует, что увеличение усилия воздействия не повлияло на характер зависимости амплитуды смещения от частоты, что коррелирует с выводами других исследований [18], произошло лишь смещение кривой выше по оси Y.

По результатам выполненных модальных анализов вынужденных колебаний, смещение места крепления электродвигателя ближе к колонне или не оказывает существенного влияния на взаимное смещение инструмента и детали или вызывает более чем двукратное увеличение смещения инструмента. При относительно низких частотах вращения инструмента (левая зона графика до 250 Гц) оранжевая линия конструкции с ременной передачей в зонах без резонансных пиков лежит выше синей линии конструкции с прямым приводом. Пики амплитуд во всем диапазоне ниже у машины с прямым приводом. На высоких частотах (более 250 Гц) конструкция с электродвигателем на большем расстоянии более стабильна.

Из вышеописанных результатов можно сделать заключение, что для работы на более низких частотах вращения больше подходит компоновка с прямым приводом. Использование ременной

передачи позволит получить более высокие обороты шпинделя (работа передачи в качестве мультипликатора). Установкой настраиваемых демпферов можно добиться устранения пиков, попадающих в рабочий диапазон. В качестве настраиваемого массового демпфера может выступать сам электродвигатель, установленный через втулки. При колебаниях отливки шпиндельной бабки, втулки будут деформироваться и поглощать энергию колебаний во всем диапазоне частот.

При определенной частоте внешнего воздействия, электродвигатель будет колебаться в противофазе с торцом шпинделя, что устранил пик амплитуды. Вышеописанное подтверждается результатами выполненной симуляции. На рисунке 6 показаны графики зависимости амплитуды колебаний от частоты внешнего воздействия для демпфированного и жестко закрепленного электродвигателя привода. Из рисунка 6 видно, что кривая демпфированной конструкции находится ниже жестко скрепленной, что является следствием рассеивания энергии во втулках [19]. При частоте 231.77 Гц у конструкции с жестко закрепленным двигателем присутствует пик амплитуды, у демпфированной конструкции отсутствует пик на частотах, близких к 231 Гц, но присутствуют более низкие пики правее и левее.

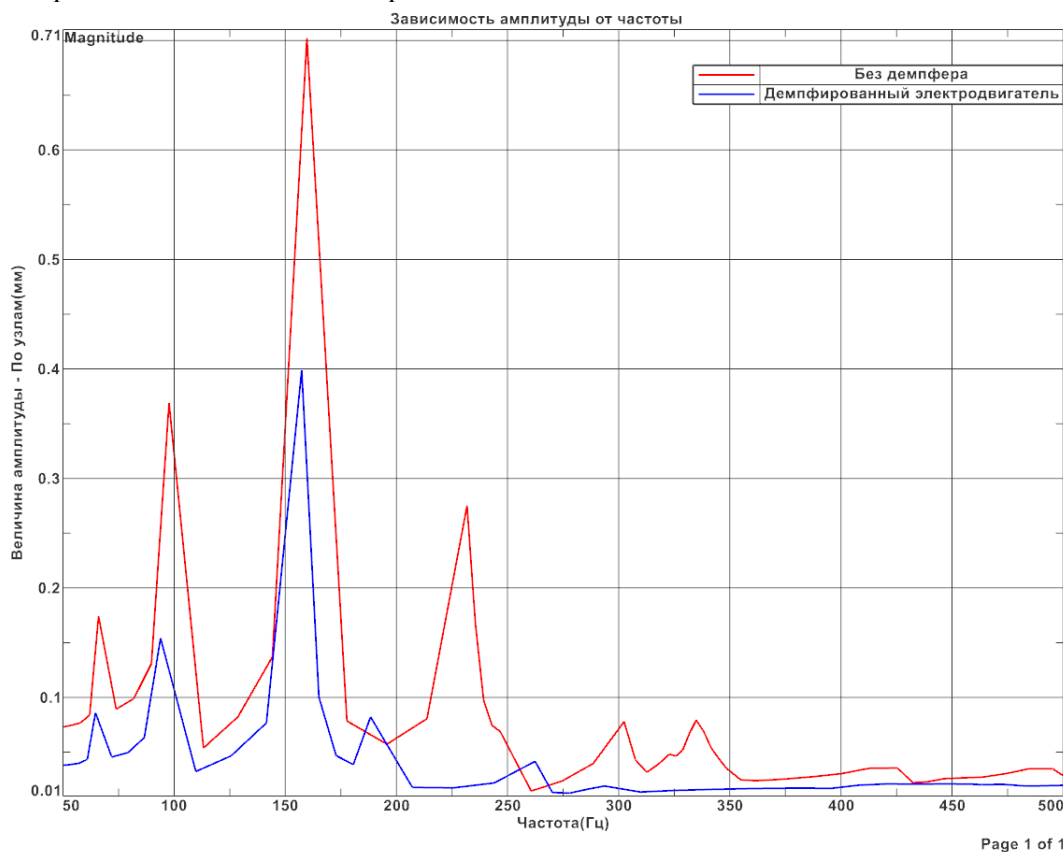


Рис. 6. Графики зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты внешнего воздействия для машин с ременным приводом. Красная линия – жесткое крепление электродвигателя, синяя линия – крепление электродвигателя через пластмассовые втулки

Выводы. Результаты КЭ расчета собственных частот колебаний могут быть использованы для определения точек расположения измерительного оборудования и источника колебаний при определении собственных частот реальной машины. Результаты расчета параметров вынужденных колебаний полезны для исследования влияния конфигурации элементов машины на амплитуду этих колебаний. При исследовании представленной конструкции станка получены следующие выводы:

- наибольшие взаимные смещения детали и инструмента при вибрациях в системе СПИД возникают из-за смещения вертикальной колонны и отливки шпиндельной бабки;

- смещение электродвигателя привода ближе к колонне значительно повышает амплитуду колебаний в диапазоне частот до 250 Гц и незначительно повышает амплитуду на частотах более 250 Гц;

- использование электродвигателя в качестве массового демпфера позволяет нивелировать негативное влияние использования ременной передачи в приводе, выраженное в возрастании амплитуды вынужденных колебаний торца шпинделя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисенко А.Ф., Гаспарова Л.Б. Динамический расчет привода токарного станка с ЧПУ // Актуальные проблемы в машиностроении. 2022. Т. 9. № 3. С. 20–26
2. Денисенко А.Ф., Гаспарова Л.Б. Оценка резонансных режимов привода главного движения токарного станка с бесступенчатым регулированием // Транспортное машиностроение. 2022. № 9 (9). С. 11–21. DOI: 10.30987/2782-5957-2022-9-11-21
3. Гаврилов А.А., Морозов Н.А., Власов Ю.Л. Методика Расчета собственных частот кран-балок // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 1 (176). С. 212–217
4. Рыжиков И.Н. Использование пружинно-массово-демпферных моделей при анализе колебаний рабочих колес энергетических турбомашин с расстройкой параметров системы // Методы. Технологии. 2020. № 4 (48). С. 20–25. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-4-20-25
5. Шевелев Н.А., Домбровский И.В. Численное исследование динамического поведения вращающихся конструкций // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика. 2009. № 1. С. 151–159.
6. Культербаев Х.П., Алокова М.Х., Барагунова Л.А. Математическое моделирование изгибных колебаний вертикального стержня переменного сечения // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2015. № 4 (185). С. 100–106. DOI: 10.17213/0321-2653-2015-4-100-106
7. Леонтьев Е.В. Поперечные колебания балки со свободными краями на упругом основании при действии динамической нагрузки // Строительство и реконструкция. 2020. № 3 (89). С. 31–44. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-89-3-31-44
8. Воробель В.М., Попов Г.Я., Реут В.В. Вынужденные колебания коробчатой оболочки квадратного сечения Известия Российской академии наук // Механика твердого тела. 2009. № 6. С. 115–123.
9. HaasAutomationInc. [сайт]. URL: <https://www.haascnc.com/ru/machines/vertical-mills/vf-series/models/small/vf-1.html> - 2022.
10. Slocum A.H. Precision machine design Изд-во Prentice-Hall Inc, 1992 750 с.
11. Ахметханов Р.С. Влияние поврежденности элементов конструкции на динамические характеристики системы // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 6. С. 63–69.
12. Арутюнян М.В., Арутюнян А.М. Динамические испытания железнодорожных платформ из композиционного стеклопластика // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 12. С. 50–54.
13. Radoicic G., Jovanovic M. Experimental identification of overall structural damping of system // Journal of mechanical engineering. 2013. Vol. 4. Pp. 260–268. DOI:10.5545/sv-jme.2012.569
14. Гончаров П.С., Артамонов И.А., Халитов Т.Ф., Денисихин С.В., Сотник Д.Е. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ. Москва ДМК Пресс 2012 504 с.
15. Кравцова Э.А., Куправа И.В. Математическая модель собственных частот изгибных колебаний стержня // Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-практической конференции. Уфа, 2022. С. 31–42.
16. Козлов В.А. Свободные колебания консольно защемленных призматических тонкостенных конструкций // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2013. № 2 (30). С. 9–17.
17. Сабитов К.Б., Фадеева О.В. Начально-граничная задача для уравнения вынужденных колебаний консольной балки // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2021. Т. 25. № 1. С. 51–66. DOI: 10.14498/vsgtu1845

18. Мирсаидов М.М., Султанов Т.З., Руми Д.Ф. Оценка динамического поведения системы «сооружение – основание» с учетом волнового уноса энергии // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 4 (39). С. 94–105. DOI: 10.5862/MCE.39.10

Информация об авторах

Григоренко Александр Александрович, ассистент кафедры «Технология машиностроения». E-mail: grigorenko1998@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дуюн Татьяна Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения». Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 23.03.2023 г.

© Григоренко А.А., Дуюн Т.А., 2023

***Grigorenko A.A., Duun T.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: grigorenko1998@yandex.ru*

SIMULATION OF NATURAL FREQUENCIES AND FORCED OSCILLATION MAGNITUDES OF A VERTICAL MILLING MACHINE

Abstract. The article demonstrate the technique for modeling the form of natural oscillations, as well as the amplitude and mode of forced oscillations of the HAAS VF-1 vertical milling machine. As initial data, a publicly available 3D model of load-bearing elements, information on the mass and dimensions of the spindle motor are used. In preparation for the simulation, the original solid model is idealized by removing small chamfers, fillets, and small diameter holes. Movable joints with linear rolling guides and ball bearings are replaced by rigid joints, since vibration damping in these units is not considered. During the first simulation, ten natural frequencies with the largest values of the oscillation amplitude are obtained. The second simulation shows, the influence of the spindle drive layout (coaxial installation of the electric motor with the spindle through a cam clutch or connection using a toothed belt transmission) and additional devices for dissipating vibration energy (mass and structural dampers in the form of structural elements articulated through plastic bushings) is revealed by the magnitude of forced steady-state oscillations that may occur during the processing of the part.

Keywords: vertical milling machine, natural oscillations, forced oscillations, finite element analysis.

REFERENCES

1. Denisenko A.F., Gasparova L.B. Dynamic calculation of a CNC lathe drive [Dinamicheskij raschet privoda tokarnogo stanka s CHPU]. Aktual'nye problemy v mashinostroenii. 2022. No. 3 Pp. 20–26. (rus)
2. Denisenko A.F., Gasparova L.B. Estimation of resonant modes of the drive of the main movement of a lathe with stepless regulation [Ocenka rezonansnyh rezhimov privoda glavnogo dvizheniya tokarnogo stanka s besstupenchatym regulirovaniem]. Transportnoe mashinostroenie. 2022. No. 9 Pp. 11–21. DOI: 10.30987/2782-5957-2022-9-11-21 (rus)
3. Gavrilov A.A., Morozov N.A., Vlasov Yu.L. Methodology for calculating the natural frequencies of crane beams [Metodika Rascheta sobstvennyh chastot kran-balok]. Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. No. 1 (176). Pp. 212–217. (rus)

19. Алюшин Ю.А. Энергетическая основа резонанса в упругих телах // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 22. № 5. С. 42–53. DOI: 10.24411/1683-805X-2019-15006

4. Ryzhikov I.N. The use of spring-mass-damper models in the analysis of oscillations of impellers of power turbomachines with detuning of system parameters [Ispol'zovanie pruzhinno-massovo-dempfernyh modelej pri analize kolebanij rabochnih koles energeticheskikh turbomashin s rasstrojkoj parametrov sistemy]. Metody. Tekhnologii. 2020. No. 4 (48). Pp. 20–25. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-4-20-25 (rus)
5. Shevelev N.A., Dombrovskij I.V. Numerical study of the dynamic behavior of rotating structures [Chislennoe issledovanie dinamicheskogo povedeniya vrashchayushchihsya konstrukcij]. Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mekhanika. 2009. No. 1. Pp. 151–159. (rus)
6. Kul'terbaev H.P., Alokova M.H., Baragunova L.A. Mathematical modeling of flexural vibrations of a vertical bar with a variable crossection

[Matematicheskoe modelirovanie izgibnyh kolebanij vertikal'nogo sterzhnya peremennogo secheniya]. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki. 2015. No. 4 (185). Pp. 100–106. DOI: 10.17213/0321-2653-2015-4-100-106 (rus)

7. Leont'ev E.V. Transverse vibrations of a beam with free edges on an elastic foundation under the action of a dynamic load [Poperechnye kolebaniya balki so svobodnymi krayami na uprugom osnovanii pri dejstvii dinamicheskoy nagruzki]. Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2020. No. 3 (89). Pp. 31–44. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-89-3-31-44 (rus)

8. Vorobel' V.M., Popov G.YA., Reut V.V. Forced vibrations of a box-shaped shell with a square section [Vynuzhennye kolebaniya korobchatoy obolochki kvadratnogo secheniya Izvestiya Rossijskoj akademii nauk]. Mekhanika tverdogo tela. 2009. No. 6. Pp. 115–123. (rus)

9. HaasAutomationInc. [website]. URL: <https://www.haascnc.com/ru/machines/vertical-mills/vf-series/models/small/vf-1.html> - 2022.

10. Slocum A.H. Precision machine design Prentice-Hall Inc, 1992 750 p.

11. Ahmethanov R.S. Influence of damage to structural elements on the dynamic characteristics of the system [Vliyanie povrezhdenosti elementov konstrukcii na dinamicheskie harakteristiki sistemy]. Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 2015. No 6. Pp. 63–69. (rus)

12. Arutyunyan M.V. Dynamic testing of railway platforms made of composite fiberglass [Arutyunyan A.M. Dinamicheskie ispytaniya zhelezodorozhnyh platform iz kompozicionnogo stekloplastika]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2016. No. 12. Pp. 50–54. (rus)

13. Radoicic G., Jovanovic M. Experimental identification of overall structural damping of system Journal of mechanical engineering. 2013. Vol. 4. Pp. 260–268. DOI:10.5545/sv-jme.2012.569

14. Goncharov P.S., Artamonov I.A., Halitov T.F., Denisihin S.V., Sotnik D.E. NX Advanced Simulation. Inzhenernyj analiz. Moskva DMK Press. 2012. 504 p. (rus)

15. Kravcova E.A., Kuprava I.V. Mathematical model of natural frequencies of bending vibrations of a rod In the collection: Innovative scientific research in the modern world: theory, methodology, practice [Matematicheskaya model' sobstvennyh chastot izgibnyh kolebanij sterzhnya V sbornike: Innovacionnye nauchnye issledovaniya v sovremenom mire: teoriya, metodologiya, praktika]. Sbornik nauchnyh statej po materialam VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Ufa, 2022. Pp. 31–42. (rus)

16. Kozlov V.A. Free vibrations of cantilever clamped prismatic thin-walled structures [Svobodnye kolebaniya konsol'no zashchemlennyh prizmaticheskikh tonkostennyh konstrukcij]. Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura. 2013. No. 2 (30). Pp. 9–17. (rus)

17. Sabitov K.B., Fadeeva O.V. Initial-boundary problem for the equation of forced vibrations of a cantilever beam [Nachal'no-granichnaya zadacha dlya uravneniya vynuzhennyh kolebanij konsol'noj balki]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki. 2021. No. 25. Pp. 51–66. DOI: 10.14498/vsgtu1845 (rus)

18. Mirsaidov M.M., Sultanov T.Z., Rumi D.F. Evaluation of the dynamic behavior of the "construction - foundation" system, taking into account the wave entrainment of energy [Ocenka dinamicheskogo povedeniya sistemy "sooruzhenie – osnovanie" s uchetom volnovogo unosa energii]. Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2013. No. 4 (39). Pp. 94–105. (rus) DOI: 10.5862/MCE.39.10

19. Alyushin Yu.A. [Energeticheskaya osnova rezonansa v uprugih telah]. Fizicheskaya mezhmekhanika. 2019. No. 22. No. 5. Pp. 42–53. DOI: 10.24411/1683-805X-2019-15006 (rus)

Information about the authors

Grigorenko, Alexander A. E-mail: grigorenko1998@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Duun, Tatyana A. Doctor of Engineering Science, professor of the Department of Technology of machine building. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 23.03.2023

Для цитирования:

Григоренко А.А., Дуюн Т.А. Моделирование собственных частот и амплитуды вынужденных колебаний вертикально-фрезерного станка // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 6. С. 76–84. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-76-84

For citation:

Grigorenko A.A., Duun T.A. Simulation of natural frequencies and forced oscillation magnitudes of a vertical milling machine. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 6. Pp. 76–84. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-76-84

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-85-93

¹*Ханина Е.Г., ¹Гуденко О.В., ²Мордовская О.С., ¹Анциферов С.И., ¹Богданов В.С.¹Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова²Белгородский государственный национальный исследовательский университет

*E-mail: dronovahanina@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЩЕЛЕВЫХ ОТВЕРСТИЙ В ЛОПАСТЯХ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЛОПАСТНОГО СМЕСИТЕЛЯ НА КАЧЕСТВО ПОДГОТОВКИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СУХОЙ СМЕСИ

Аннотация. Степень однородности распределения в смеси компонентов во многом определяет качественные характеристики приготовленного из нее продукта. Для смешивания компонентов в сухом состоянии на предприятиях различных отраслей промышленности достаточно широко распространено использование горизонтальных лопастных смесителей. В конкурентных условиях функционирования предприятий возникает необходимость разработки технических решений, позволяющих обеспечивать повышение эффективности действующего смесительного оборудования на предприятиях в условиях плановых ремонтных мероприятий. Рассмотрена возможность повышения степени однородности мелкозернистой смеси в горизонтальном лопастном смесителе при выполнении в лопастях сквозных щелевых отверстий. С использованием известного программного продукта осуществлено имитационное моделирование процессов сухого смешивания двух мелкозернистых компонентов в моделях корпуса смесителя с различными конструкциями лопастей. Для исследования процесса смешивания использован метод математического планирования эксперимента. Проведены исследования полученной регрессионной зависимости, характеризующей изменение коэффициента неоднородности двухкомпонентной сухой смеси в зависимости от количества щелевых отверстий и их ширины, установлены области рациональных значений исследуемых параметров. Осуществлено сравнение состояний смеси в корпусах смесителя со щелевыми отверстиями в лопастях и без отверстий. Установлено, что при установившихся состояниях процессов смешивания смесь в модели корпуса смесителя со щелевыми отверстиями в лопастях характеризуется более равномерным распределением частиц. Коэффициент неоднородности, характеризующий качество этой смеси, меньше, чем у смеси в модели корпуса с лопастями без отверстий.

Ключевые слова: сухая смесь, лопастной горизонтальный смеситель, щелевые отверстия, имитационное моделирование, коэффициент неоднородности.

Введение. На предприятиях обрабатывающей промышленности процессы смешивания различных материалов преимущественно относятся к основным технологическим процессам. Степень однородности распределения в смеси компонентов во многом определяет качественные характеристики приготовленного из нее продукта [1–3]. Это характеризует роль процесса смешивания как одного из основных технологических процессов на промышленных производствах. В зависимости от особенностей технологической переработки материалов на предприятии состояние смеси может быть жидким, пластичным и сухим. Смешивание компонентов в сухом состоянии распространено на предприятиях по производству строительных материалов, фармацевтических, пищевых, химических и многих других. Выбор машины для приготовления смеси определяется ее производительностью, количеством смешиваемых компонентов и их характеристиками, требованиями к качеству смеси и рядом других. На промышленных предприятиях, как малых, так и крупных, для пригото-

вления сухих смесей достаточно широкое распространение получили горизонтальные лопастные смесители [2, 4–7]. Они характеризуются универсальностью применения, простотой конструкции, возможностью автоматизации процесса, относительно высокой производительностью. В конкурентных условиях функционирования предприятий возникает необходимость расширения номенклатуры продуктов производства, увеличения требований к их качеству, что может обеспечиваться повышением степени однородности компонентов смеси. Промышленные горизонтальные лопастные смесители, несмотря на отмеченную простоту, являются достаточно дорогостоящими машинами, и их замена на более эффективные конструкции влечет за собой большие материальные затраты на реконструкцию смесительного комплекса и убытки, обусловленные простоем оборудования. В этой связи разработка технических решений, обеспечивающих повышение эффективности действующего смесительного оборудования в условиях плановых ремонтных мероприятий, создает предприятию конкурентные преимущества.

С целью повышения степени однородности мелкозернистой смеси предложена конструкция лопастей горизонтального смесителя со щелевыми сквозными отверстиями, продольные оси которых расположены на частях дуг concentричных окружностей, соосных продольным осям валов, на которых расположены лопасти [8]. Лопасти при вращательном движении осуществляют упорядоченное воздействие на смешиваемые материалы [9–11]. Перед промежутками между отверстиями возникают уплотнения частиц, вдавливаемые в смешиваемую среду, и перетоки через щелевые отверстия частиц, находящихся перед этими отверстиями. В этих условиях происходит эффективное смешивание мелкозернистых частиц материала. Рассматриваемое техническое решение отличается простотой исполнения в условиях плановых ремонтных мероприятий предприятия, проводимых на смесительном технологическом комплексе.

Методы, оборудование, материалы. Предположение об эффективности подготовки мелкозернистой смеси в смесителе рассматриваемой конструкции требует подтверждения, которое целесообразно разделить на этапы математического описания процесса смешивания компонентов, установления рациональных областей конструктивных, технологических параметров и их использования для физического моделирования процесса смешивания, а также сравнения показателей работы смесителя с лопастями традиционной конструкции и с предлагаемыми отверстиями. Выполнение указанных мероприятий является длительным и трудоемким процессом, в результате которого возможно получение отрицательного результата. Поэтому на начальном этапе предпочтительно проведение экспресс-оценки эффективности применения лопастей со сквозными щелевыми отверстиями. Для этих целей могут применяться известные методы и программные продукты, позволяющие осуществлять моделирование технологических процессов и анализ результатов [12–16].

Для имитационного моделирования процесса смешивания многокомпонентных сред применялся программный продукт EDEM, который используется при исследовании технологи-

ческих процессов [17–19]. Отличительной особенностью мелкозернистой смеси является наличие очень большого количества частиц в корпусе смесителя, которое, в зависимости от их крупности, размеров корпуса экспериментальной модели может составлять сотни тысяч штук. Это затрудняет решение задачи, требует наличие специализированных вычислительных средств и достаточно большого ресурса машинного времени, которое даже для проведения одного эксперимента исчисляется сотнями часов. Для упрощения процедуры проведения эксперимента с использованием персонального компьютера разработаны цифровые модели корпуса смесителя ограниченной длины, с установленными на валу двумя лопастями, воздействующие на смешиваемый материал в направлениях друг к другу. На первой модели лопасти имеют сквозные щелевые отверстия, которые равномерно распределены по их высоте. На второй модели лопасти выполнены без отверстий. Характеристика моделей корпуса смесителя приведена в табл. 1. Цифровая модель корпуса с лопастями, имеющими по два отверстия приведена на рис. 1.

При анализе процесса смешивания материалов могут рассматриваться различные характеризующие его параметры [20, 21, 22]. В этой работе использовался достаточно широко применяемый коэффициент неоднородности смеси V_c , который, согласно [20, 2, 3], является более предпочтительным:

$$V_c = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}, \quad (1)$$

где $\bar{c}$ – среднее арифметическое значение концентрации ключевого компонента во всех рассматриваемых n пробах смеси, %; c_i – значение концентрации ключевого компонента в i -ой пробе, %; n – число проанализированных проб, шт.

Рассматривалось приготовление двухкомпонентной смеси с содержанием ключевого компонента $c_0=20$ %. Цифровая модель корпуса смесителя с загруженными частицами в состоянии перед началом процесса смешивания показана на рис. 2. Характеристика смешиваемых частиц приведена в табл. 2.

Таблица 1

Характеристика конструктивно-технологических параметров моделей корпусов смесителей

Параметр							
Длина корпуса, L_k , м	Ширина корпуса, H_k , м	Угол наклона лопастей, α_l , рад	Высота лопастей, l_l , м	Ширина лопастей в расширенной части, h_l , м	Расстояние между лопастями, l_m , м	Диаметр описываемых лопастями окружностей, D_l , м	Частота вращения валов, n_v , с ⁻¹
0,088	0,168	0,52	0,051	0,04	0,05	0,16	1,0

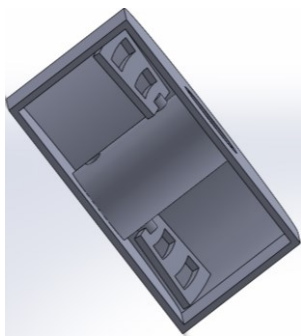


Рис. 1. Цифровая модель корпуса смесителя с выполненными отверстиями в лопастях

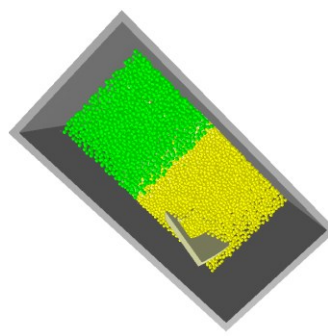


Рис. 2. Цифровая модель корпуса смесителя с загруженными частицами в состоянии перед началом процесса смешивания

Таблица 2

Характеристика смешиваемых частиц

Компонент		Параметр			
		Плотность, ρ , кг/м ³	Диаметр, d , 1×10^{-3} м	Общая масса частиц, m , кг	Количество частиц, n , штуки
№1		3000	3	0,96	22537
№2		2500	2,5	0,24	11577

Внутренний объем корпуса смесителя условно разбивался на N элементарных объемов (рис. 3). Минимально допустимая масса пробы, заключенная в рассматриваемом элементарном объеме, согласно [20] рассчитывалась как:

$$G_m = \frac{10^4 \pi d_k^3 \rho}{2,5 c_0}, \quad (2)$$

где d_k – среднеарифметический диаметр частиц ключевого компонента, м; ρ – плотность материала частиц, кг/м³

Расчетное значение минимально допустимой массы пробы составило $G_m = 0,025$ кг.

Для установления влияния количества щелевых отверстий $n_{от}$ в лопастях, их ширины $a_{от}$ на коэффициент неоднородности смеси V_c и определения их рациональных значений проведение численного эксперимента осуществлялось с использованием метода математического планирования эксперимента по ЦКОП 2^2 [23]. В табл. 3

приведены исследуемые факторы и уровни их варьирования. Длительность процесса смешивания устанавливалась индивидуально для каждого эксперимента в зависимости от начала установившегося его состояния.

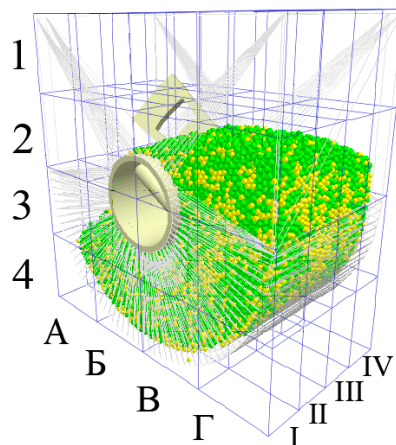


Рис. 3. Схема разделения корпуса смесителя на элементарные объемы

Таблица 3

Уровни варьирования факторов по ЦКОП 2^2

№ п/п	Факторы			Единицы измерения	Интервал	Уровни варьирования		
	Наименование	Обозначение						
		Кодированный вид	Натуральный вид					
1	Ширина отверстия	X_1	$a_{от}$	1×10^{-3} м	5	5	10	15
2	Количество отверстий	X_2	$n_{от}$	шт.	1	1	2	3

Расчет коэффициента неоднородности смеси по выражению (1), минимально допустимой массы пробы по выражению (2), а также коэффициентов уравнения регрессии, проверка их значимости, воспроизводимости опытов и адек-

ватности уравнения осуществлялось с использованием Microsoft Excel. Исследование, расчет уравнения регрессии, построение с его использованием графических зависимостей выполнялось в программной среде Maple.

Основная часть. Полученное уравнение регрессии, адекватно описывающее коэффициент неоднородности двухкомпонентной смеси для

$$V_c = 5,334 - 0,1144a_{от} - 0,924n_{от} - 0,0956a_{от} \cdot n_{от} + 0,01748a_{от}^2 + 0,472n_{от}^2. \quad (3)$$

Рассматриваемая зависимость определена при значениях ширины отверстий в интервале $5 \text{ мм} \leq a_{от} \leq 15 \text{ мм}$ и целых значениях количества отверстий $n_{от}=1$ шт., 2 шт., 3 шт. Минимальное значение функции $V_c=4,04$ % достигается при $a_{от}=8,7 \times 10^{-3}$ м и $n_{от}=2$ шт., максимальное $V_c=5,67$ % – при $a_{от}=15 \times 10^{-3}$ м и $n_{от}=1$ шт.

На рис. 4 приведены построенные с использованием полученного уравнения графические зависимости. Для варианта выполнения одного отверстия на каждой лопасти увеличение его ширины в рассматриваемом диапазоне значений $a_{от}=(5...15) \times 10^{-3}$ м приводит к возрастанию значений функции с $V_{c11}=4,27$ % до $V_{c12}=5,67$ %. В случае применения лопастей с двумя отверстиями увеличение их ширины с $a_{от21}=5 \times 10^{-3}$ м до $a_{от22}=8,7 \times 10^{-3}$ м приводит к уменьшению значений функции с $V_{c21}=4,28$ % до $V_{c22}=4,04$ %. Последующее увеличение ширины отверстий до $a_{от23}=15 \times 10^{-3}$ м приводит к увеличению V_c до $V_{c23}=4,72$ %. При исполнении лопастей с тремя отверстиями увеличение их ширины от минимального значения $a_{от31}=5 \times 10^{-3}$ м приводит к уменьшению величины коэффициента неоднородности с $V_{c31}=5,24$ % до $V_{c32}=4,51$ %, получаемого при $a_{от32}=11,48 \times 10^{-3}$ м. Дальнейшее увеличение ширины отверстий приводит к росту величины V_c , которое при максимальной рассматриваемой их ширине $a_{от33}=15 \times 10^{-3}$ м принимает значение $V_{c23}=4,72$ %. Рассмотренное сочетание количества щелевых отверстий на лопастях модели смесителя и их ширины характеризует возможность максимального уменьшения значений функции в 1,40 раза с $V_{c12}=5,67$ % до $V_{c22}=4,04$ %.

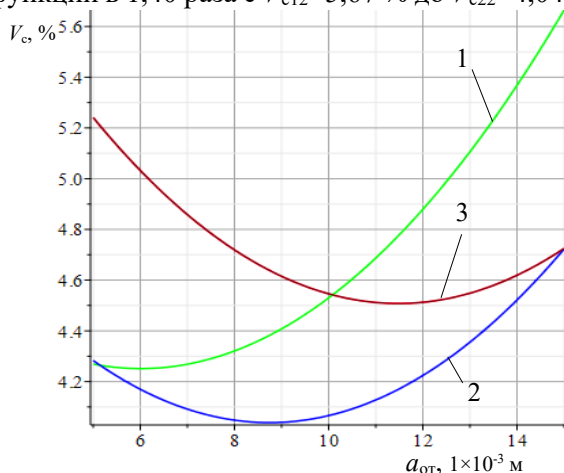


Рис. 4. Графические зависимости V_c от $a_{от}$ при: 1 – $n_{от}=1$ шт., 2 – $n_{от}=2$ шт., 3 – $n_{от}=3$ шт.

модели с лопастями, имеющими щелевые отверстия, в натуральной форме имеет вид:

При оценке эффективности процесса смешивания рассмотрена модель корпуса смесителя с лопастями, имеющими по два щелевых отверстия шириной $a_{от}=5 \times 10^{-3}$ м, для которой состояние смеси характеризуется коэффициентом неоднородности, достаточно близким к минимальному значению рассмотренной зависимости (1). Визуальная оценка эффективности процесса смешивания в моделях корпусов смесителей как со щелевыми отверстиями в лопастях, так и без них, устанавливалась сравнением приведенных на рис. 5 иллюстраций состояния смесей через время $t=29$ с после начала процессов. Состояние смеси в корпусе смесителя со щелевыми отверстиями в лопастях характеризуется более равномерным распределением частиц. Более конкретными и информативными являются значения коэффициента неоднородности смеси, получаемые на интервале времени от начала процесса смешивания до его окончания, а также на интервале, включающем время смешивания с установившимся состоянием процесса. Зависимости коэффициента неоднородности от времени смешивания для рассматриваемых моделей корпусов смесителей приведены на рис. 6. Значения V_c определялись с интервалом в 1 с начиная с первой секунды экспериментов. Для удобства описания изменений у коэффициента неоднородности смеси введены соответствующие индексы. Если у модели смесителя лопасти имеют отверстия – то обозначается как $V_{c.от}$, если отверстий нет – $V_{c.б}$. При изменении временного интервала течения процесса смешивания к указанным индексам добавляется характеризующая этот интервал цифра. Например, через одну секунду после начала процесса – $V_{c.от1}$, $V_{c.б1}$ и т. д.

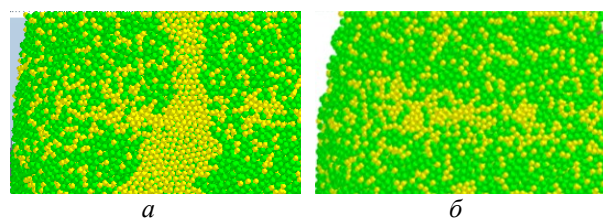
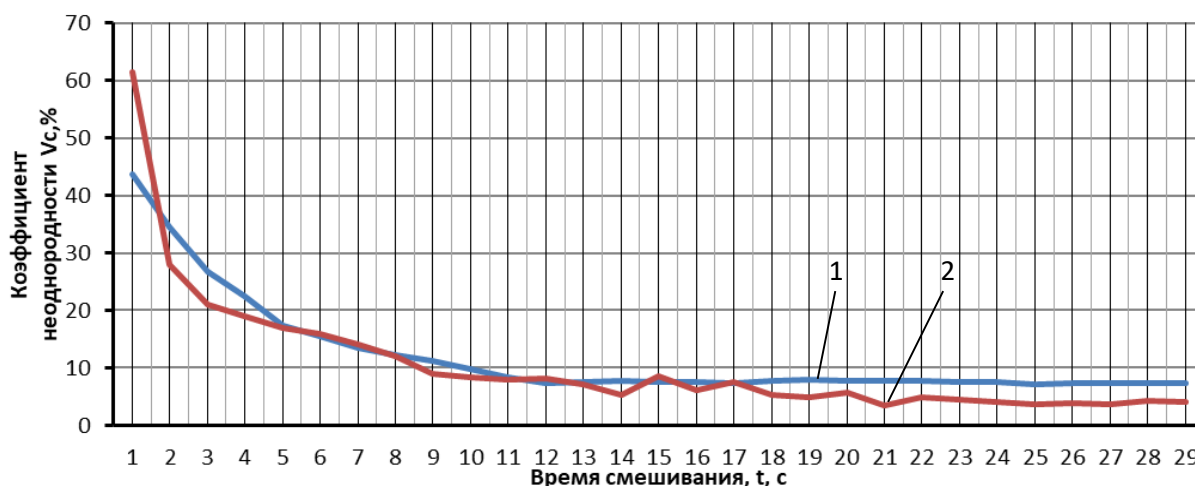


Рис. 5. Иллюстрации состояния смесей, полученных при времени смешивания $t=29$ с на моделях смесителя:

а – с лопастями без отверстий, б – с лопастями, имеющими по два щелевых отверстия шириной $a_{от}=5 \times 10^{-3}$ м

Рис. 6. Зависимости $V_{с.от}$ от t для моделей смесителя:

1 – с лопастями без отверстий, 2 – с двумя щелевыми отверстиями шириной $a_{от}=5 \times 10^{-3}$ м в каждой из лопастей

Для модели смесителя с лопастями, имеющими щелевые отверстия, наблюдается интенсивное изменение $V_{с.от}$ в течение первых трех секунд до значения $V_{с.от3}=21,29$ %. Затем, на временном интервале, включающем четырнадцатую секунду, его уменьшение происходит относительно равномерно и принимает значение $V_{с.от14}=5,72$ %. Дальнейшее изменение $V_{с.от}$ на временном интервале до двадцать первой секунды характеризуется неравномерностью – некоторые последующие значения $V_{с.от}$ превышают предыдущие, причем эти превышения уменьшаются с течением времени процесса. Время $t=21$ с можно считать завершением процесса смешивания, при котором $V_{с.от}$ принимает значение $V_{с.от21}=3,51$ %. На временном интервале от $t=21$ с до $t=29$ с наблюдаются незначительные колебания значений $V_{с.от}$ и состояние процесса смешивания на нем можно отнести к установившемуся. Среднее значение коэффициента неоднородности на этом интервале составляет $V_{с.от}^{cp}=4,15$ %. Для модели смесителя с лопастями без отверстий за первую секунду процесса смешивания происходит значительное уменьшение $V_{с.б}$ до $V_{с.б1}=44,52$ %. Затем на временном интервале, включающем седьмую секунду, его уменьшение происходит с постепенным уменьшением разницы между предыдущим и последующим значениями и при $t=7$ с состояние смеси характеризуется $V_{с.б7}=13,79$ %. Дальнейшее уменьшение $V_{с.б}$ на временном интервале, включающем двенадцатую секунду, характеризуется относительной равномерностью и при $t=12$ с соответствует значению $V_{с.б12}=7,56$ %. На временном интервале от $t=13$ с до $t=17$ с происходит медленное уменьшение $V_{с.б}$. Время $t=17$ с можно считать завершением процесса смешивания, при котором $V_{с.б}$ принимает значение $V_{с.б17}=7,23$ %. На временном интервале от $t=17$ с до $t=29$ с наблюдаются незначительные колебания значений $V_{с.б}$ и состояние

процесса смешивания можно отнести к установившемуся. Среднее значение коэффициента неоднородности на этом интервале составляет $V_{с.б}^{cp}=7,49$ %.

Таким образом установлено, что при установившихся состояниях процессов смешивания в рассматриваемых моделях корпусов смесителя среднее значение коэффициента неоднородности смеси $V_{с.б}^{cp}=7,49$ % в 1,8 раза превышает $V_{с.от}^{cp}=4,15$ %. Время $t=17$ с для перехода процесса смешивания в установившееся состояние в модели корпуса смесителя с лопастями без отверстий в 1,2 раза меньше времени $t=21$, необходимого для перехода процесса смешивания в установившееся состояние в модели корпуса смесителя с лопастями, имеющими по два щелевых отверстия с $a_{от}=5 \times 10^{-3}$ м. Причем на момент времени $t=17$ с коэффициенты неоднородности смесей в обеих рассматриваемых моделях корпуса имеют достаточно близкие значения. Последующее продолжение моделирования процессов смешивания приводит смесь в модели корпуса с лопастями без отверстий в установившееся состояние, а в модели корпуса с лопастями, имеющими щелевые отверстия, – к уменьшению значений $V_{с.от}$.

Выводы.

1. Показана целесообразность разработки технических решений, позволяющих обеспечивать повышение эффективности действующего смесительного оборудования на предприятиях в условиях плановых ремонтных мероприятий. Рассмотрена возможность повышения степени однородности мелкозернистой смеси в горизонтальном лопастном смесителе при выполнении в лопастях сквозных щелевых отверстий.

2. С использованием известного программного продукта осуществлено имитационное моделирование процессов смешивания двух мелко-

зернистых компонентов в моделях корпуса смесителя с различными конструкциями лопастей. В качестве характеризующего процесс смешивания параметра рассмотрен коэффициент неоднородности V_c . Для исследования процесса смешивания использован метод математического планирования эксперимента по плану ЦКОП 2².

3. С использованием полученной регрессионной зависимости и программной среды *Maple* проведены исследования процесса смешивания в модели корпуса смесителя со щелевыми отверстиями в лопастях. В качестве варьируемых параметров рассмотрены ширина щелевых отверстий в интервале $5 \text{ мм} \leq a_{от} \leq 15 \text{ мм}$ и количество отверстий $n_{от}=1$ шт., 2 шт., 3 шт. Рассмотренное сочетание количества щелевых отверстий на лопастях модели смесителя и их ширины характеризует возможность максимального уменьшения значений функции в 1,40 раза с $V_{c12}=5,67 \%$ до $V_{c22}=4,04 \%$. Минимальное значение функции достигается при $a_{от}=8,7 \times 10^{-3} \text{ м}$ и $n_{от}=2$ шт.

4. При оценке эффективности процессов смешивания определено, что состояние смеси в корпусе смесителя со щелевыми отверстиями в лопастях характеризует более равномерным распределением частиц. Установлено, что при установившихся состояниях процессов смешивания в модели корпуса смесителя с лопастями без отверстий среднее значение коэффициента неоднородности смеси $V_{c.б}^{cp} = 7,49 \%$ в 1,8 раза превышает аналогичный показатель $V_{c.от}^{cp} = 4,15 \%$ для смеси в модели корпуса смесителя с лопастями, имеющими по два щелевых отверстия с шириной $a_{от} = 5 \times 10^{-3} \text{ м}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов Ю.М., Коровяков В.Ф., Денисов Г. А. Технология сухих строительных смесей. М: Издательство АСВ, 2015. 112 с.
2. Кикин Н.О. Определение коэффициента неоднородности сухой строительной смеси в горизонтальном лопастном смесителе со стержневыми элементами // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2023. №18. С. 67–72.
3. Шеметова О. М., Фадин Ю. М., Анциферов С. И., Загороднюк Л. Х., Аль Мамури Саад К. Ш. Проведение лабораторных исследований по определению неоднородности смеси в пневматическом смесителе // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. №17–1. С. 144–149.
4. Фадин Ю. М., Шеметова О. М. Сухие строительные смеси и смесительное оборудование для их производства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. №12. С.145–150.

5. Yao Y., Feng Z., Chen S., Li B. Q., Zhao L., Zhao W. A Double-Blade Mixer for Concrete with Improved Mixing Quality // New Materials and Advanced Materials. 2016. No. 41. Pp. 4809–4816.
6. Yao Y., Feng Z., Chen S. Strength of concrete reinforced using double-blade mixer // New Materials and Advanced Materials. 2013. No. 65. Pp. 787–792.
7. Ханин С.И., Воронов В.П., Кикин Н.О., Мордовская О.С. Определение времени подготовки смеси в горизонтальном лопастном смесителе с установленными цилиндрическими стержневыми элементами // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. №17–2. С. 265–272.
8. Пат.192657, Российская Федерация, МПК В28С 5/14. Лопастной смеситель материалов / Ханин С. И., Мордовская О. С., Богданов В. С., Ханина Е. Г.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». №2021137973; заявл. 21.12.2021; опубл. 05.05.2022, Бюл. № 13. 9 с.
9. Дёмин О.В., Першин В.Ф., Смолин Д. О. Интенсификация смешивания сыпучих материалов в лопастном смесителе // Химия и химическая технология. 2012. №8. С. 108–111.
10. Маслов А. Г., Саленко Ю. С. Исследование взаимодействия лопатки вибрационного смесителя с бетонной смесью. // Вестник ХНАДУ. 2014. № 65–66. С. 44–48.
11. Алексеев А. В., Шищенко Е. В. Исследование рабочего процесса роторного разбрасывателя сыпучих грузов с криволинейным профилем лопастей // Вестник НГИЭИ. 2018. №7. С. 29–39.
12. Rovero G., Piccinini N. Particle mixing and segregation // Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications. 2011. No. 11. Pp. 141–160.
13. Valigi M.C., Logozzo S., Landi L., Braccisi C., Galletti L. Twin-Shaft Mixers' Mechanical Behavior Numerical Simulations of the Mix and Phases // Machines. 2019. No. 7. Pp. 39–52.
14. Valigi M.C., Gasperini I. Model-based method predicting useful life of concrete mixers // Plant Precast Technol. 2020. No. 71. Pp. 38–42.
15. Кафаров В.В., Глебов М. Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств. Москва: Издательство Юрайт, 2019. 403 с.
16. Ханин С.И., Воронов В.П., Кикин Н.О., Мордовская О.С. Исследование изменения концентрации ключевого компонента сухой смеси в

горизонтальном лопастном смесителе с цилиндрическими стержнями // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2022. №. 2. С. 94–101.

17. Cai R., Hou Z., Zhao Y. Numerical study on particle mixing in a double-screw conical mixer // Journal Powder Technology. 2019. No 352. Pp. 193–208.

18. Moon I., Kim J., Roh J., Lee M.S. DEM Study of a Mixer for Core Manufacturing System // Journal Computer Aided Chemical Engineering. 2019. No 46. Pp 799–804.

19. Bogdanov V.S., Khakhalev P.A., Bogdanov N.E., Gavrunov A.J. The application of EDEM software for design parameters calculation of a ball mill lining // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 9. No 11. Pp. 869–873.

20. Макаров Ю.И. Аппараты для смешивания сыпучих материалов. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.

21. Першин В.Ф., Однолько В.Г., Першина С.В. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа. М.: Машиностроение, 2009. 220 с.

22. Веригин А.Н., Незамаев Н.А., Данильчук В.С. Машины и аппараты переработки дисперсных материалов. Основы проектирования. ЭБС Лань, 2018. 536 с.

23. Юдин Ю.В., Майсурадзе М.В., Водолазский Ф.В. Организация и математическое планирование эксперимента: учебное пособие / Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 124 с.

Информация об авторах:

Ханина Елена Геннадьевна, аспирант кафедры механического оборудования. E-mail: dronovahanina@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Гуденко Олег Витальевич, магистрант кафедры механического оборудования. E-mail: oleg.gudenko2014@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Мордовская Ольга Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных технологий. E-mail: unique.ox@gmail.com. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

Анциферов Сергей Игоревич, кандидат технических наук, зав. кафедрой механического оборудования. E-mail: anciferov.sergey@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Богданов Василий Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры механического оборудования. E-mail: v.bogdanov1947@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 03.05.2023 г.

© Ханина Е.Г., Гуденко О.В., Мордовская О.С., Анциферов С.И., Богданов В.С., 2023

^{1,*}Khanina E.G., ¹Gudenko O.V., ²Mordovskaya O.S., ¹Antsiferov S.I., ¹Bogdanov V.S.

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

²Belgorod State National Research University.

*E-mail: dronovahanina@gmail.com

INVESTIGATION OF INFLUENCE OF SLOTTED HOLES IN BLADES OF HORIZONTAL BLADE MIXER ON QUALITY OF PREPARATION OF TWO-COMPONENT DRY MIXTURE

Abstract. The degree of uniformity of distribution in the mixture of components largely determines the qualitative characteristics of the product prepared from it. For dry mixing of components, the use of horizontal blade mixers is quite widespread in enterprises of various industries. In the competitive conditions of the operation of enterprises, it becomes necessary to develop technical solutions that allow to increase the efficiency of operating mixing equipment at enterprises in the conditions of planned repair measures. Possibility of increasing degree of homogeneity of fine-grained mixture in horizontal blade mixer when through slot holes are made in blades is considered. Using a known software product, imitated simulations of dry mixing processes of two fine-grained components in models of a mixer body with different blade designs are performed. To study the mixing process, the method of mathematical planning of the experiment is used. Researches of obtained regression dependence characterizing change of coefficient of heterogeneity of two-component dry mixture

depending on number of slit holes and their width are carried out, areas of rational values of studied parameters are established. State of mixture in mixer housings is compared with slotted holes in blades and without holes. It has been found that with steady state mixing processes, the mixture in the mixer body model with slotted holes in the blades has a more uniform particle distribution. The heterogeneity factor characterizing the quality of this mixture is less than that of the mixture in the model of a body with blades without holes.

Keywords: dry mix, vane horizontal mixer, slot holes, simulation, heterogeneity factor.

REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M., Korovyakov V.F., Denisov G.A. Dry mortar technology. [Tehnologiya suhih stroitel'nykh smesey]. M: Publishing house ACB, 2015, 112 p. (rus)
2. Kikin N.O. Determining the coefficient of heterogeneity of a dry construction mixture in a horizontal blade mixer with rod elements [Opredelenie koeffitsienta neodnorodnosti suhoj stroitel'noj smesi v gorizont'al'nom lopastnom smesitele so sterzhnevymi elementami]. Transport, mining and construction engineering: science and production. 2023. No. 18. Pp. 67–72. (rus)
3. Shemetova O.M., Fadin Y.M., Antsiferov S.I., Zagorodnyuk L.H., Al Mamuri Saad K.Sh. Laboratory studies to determine the heterogeneity of the mixture in a pneumatic mixer. Transport, mining and construction engineering [Provedenie laboratornykh issledovanij po opredeleniyu neodnorodnosti smesi v pnevmaticheskom smesitele]: science and production. 2022. No. 17–1. Pp. 144–149. (rus)
4. Fadin Yu.M., Shemetova O.M. Dry construction mixtures and mixing equipment for their production [Suhie stroitel'nye smesi i smesitel'noe oborudovaniya dlya ih proizvodstva]. Bulletin BGTU named after V.G. Shukhova. 2020. No. 12. Pp. 145–150. (rus)
5. Yao Y., Feng Z., Chen S., Li B.Q., Zhao L., Zhao W. A Double-Blade Mixer for Concrete with Improved Mixing Quality. New Materials and Advanced Materials. 2016. No. 41. Pp. 4809–4816.
6. Yao Y., Feng Z., Chen S. Strength of concrete reinforced using double-blade mixer. New Materials and Advanced Materials. 2013. No. 65. Pp. 787–792.
7. Khanin S.I., Voronov V.P., Kikin N.O., Mordovskaya O. S. Determination of the time of mixture feeding in a horizontal blade mixer with installed cylindrical rod elements [Opredelenie vremeni podgotovki smesi v gorizont'al'nom lopastnom smesitele s ustanovlennymi cilindricheskimi sterzhnevymi elementami]. Transport, mining and construction engineering: science and production. 2022. No. 17–2. Pp. 265–272.
8. Pat.192657, Russian Federation, IPC B28C 5/14. Paddle mixer of materials [Lopastnoj smesitel' materialov]. Khanin S.I., Mordovskaya O. S, Bogdanov V. S, Khanina E. G.; applicant and patent holder of the Federal state budgetary educational institution of higher education "Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova." No. 2021137973; declared. 21.12.2021; publ. 05.05.2022, Bul. No. 13. 9 p. (rus)
9. Demin O.V., Pershin V.F., Smolin D.O. Intensification of blending of loose materials in a blade mixer. Chemistry and Chemical Technology [Intensifikatsiya smeshivaniya sypuchih materialov v lopastnom smesitele]. 2012. No. 8. Pp. 108–111. (rus)
10. Maslov A.G., Salenko Yu.S. Investigation of the interaction of a vibration mixer blade with a concrete mixture [Issledovanie vzaimodeistviya lopatki vibratsionnogo smesitelya betonnoi smesy]. Bulletin of KhNARU. 2014. No. 65-66. Pp. 44–48. (rus)
11. Alekseev A.V., Shishchenko E.V. Research of the working process of a rotary spreader of bulk cargo with a curved blade profile [Issledovanie rabocheho protsessa rotornogo razbrasyvatelya sypuchikh грузов s krivolineynym profilom lopastey]. Bulletin of NNSEaEU, 2018. 7. 10. Pp. 29–39. (rus)
12. Rovero G., Piccinini N. Particle mixing and segregation. Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications. 2011. No. 11. Pp. 141–160.
13. Valigi M.C., Logozzo S., Landi L., Braccetti C., Galletti L. Twin-Shaft Mixers' Mechanical Behavior Numerical Simulations of the Mix and Phases. Machines. 2019. No. 7. Pp. 39–52.
14. Valigi M.C., Gasperini I. Model-based method predicting useful life of concrete mixers. Plant Precast Technol. 2020. No. 71. Pp. 38–42.
15. Kafarov V.V., Glebov M.B. Mathematical modeling of the main processes of chemical production [Matematicheskoe modelirovanie osnovnykh protsessov khimicheskikh proizvodstv]. Publishing House Yurayt, 2019. 403 p. (rus)
16. Khanin S.I., Voronov V.P., Kikin N.O., Mordovskaya O.S. Study of the change in the concentration of the key component of the dry mixture in a horizontal paddle mixer with cylindrical rods. [Issledovanie izmeneniya koncentracii klyuchevoogo komponenta suhoj smesi v gorizont'al'nom lopastnom smesitele s cilindricheskimi sterzhnyami]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhova. 2022. No. 2. Pp. 94–101. (rus)
17. Cai R., Hou Z., Zhao Y. Numerical study on particle mixing in a double-screw conical mixer. Journal Powder Technology. 2019. No. 352. Pp. 193–208.

18. Moon I., Kim J., Roh J., Lee M.S. DEM Study of a Mixer for Core Manufacturing System. Journal Computer Aided Chemical Engineering. 2019. No 46. Pp. 799–804.

19. Bogdanov V.S., Khakhalev P.A., Bogdanov N.E., Gavrunov A.J. The application of EDEM software for design parameters calculation of a ball mill lining. Research Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 9. No. 11. Pp. 869–873.

20. Makarov Yu.I. Apparatus for mixing bulk materials [Apparati dlya smeshivaniya sipuchih materialov]. M.: Mechanical Engineering, 1973, 216 p. (rus)

21. Pershin V.F., Odnolko V.G., Pershina S.V. Processing of loose materials in drum-type machines

[Pererabotka sypuchikh materialov v mashinakh barabannogo tipa]. M.: Mashinostroenie, 2009, 220 p. (rus)

22. Verigin A.N., Nezamaev N.A., Danilchuk V.S. Machines and devices for processing dispersed materials. Basics of design [Mashiny i apparaty pererabotki dispersnykh materialov. Osnovy proektirovaniya.]. Lan', 2018, 536 p. (rus)

23. Yudin Yu.V., Maisuradze M.V., Vodolazsky F.V. Organization and mathematical development of the experiment: textbook. [Organizatsiya i matematicheskoe planirovanie eksperimenta]. Yekaterinburg: Publishing House of the Urals. un-ta, 2018. 124 p. (rus)

Information about the authors

Khanina, Elena G. Postgraduate student of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: dronovanina@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, d. 46.

Gudenko, Oleg V. Master student of the Department of Mechanical Equipment.

E-mail: oleg.gudenko2014@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, d. 46.

Mordovskaya, Olga S. PhD, Associate Professor of the Department of Applied Informatics and Information Technologies. E-mail: unique.ox@gmail.com. Belgorod State National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Victory, 85.

Antsiferov, Sergey I. PhD, Head of the Department of Mechanical equipment. E-mail: antsiferov.sergey@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, d. 46.

Bogdanov, Vasily S. DSc, Professor of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: v.bogdanov1947@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, d. 46.

Received 03.05.2023

Для цитирования:

Ханина Е.Г., Гуденко О.В., Мордовская О.С., Анциферов С.И., Богданов В.С. Исследование влияния щелевых отверстий в лопастях горизонтального лопастного смесителя на качество подготовки двухкомпонентной сухой смеси // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 6. С. 85–93. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-85-93

For citation:

Khanina E.G., Gudenko O.V., Mordovskaya O.S., Antsiferov S.I., Bogdanov V.S. Investigation of influence of slotted holes in blades of horizontal blade mixer on quality of preparation of two-component dry mixture. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 6. Pp. 85–93. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-85-93

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-94-101

Шубин А.А., Смоловик А.Е., *Васильев В.А.

Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

*E-mail: Vitaliy27.0@yandex.ru

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАКЛОННО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация. В статье предложена концепция использования машины с комбинированным ходом на базе колесного экскаватора, оснащенного наклонно-поворотным устройством, для ремонта и текущего содержания железнодорожных путей. Текущее содержание пути включает систематический надзор за состоянием сооружений пути и путевых устройств и содержание их в состоянии, гарантирующее безопасное движение поездов. Обоснована целесообразность применения машин на комбинированном ходу и использования наклонно-поворотных устройств для различных видов работ, таких как выправка и рихтовка пути, смена шпал, планировка балластной призмы, очистка железнодорожных путей от снега и многое другое. Разработана перспективная отечественная конструкция наклонно-поворотного устройства с внедрением в конструкцию поворотного гидроцилиндра. Построена 3D модель разработанного наклонно-поворотного устройства при помощи CAD системы КОМПАС-3D. Представлен алгоритм и обобщенная методика расчета поворотного гидроцилиндра, по результатам расчетов получены зависимости значения среднего диаметра резьбы от осевой силы и значения угла подъема винтовой линии резьбы от шага резьбы и числа заходов, позволяющие выбрать наилучшие параметры резьбы.

Ключевые слова: текущее содержание и ремонт железнодорожных путей, наклонно-поворотное устройство, тилтотатор, поворотный гидроцилиндр, методика расчета.

Введение. Эффективная транспортная система является основой экономического развития любой страны. В России одним из основных видов транспорта является железнодорожный транспорт. Отличительная черта железных дорог – возможность массовых перевозок пассажиров и грузов на большие расстояния. По данным Росстата за 2021 [1] на железнодорожные перевозки приходится 46 % всего грузооборота государства. Основные преимущества данного вида перевозок: быстрота, дешевизна, регулярность и безопасность. Это возможно благодаря работе различных служб, которые занимаются текущим содержанием и ремонтом железнодорожных путей.

По мере эксплуатации на верхнее строение железнодорожного пути оказываются различные воздействия, выраженные статическими и динамическими нагрузками от подвижного состава, а также прямым влиянием окружающей среды: подмывание земляного полотна и зарастание густой растительностью, засорение балластной призмы мусором и сыпучими материалами и т.д. В зимнее время в результате перепадов температур и замерзания воды нарушаются рельсовые зазоры, образуются пучины, происходит отклонение железнодорожного пути в плане и профиле от проектного положения. Все эти факторы снижают устойчивость земляного полотна, что приводит к деформациям верхнего строения пути и нарушению безопасности движения поездов.

Для содержания железнодорожной инфраструктуры в исправном техническом состоянии производится большой комплекс работ, таких как выправка и рихтовка пути, смена шпал, планировка балластной призмы и многое другое [2]. Небольшие объёмы работ выполняются силами бригады монтеров пути с использованием путевого ручного и механизированного инструмента (шуруповёрты, костылезабивщики, шпалоподбойки и т.д.), для которого разрабатываются различные варианты модернизации [3] с целью повышения производительности и удобства эксплуатации. При выполнении больших объёмов работ используются самые разнообразные специализированные и высокопроизводительные машины, такие как: ВПРС-02 и -03, Duomatic 09-32 CSM, СЗП-600 и многие другие. Помимо этого, всегда идет работа по разработке новых высокопроизводительных комплексов [4]. Все эти машины имеют узконаправленную сферу применения и при всех своих достоинствах, таких как высокая производительность и автоматизация работы, имеют ряд серьезных недостатков: большая первоначальная стоимость, повышенная трудоемкость обслуживания и содержания парка техники. Также стоит отметить, что применение специализированных машин нецелесообразно при локальных ремонтных работах, а применение ручного труда сильно снижает производительность.

Для локальных работ по текущему содержанию верхнего строения пути целесообразно использовать универсальные и высококомбинированные машины, способные выполнять большой спектр работ. При этом время на выполнение этих работ должно сводиться к минимуму, чтобы сократить продолжительность «окон» в графике движения поездов. Для выполнения локальных ремонтов компанией Geismar был разработан комплекс, состоящий из нескольких самоходных машин, предназначенных для замены шпал и уплотнения балластной призмы [5-7]. В России на данный момент не существует машины, которая бы смогла в полной мере занять данную нишу. Поэтому предлагается конструкция машины с комбинированным ходом на базе серийного экскаватора на колесном ходу ТВЭКС ЕК 14-90 [8]. Такая машина будет способна передвигаться как по дорогам общего пользования, так и по железнодорожным путям.

Основным достоинством данной машины является ее многофункциональность и высокая мобильность. Это преимущество обеспечивается конструктивной особенностью, позволяющей за несколько минут перевести машину с колесного хода на железнодорожный и наоборот, а в случае необходимости съехать с железнодорожного пути на ближайшем переезде, что в значительной мере может сократить время технологического окна.

Модульный подход к использованию сменного оборудования позволяет выполнять различные виды работ с рельсошпальной решеткой и балластной призмой, снегоочистительные работы и так далее. В зависимости от поставленной задачи на транспортную площадку машины укладывается специализированное сменное оборудование, позволяющее производить различные виды работ.

Важными показателями при использовании сменного оборудования являются время, затраченное на снятие и установку навесного оборудования, а также точность позиционирования рабочего органа, при выполнении работ. Для этого на рукоять экскаватора устанавливается наклонно-поворотное устройство (НПУ), которое является переходным звеном между экскаватором и непосредственно самим сменным рабочим органом. За рубежом данное устройство более известно, как тилтротатор.

Материалы и методы. В ходе исследования были рассмотрены отечественные и зарубежные модели НПУ, а также проанализированы и выявлены характерные для всех рассмотренных моделей недостатки. Была предложена альтернативная конструкция НПУ со встроенным поворотным гидроцилиндром (гидроцилиндр двойного

действия с двумя встроенными передачами винт-гайка). Представлен алгоритм расчета поворотного гидроцилиндра и получены основные зависимости, позволяющие подобрать наилучшие параметры передачи. Основными нормативно-правовыми документами, использованными для определения параметров резьбы передачи винт-гайка являются ГОСТ 24737-81 и ГОСТ 24739-81.

Основная часть. НПУ представляет собой комбинацию ротатора и гидропривода, которая позволяет поворачивать ковш или другое навесное оборудование, как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости, что позволяет существенно повысить производительность, за счет более точного позиционирования рабочего органа без перемещения самого экскаватора.

Сфера применения НПУ практически безгранична и ограничивается только номенклатурой навесного оборудования. С его помощью можно проводить работы в ограниченном пространстве, поворачивать исполнительный орган под разными углами без перемещения самой машины. Кроме того, НПУ можно устанавливать и на другие виды техники.

Фирмой Engcon [9] была разработана конструкция НПУ, представленная на рисунке 1. За вращение в горизонтальной плоскости отвечает так называемый ротатор, который представляет собой червячную передачу (1). Вращение в вертикальной плоскости осуществляется благодаря системе из двух гидроцилиндров (2). НПУ оснащено гидравлическим быстросъемным механизмом (3), предназначенным для закрепления исполнительного органа.



Рис. 1. НПУ фирмы Engcon [9]:
1 – червячная передача; 2 – система гидроцилиндров;
3 – быстросъемный механизм

Данный вид компоновки является классическим и самым распространённым, его используют различные производители по всему миру,

такие как: Steelwrist (Швеция). ИНТЕХРОС (Россия), JK Technology (Южная Корея) и многие другие [10-12].

Однако у данной конструкции НПУ имеются следующие важные недостатки:

1) Во время работы высока вероятность повреждения поверхности штока гидроцилиндра как от абразивного износа, вызванного попаданием и оседанием мелких частиц грунта на гладкую поверхность штока, так и механическим повреждением в результате внешнего воздействия (падение камня, случайное прикосновение к твердому предмету и т.д.). Все это приводит к потере номинального усилия гидроцилиндра из-за местных потерь рабочей жидкости, вследствие ее выдавливания из рабочей полости через отверстие для штока.

2) Из-за конструктивных особенностей данной схемы при увеличении угла наклона в вертикальной плоскости гидроцилиндры наклона начинают увеличивать габарит НПУ. Эта особенность не только ограничивает диапазон наклона навесного оборудования, но и не позволяет работать в узких проемах из-за риска повреждения штока гидроцилиндра.

3) Невозможность обеспечения точного позиционирования на всем диапазоне наклона. Это связано с тем, что в конце хода гидроцилиндр начинает испытывать сильные внешние нагрузки, которые не позволяют гарантированно удерживать рабочий орган в определенном положении.

Используя наработки и передовой опыт различных производителей в проектировании НПУ,

была разработана перспективная отечественная модель НПУ (рис. 2), которая лишена вышеизложенных недостатков. В предлагаемой конструкции НПУ вместо классической системы из двух гидроцилиндров предлагается использовать поворотный гидроцилиндр (3).

Крутящий момент с вала поворотного гидроцилиндра передается через кронштейн (4) на рукоять экскаватора, что позволяет совершать НПУ вращательное движение. Снизу НПУ оснащено гидравлическим быстросъемным механизмом (5), который позволяет произвести быстрое снятие и установку навесного оборудования. Для выполнения вспомогательных работ НПУ может оснащаться навесным стационарным захватом (6), предназначенным для захвата мелкогабаритных грузов, выполнения погрузочно-разгрузочных работ, извлечения старых деревянных шпал и многого другого. Захват приводится в движение с помощью системы из двух связанных гидроцилиндров (7), оснащенных специальными кожухами, для защиты штока от механических повреждений.

Благодаря использованию в конструкции встроенного специального поворотного гидроцилиндра (рис. 3) НПУ может наклоняться на угол 50° в обе стороны относительно вертикальной плоскости. Поворотный гидроцилиндр позволяет преобразовать поступательное движение во вращательное. Для этого в гидроцилиндр двойного действия устанавливаются две передачи типа «винт-гайка» скольжения.

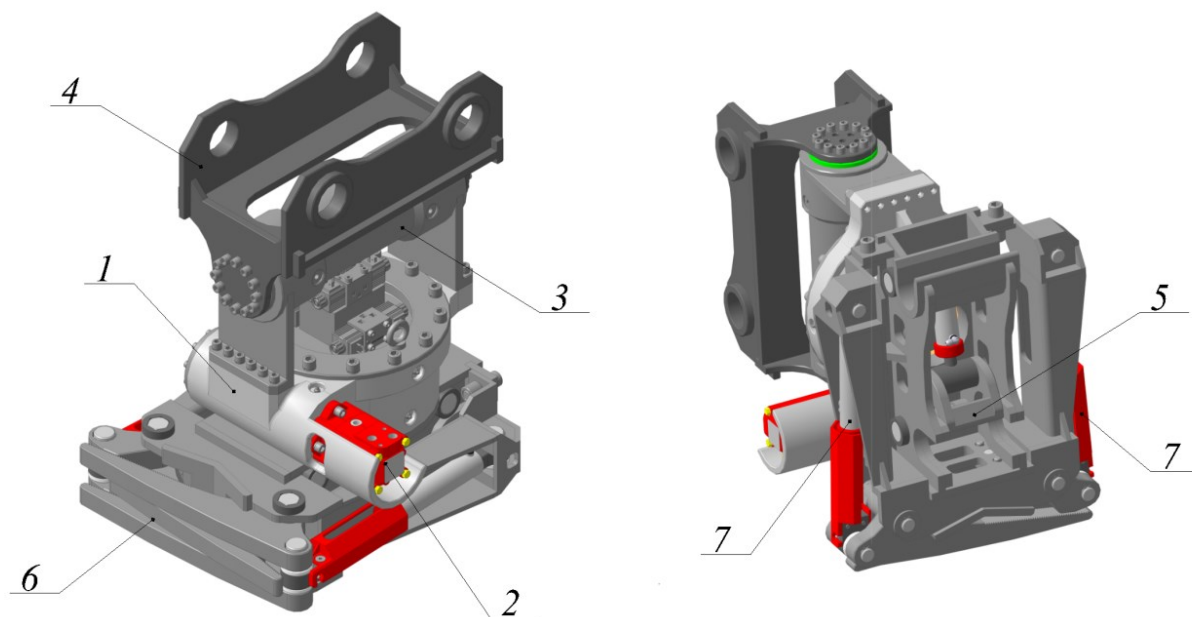


Рис. 2. 3D модель наклонно-поворотного устройства.

1 – червячная передача; 2 – гидромотор; 3 – поворотный гидроцилиндр;
4 – кронштейн; 5 – быстросъемный механизм; 6 – захват; 7 – гидроцилиндр

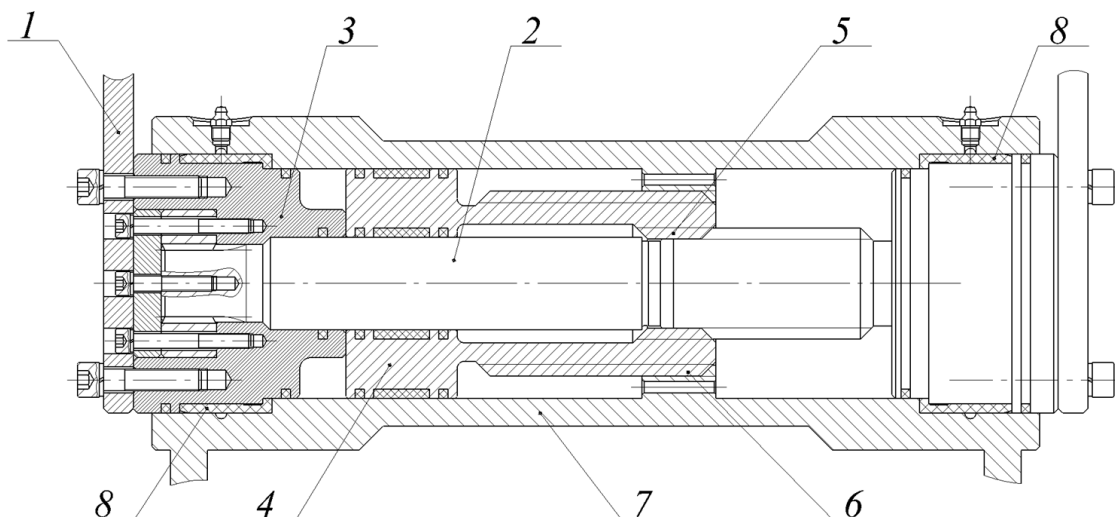


Рис. 3. Поворотный гидроцилиндр:

1 – кронштейн; 2 – вал; 3 – крышка; 4 – поршень; 5 – внутренняя резьба (правая); 6 – внешняя резьба (левая); 7 – корпус; 8 – подшипники скольжения

Принцип работы поворотного гидроцилиндра заключается в следующем: кронштейн (1) одним концом крепится через проушины к рукояти экскаватора, а другим концом привинчивается к торцу крышки (3) и торцу вала (2). После подачи рабочей жидкости в левую полость гидроцилиндра поршень (4) начинает перемещаться вправо, относительно неподвижного вала (2) и при этом поворачиваться по внутренней правой резьбе (5).

Поршень совершает как прямолинейное, так и вращательное движение, а за счет наличия

внешней левой резьбы (6) корпус (7), который опирается на подшипники скольжения (8), начинает совершать вращательное движение в противоположном направлении, тем самым передавая крутящий момент на НПУ.

Поскольку на данный момент не существует стандартной методики расчета поворотного гидроцилиндра был разработан алгоритм расчета (рис. 4) основных параметров механизма. Алгоритм составлен на основе общеизвестных методик и зависимостей [13–17].

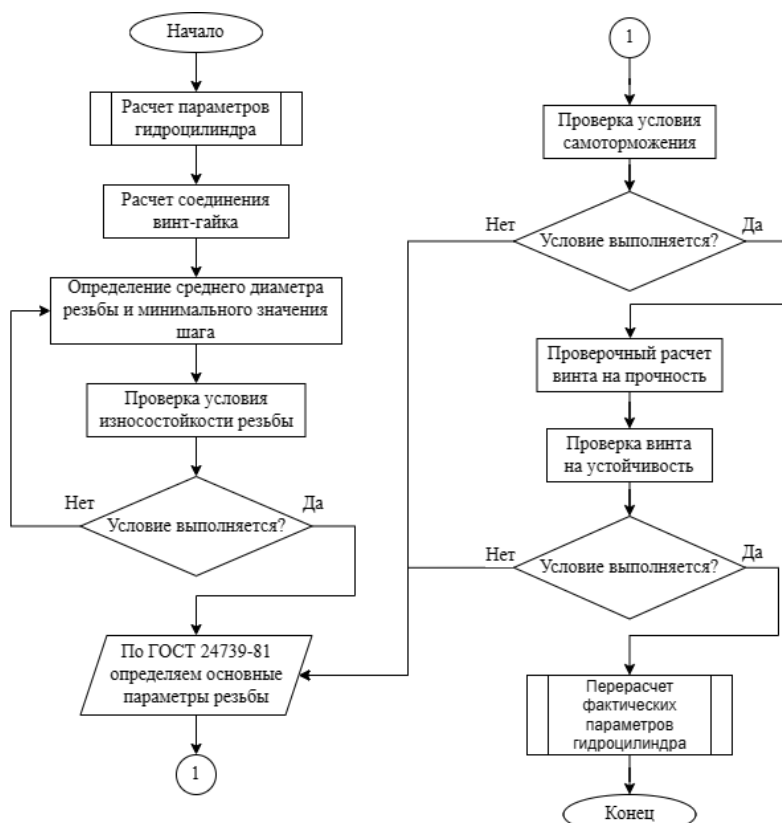


Рис. 4. Алгоритм расчета поворотного гидроцилиндра

В соответствии с представленным алгоритмом расчет начинается с определения основных геометрических параметров гидроцилиндра, расчетные параметры которого аналогичны параметрам гидроцилиндра двойного действия с односторонним штоком.

Для преобразования поступательного движения во вращательное в предложенной конструкции применяется трапецеидальная резьба, основной причиной выхода из строя которой является износ витков резьбы гайки. Поэтому предварительные значения среднего диаметра резьбы и шага резьбы определяются из условия износоустойчивости.

В расчетах с учетом кинематики движения принята внешняя левая резьба, а внутренняя резьба правая, поскольку подвижные детали вращаются в противоположных направлениях. Для обеих резьб значение шага (для многозаходных резьб значение хода резьбы) должно быть одинаковым, это необходимо для обеспечения работоспособности передачи в обоих направлениях. Расчет передачи винт-гайка следует начинать с резьбы внутреннего зацепления, поскольку она является более нагруженной, чем внешняя.

Далее по алгоритму производится проверка резьбы на самоторможение. Это необходимо для стопорения рабочего органа в случае повреждения гидролинии или ее обрыва. Также предусматривается проверка механизма на прочность

при совместном действии напряжений сжатия (растяжения) и кручения в опасном сечении по эквивалентному напряжению.

В процессе эксплуатации вал работает на сжатие, поэтому необходима его проверка на устойчивость при продольном изгибе. При значениях гибкости $\lambda \leq 55$ проверку на продольный изгиб можно не выполнять. Стальные винты при гибкости $\lambda \geq 100$ проверяют на устойчивость по величине критической силы.

Если условия прочности и устойчивости не выполняются, то необходимо выбрать резьбу с большим диаметром и повторить расчеты винта на самоторможение, прочность и устойчивость. После выполнения всех условий необходимо выполнить перерасчет фактических параметров гидроцилиндра.

Полученная в результате расчетов зависимость среднего диаметра резьбы от осевой силы (рис. 5) позволяет по заданным значениям осевой силы определить минимально необходимый средний диаметр резьбы.

Из полученного графика следует, что минимальный средний диаметр внутренней резьбы следует принимать равным или большим 40 мм, поскольку, начиная с этого значения, резьба начинает воспринимать гораздо большие значения осевой силы.

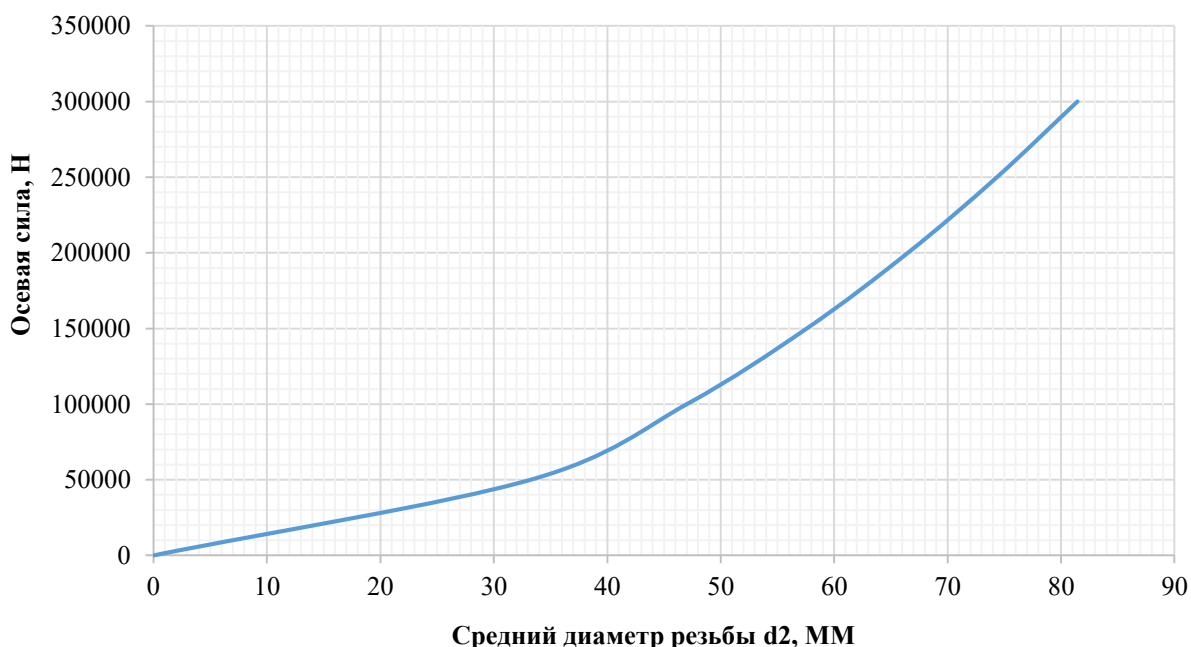


Рис. 5. Зависимость значения среднего диаметра резьбы от осевой силы

В нашем случае осевому усилию, равному 150 кН, соответствует минимальное значение среднего диаметра резьбы, равное 57,6 мм.

Также была получена зависимость значения угла подъема винтовой линии резьбы от шага резьбы и числа заходов (рис. 6), по которой

можно определить наилучшие сочетания значений числа заходов и шага резьбы.

Для данной конструкции угол подъема винтовой линии резьбы не должен превышать 0,18, исходя из условия самоторможения резьбы.

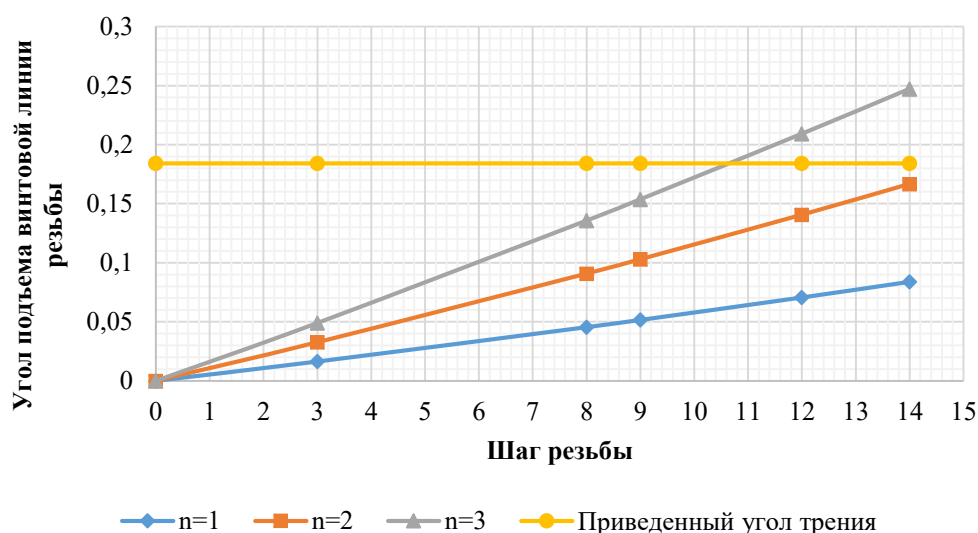


Рис. 6. Зависимость значения угла подъема винтовой линии резьбы от шага резьбы и числа заходов

При больших значениях шага резьбы предпочтительно выбирать число заходов резьбы $n=2, 3$, так как при таких параметрах значение угла подъема винтовой линии резьбы будет меньше приведенного угла трения.

Также стоит отметить, что изменение шага резьбы в меньшей степени влияет на значение угла подъема винтовой линии резьбы, чем изменение числа заходов.

Оптимальным является использование двухзаходной резьбы с крупным шагом, так как она имеет больший КПД по сравнению с однозаходной, но при этом проще в изготовлении, чем трехзаходная резьба.

Выводы.

1) Составлен алгоритм расчета поворотного гидроцилиндра и приведена обобщенная методика, позволяющая определить основные параметры гидроцилиндра и передачи винт гайка для дальнейшего конструирования механизма.

2) По результатам расчетов получены зависимости значения среднего диаметра резьбы от осевой силы и значения угла подъема винтовой линии резьбы от шага резьбы и числа заходов, позволяющие подобрать наилучшие параметры резьбы по заданным входным данным. Даны общие рекомендации по выбору параметров резьбы передачи винт-гайка.

3) Предложена и разработана перспективная 3D модель НПУ в CAD системе КОМПАС-3D. Использование разработанной конструкции НПУ со встроенным специальным поворотным гидроцилиндром увеличивает спектр выполняемых задач экскаватора, снижает время на выполнение операций, обеспечивает точное позиционирование рабочего органа, сокращает время на переналадку оборудования, позволяет работать в условиях ограниченной площадки, а также поз-

воляет сократить количество необходимой техники и уменьшить трудозатраты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Транспорт в России. 2022: Стат.сб./Росстат. Т65 М., 2022 С. 37 [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13229> (дата обращения 30.01.2023)
2. Попович М.В., Бугаенко В.М. Путевые машины. Полный курс: учебник. Москва, 2009. 820 с.
3. Шубин А.А., Витчук П.В., Смоловик А.Е. Варианты модернизации шпалоподбойки // Мир транспорта. 2015. Т. 13, № 6(61). С. 78–87.
4. Шубин А. А., Витчук П.В. Комплекс для ремонта и восстановления контактной сети // Мир транспорта. 2016. Т. 14, № 3(64). С. 80–87.
5. Sleeper changing machine MRT2 / Geismar. 2022. [Электронный ресурс] URL: <https://geismar.com/products/mrt2/?lang=en> (дата обращения: 02.12.2022)
6. Self-propelled and off-trackable ballast tamping machine BRAD / Geismar. 2022. [Электронный ресурс] URL: <https://geismar.com/products/self-propelled-off-trackable-ballast-tamping-machine-brad/?lang=en> (дата обращения: 02.12.2022)
7. Hydraulic modular ballast tamper for track & turnouts BRM8 AC / Geismar. 2022. [Электронный ресурс] URL: <https://geismar.com/products/hydraulic-modular-ballast-tamper-for-track-turnouts-brm8ac/?lang=en> (дата обращения: 02.12.2022)
8. Колесные экскаваторы серии ЕК [Электронный ресурс] URL: http://www.terex-zm.ru/catalog/seriya_ek (дата обращения: 02.12.2022).
9. Каталог товаров / Engcon. 2022. [Электронный ресурс] URL:

<https://engcon.com/en/tiltrotators.html> (дата обращения: 02.12.2022).

10. Каталог товаров / Steelwrist. 2022. [Электронный ресурс] URL: <https://steelwrist.com/int/products/tiltrotators/> (дата обращения: 02.12.2022)

11. Каталог товаров / ИНТЕХРОС. 2022. [Электронный ресурс] URL: <https://intehros.ru/produktsiya/naklonno-povorotnoe-ustroystvo/> (дата обращения: 02.12.2022)

12. Каталог товаров / JK Technology. 2022. [Электронный ресурс] URL: http://www.jkattach.co.kr/page.php?Main=2&sub=8&tab=1&pd_no=82 (дата обращения: 02.12.2022)

13. Лепёшкин А.В., Михайлин А.А. Гидравлические и пневматические приводы. М.: Академия, 2004. 336 с.

14. Слюсарев А.Н. Гидравлические и пневматические элементы и приводы промышленных роботов. М.: Машиностроение, 1989. 167 с.

15. Свешников В.К. Станочные гидроприводы. М.: Машиностроение, 2008. 512 с.

16. Варганов В.О., Аввакумов М.В., Колычев В.М., Гребенникова В.А., Романов В.А. Передача винт – гайка: учебное пособие. СПбГТУРП. СПб., 2015. 57 с.

17. Бельков В.Н., Захаренков Н.В., Захарова Н.В., Лесняк И.Ю. Прикладная механика. Расчет соединений деталей машин: учебное пособие. Омск: Омский государственный технический университет, 2021. 252 с.

Информация об авторах

Шубин Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой МК9 "Подъемно-транспортные системы". E-mail: ashubin@bmstu.ru. Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Россия, 248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2.

Смоловик Андрей Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры МК9 "Подъемно-транспортные системы". E-mail: smolovik@bmstu.ru. Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Россия, 248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2.

Васильев Виталий Александрович, студент кафедры МК9 "Подъемно-транспортные системы". E-mail: Vitaliy27.0@yandex.ru. Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Россия, 248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2.

Поступила 21.03.2023 г.

© Шубин А.А., Смоловик А.Е., Васильев В.А., 2023

Shubin A.A., Smolovik A.E., *Vasiliev V.A.

Bauman Moscow State Technical University Kaluga Branch

**E-mail: Vitaliy27.0@yandex.ru*

DEVELOPMENT OF THE DESIGN AND RESEARCH OF THE TILT-TURNING DEVICE FOR MULTIFUNCTIONAL COMPLEXES

Abstract. The paper proposes the concept of using a machine with a combined stroke based on a wheeled excavator equipped with a tilt-turning device for the repair and maintenance of railway tracks. The current maintenance of the track includes the systematic supervision of the condition of the track structures and track devices and their maintenance in a condition that guarantees the safe movement of trains. It is grounded the expediency of the using road-rail vehicle and the use of tilt-turning devices for various types of work, such as lifting and straightening the track, changing sleepers, laying ballast, clearing railway tracks from snow, and much more. A promising domestic design of a tilt-turning device has been developed with the introduction of a hydraulic rotary actuator into the design. A 3D model of the developed tilt-turning device is built in CAD KOMPAS-3D. The algorithm and the generalized method for calculating of the rotary hydraulic cylinder are presented. It is based on the results of calculations the dependence of the value of the mean thread diameter on the axial force and the value of the angle of climb of the screw thread line from the thread step and the number of turns, allowing to choose the best thread parameters.

Keywords: current maintenance and repair of railway tracks, tilt-turning device, tiltrotator, hydraulic rotary actuator, method of calculating.

REFERENCES

1. Transport in Russia [Transport v Rossii]: Statistics digest/Rosstat – T65 M., 2022. Pp. 37.

URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13229> (date of treatment: 30.01.2023)

2. Popovich M.V., Bugaenko V.M. Track machines. Full course: textbook. [Putevye mashiny. Polnyj kurs: uchebnik]. Moscow, 2009. 820 p. (rus)

3. Shubin A.A., Vitchuk P.V. Smolovik A.E. Design and analysis of track packing machine modernization [Varianty modernizacii shpalopodbojki]. World of Transport and Transportation. 2015. Vol. 13, No. 6(61). Pp. 78-87. (rus)
4. Shubin A.A., Vitchuk P.V. System for maintenance and recovery of contact network [Kompleks dlya remonta i vosstanovleniya kontaktnoj seti]. World of Transport and Transportation. 2016. Vol. 14, No. 3(64). Pp. 80-87. (rus)
5. Sleeper changing machine MRT2 / Geismar. URL: <https://geismar.com/products/mrt2/?lang=en> (date of treatment: 02.12.2022)
6. Self-propelled and off-trackable ballast tamping machine BRAD / Geismar. URL: <https://geismar.com/products/self-propelled-off-trackable-ballast-tamping-machine-brad/?lang=en> (date of treatment: 02.12.2022)
7. Hydraulic modular ballast tamper for track & turnouts BRM8 AC / Geismar. URL: <https://geismar.com/products/hydraulic-modular-ballast-tamper-for-track-turnouts-brm8ac/?lang=en> (date of treatment: 02.12.2022)
8. Wheel excavators of EK-series [Kolesnye ekskavatory serii EK] URL: http://www.terex-zm.ru/catalog/seriya_ek (date of treatment: 02.12.2022).
9. Product catalog / Engcon. 2022. URL: <https://engcon.com/en/tiltrotators.html> (date of treatment: 02.12.2022).
10. Product catalog / Steelwrist. URL: <https://steelwrist.com/int/products/tiltrotators/> (date of treatment: 02.12.2022)
11. Product catalog / INTECHROS. URL: <https://intechros.com/produktsiya/tiltrotator/> (date of treatment: 02.12.2022)
12. Product catalog / JK Technology. URL: http://www.jkattach.co.kr/page.php?Main=2&sub=8&tab=1&pd_no=82 (date of treatment: 02.12.2022)
13. Lepeshkin A.V., Mikhailin A.A. Hydraulic and pneumatic drives. [Gidravlicheskie i pnevmaticheskie privody]. Academy, 2004. 336 p. (rus)
14. Slusarev A.N. Hydraulic and pneumatic elements and actuators of industrial robots. [Gidravlicheskie i pnevmaticheskie elementy i privody promyshlennyh robotov]. Engineering, 1989. 167 p. (rus)
15. Sveshnikov V.K. Machine Hydraulic Actuators. [Stanochnye gidroprivody]. Engineering, 2008. 512 p. (rus)
16. Varganov V.O., Avvakumov M.V., Kolychev M.V., Grebennikov V.M., Romanov V.A., Transmission of screw [Peredacha vint-gajka]: SPbGTUR. SPb., 2015. 57 p. (rus)
17. Belkov V.N., Zakharenkov N.V., Zakharova N.V., Lesnyak I.Y. Applied mechanics. Calculation of joints of machine parts: study. manual [Prikladnaya mekhanika. Raschet soedinenij detalej mashin] Ministry of Education and Science of Russia. Omsk: Omsk State Technical University, 2021. 252 p. (rus)

Information about the authors

Shubin, Alexander A. PhD, assistant professor. E-mail: ashubin@bmstu.ru. Bauman Moscow State Technical University Kaluga Branch. Russia, 248000, Kaluga, st. Bazhenova, 2.

Smolovik, Andrey E. PhD, assistant professor. E-mail: smolovik@bmstu.ru. Bauman Moscow State Technical University Kaluga Branch. Russia, 248000, r. Kaluga, st. Bazhenova, 2.

Vasiliev, Vitaly A. Student. E-mail: Vitaliy27.0@yandex.ru. Bauman Moscow State Technical University Kaluga Branch. Russia, 248000, Kaluga, st. Bazhenova, 2.

Received 21.03.2023

Для цитирования:

Шубин А.А., Смоловик А.Е., Васильев В.А. Разработка конструкции и исследование наклонно-поворотного устройства для многофункциональных комплексов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 6. С. 94–101. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-94-101

For citation:

Shubin A.A., Smolovik A.E., Vasiliev V.A. Development of the design and research of the tilt-turning device for multifunctional complexes. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 6. Pp. 94–101. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-94-101