

#### 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

№ 3, 2019 год

## 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:

- 05.23.01 Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
- **05.23.03** Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)
- 05.23.05 Строительные материалы и изделия (технические науки)
- **05.23.20** Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура)
- **05.23.21** Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура)
- 05.23.22 Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)
- 05.23.22 Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура)
- **05.17.06** Технология и переработка полимеров и композитов (технические науки)
- **05.17.11** Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)
- 05.02.05 Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки)
- **05.02.07** Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 05.02.08 Технология машиностроения (технические науки)
- 05.02.13 Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) (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 (СОРЕ).

Официальный сайт журнала: http://vestnik\_rus.bstu.ru Тел: +7 (4722) 30-99-77. E-mail: VESTNIK@intbel.ru. Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» – 44446. Online подписка: http://www.akc.ru/itm/2558104627/

# 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:

- **05.23.01** Building structures, constructions and facilities (technical sciences)
- **05.23.03** Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (technical sciences)
- **05.23.05** Building materials and products (technical sciences)
- **05.23.20** Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture)
- **05.23.21** Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture)
- **05.23.22** Urban planning, rural settlement planning (technical sciences)
- **05.23.22** Urban planning, rural settlement planning (architecture)
- **05.17.06** Technology and processing of polymers and composites (technical sciences)
- **05.17.11** Technology of silicate and refractory nonmetallic materials (technical sciences)
- **05.02.05** Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences)
- **05.02.07** Technology and equipment of mechanical and physical-technical processing (technical sciences)
- **05.02.08** Engineering technology (technical sciences)
- **05.02.13** Machines, units and processes (branch-wise) (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).

Official website of the journal: http://vestnik\_eng.bstu.ru Tel.: +7 (4722) 30-99-77. E-mail: VESTNIK@intbel.ru Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: http://www.akc.ru/itm/2558104627/ **Евтушенко Евгений Иванович**, д-р техн. наук, проф., первый проректор, заведующий кафедрой технологии стекла и керамики Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

#### Заместитель главного редактора

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

#### Члены редакционной коллегии

Айзенштадт Аркадий Михайлович, д-р хим. наук, проф., заведующий кафедрой композиционных материалов и строительной экологии Высшей инженерной школы, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (РФ, г. Архангельск). Баженов Юрий Михайлович, академик РААСН наук, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии вяжущих веществ и бетона НИУ МГСУ (РФ, г. Москва).

**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).

**Большаков Андрей Геннадьевич**, д-р арх., проф., зав. каф. архитектурного проектирования Иркутского национального исследовательского технического университета ( $P\Phi$ , г. Иркутск).

**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. Ставрополь).

**Везенцев Александр Иванович**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. 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 МГСУ (РФ, г. Москва).

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

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

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

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

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

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

**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 РА-АСН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии строительного производства Белорусского национального технического университета (Республика Беларусь, г. Минск).

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

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

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

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

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

Павлович Ненад, PhD, проректор по научной работе и издательской деятельности, проф. Машиностроительного факультета Государственного Нишского университета (Республика Сербия, г. Ниш). Пивинский Юрий Ефимович, д-р техн. наук, проф., научный руководитель ООО «Научно-внедренческая фирма «КЕРАМБЕТ-ОГ-НЕУПОР» (РФ, г. Санкт-Петербург).

**Потапов Евгений Эдуардович**, д-р хим. наук, проф. МИРЭА – Российского технологического университета ( $P\Phi$ , 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 университет имени И.С. Тургенева (РФ, г. Орел).

Семенцов 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 хозяйств Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород)

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

**Фишер Ханс-Бертрам**, Dr.-Ing., заместитель заведующего кафедрой "Строительные материалы» Баухаус-Университет Ваймар (Германия, г. Веймар).

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

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

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

**Юрьев Александр Гаврилович**, д-р техн. наук, проф., кафедры теоретической механики и сопротивления материалов (РФ, г. Белгород).

**Яцун Сергей Федорович**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедры 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).

**Yuriy M. Bazhenov**, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Russian Federation, Moscow).

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

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

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

**Andrey G. Bol'shakov**, Doctor of Architecture, Professor, Irkutsk National Research Technical University (Russian Federation, Irkutsk).

**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, Stavropol).

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

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

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

**Aleksey N. Davidyuk**, Doctor of Technical Science, Director NIIZHB 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). Aleksandr M. Kozlov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Lipetsk State Technical University (Russian Federation, Lipetsk).

Valery S. Lesovik, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod). Sergey N. Leonovich, Foreign member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belarusian National Technical University (Republic of Belarus, Minsk).

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

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

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

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

**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" KERAM-BET-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, Mogiley).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

134

149

154

дестник Bi 13 им. Б.1. Шухова 20	19, №3
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА	
Траутваин А.И., Акимов А.Е., Денисов В.П., Лашин М.В.	
ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА ОБЪЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА	
ПО ТЕХНОЛОГИИ SUPERPAVE	8
Соков В.Н., Баженова С.И., Петров М.А., Пепеляева А.Ю.	
РАЗРАБОТКА КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ	
ВОДНО-ДИСПЕРСИОННОЙ КРАСКИ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛАЦЕТАТНОЙ	
ДИСПЕРСИИ	15
Шорстова Е.С., Клюев С.В., Клюев А.В.	
ФИБРОБЕТОН ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ	22
Экба С.И. ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ	
ЗДАНИЙ, ПОПАДАЮЩИХ В ЗОНУ ВЛИЯНИЯ НОВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА	28
Кононова М.С., Жерлыкина М.Н., Малышева А.Н.	20
КОМПЛЕКСНЫЙ КРИТЕРИЙ СРАВНЕНИЯ СИСТЕМ ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ ЗДАНИЙ	35
Оберемок М.И., Наумов А.Е., Щенятская М.А.	55
КВАЛИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВИДОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИЛОЙ	
НЕДВИЖИМОСТИ	44
Петрусенко Ю.В	
КОНСТРУКТИВНЫЕ И АРХИТЕКТУРНО-ХУДОЖЕСТВЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ	
ПАВИЛЬОНА КРЫТОГО РЫНКА НА СТАРОМ БАЗАРЕ В Г. РОСТОВЕ-НА-ДОНУ	52
Колесникова Л.И., Цветкова Ю.П.	
ДРЕВНИЙ БЕЛГОРОДСКИЙ ПАМЯТНИК АРХИТЕКТУРЫ «УСПЕНСКО-НИКОЛАЕВСКИЙ	50
СОБОР», 1692–1703 ГОДОВ, – ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЫ XIX ВЕКА Уморина Ж.Э.	59
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БИОНИЧЕСКОЙ АРХИТЕКТУРЫ	69
Пермякова А.А., Авилова И.П., Даниленко Е.П., Стрекозова Л.В.	0)
АНАЛИЗ КОМПЛЕКСНОГО ИНВЕСТИЦИОННОГО ПЛАНА МОДЕРНИЗАЦИИ	
МОНОГОРОДОВ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ТОЛЬЯТТИ	78
химическая технология	
Бессмертный В.С., Соколова О.Н., Бондаренко Н.И., Бондаренко Д.О., Брагина Л.Л.,	
Макаров А.В., Кочурин Д.В.	
ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ БЛОЧНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ	0.5
МАТЕРИАЛОВ С ДЕКОРАТИВНЫМ ПОКРЫТИЕМ	85
Виноградова Л.А., Русакова Ю.П. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА СП-2ВУ	
НА СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЕТОНА	93
Вендин С.В.	75
К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ДИФФУЗИИ В СЛОИСТЫХ СРЕДАХ	100
	100
МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ	
Круглова Т.Н.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ	106
УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ Поляков А.Н., Гончаров А.Н., Парфёнов И.В.	106
поляков А.н., гончаров А.н., парфенов и.в. МЕТОДИКА КОРРЕКЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ СТАНКА С ЧПУ	117
Бондаренко Ю.А., Ханин С.И., Бестужева О.В.	11/
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦАПФ	Ы
ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ И ВРАЩЕНИЯ	128

#### 6

Остановский А.А.

СИСТЕМЫ «МКАД»

Юдин К.А., Харин Н.П.

Петько В.Г., Никитина И.П.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОГО НЕСООТВЕТСТВИЯ ВЕТВЕЙ ЗАМКНУТОГО КОНТУРА НА УДЕЛЬНУЮ ЭНЕРГОЁМКОСТЬ В МЕЛЬНИЦЕ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВОДОГАЗОВОГО УЗЛА

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ ДЛЯ СМЕСИТЕЛЯ С ДВУНАПРАВЛЕННЫМ ВРАЩАТЕЛЬНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА МАТЕРИАЛ

(	C	(	)	N	J	S	П	Γ	R	2		7	Т	T			V	- ,	A	$\Pi$	$\bigcap$	١,	4	F	?		1	Ĥ	1	٦	$\Gamma$	$\mathbb{F}$	(	$\mathbb{C}^{1}$	ΓΊ		R	?]	F
		•	,		<b>4</b>					•	•	 			•	- 1	. 1	- 1		 ч.	•	- 1			•	•	, ,						•			. ,			

Traytvain A.I., Akimov A.E., Denisov V.P., Lashin M.V. FEATURES OF THE METHOD OF SURROUNDED DESIGN OF ASPHALT-CONCRETE ON SUPERPAVE TECHNOLOGY	8
Sokov V.N., Bazhenova S.I., Petrov M.A., Pepelyaeva A.Yu.	
DEVELOPMENT OF ECO-FRIENDLY WATER-DISPERSION PAINT BASED	
ON POLYVINIL ACETATE DISPERSION	15
Shorstova E.S., Klyuyev S.V., Klyuev A.V. IBER CONCRETE FOR 3D-PRINTING	22
Ekba S.I.	
INTEGRATED INSPECTION PECULIARITIES OF LOAD-BEARING STRUCTURAL ELEMENTS OF BUILDINGS IN NEW CONSTRUCTION INFLUENCE ZONE	28
Kononova M.S., Zherlykina M.N., Malysheva A.N.	20
A COMPREHENSIVE COMPARISON CRITERION OF NATURAL LIGHTING SYSTEMS	
FOR BUILDINGS	35
Oberemok M.I., Naumov A.E., Shchenyatskaya M.A.	
QUALITATIVE ANALYSIS OF VIEW CHARACTERISTICS OF RESIDENTIAL PROPERTY	44
Petrusenko Y.V.	
CONSTRUCTIVE AND ARCHITECTURAL QUALITIES OF THE PAVILION	
OF THE COVERED MARKET ON THE OLD BAZAAR IN ROSTOV-ON-DON	52
Kolesnikova L.I., Tsvetkova Y.P.	
ANCIENT ARCHITECTURAL MONUMENT OF BELGOROD «USPENSKO-NICHOLAS	
CATHEDRAL» 1692–1703, – FIRST HALF OF THE XIX	59
Umorina J.E.	60
TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE BIONIC ARCHITECTURE	69
Permiakova A.A., Avilova I.P., Danilenko E.P., Strekozova L.V. ANALYSIS OF THE COMPLEX INVESTMENT PLAN FOR THE MODERNIZATION	
OF MONOGIANCES ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF TOGLIATTI	78
OF MONOGRANCES ON THE EXAMILEE OF THE CITT OF TOOLIATTI	70
CHEMICAL TECHNOLOGY	
CHENTONE TECHNOLOGI	
Bessmertnyy V.S., Sokolova O.N., Bondarenko N.L., Bondarenko D.O., Bragina L.L., Makarov A.V.,	
Bessmertnyy V.S., Sokolova O.N., Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Bragina L.L., Makarov A.V., Kochurin D.V.	
<b>Kochurin D.V.</b> PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING	85
<b>Kochurin D.V.</b> PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE	85 93
Kochurin D.V. PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P. THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE Vendin S.V.	
Kochurin D.V.  PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING  Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P.  THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE  Vendin S.V.  TO THE SOLUTION OF ISSUES OF NONSTATIONARY DIFFUSION IN LAYERED	93
Kochurin D.V. PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P. THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE Vendin S.V.	
Kochurin D.V.  PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING  Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P.  THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE  Vendin S.V.  TO THE SOLUTION OF ISSUES OF NONSTATIONARY DIFFUSION IN LAYERED ENVIRONMENTS	93
Kochurin D.V.  PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING  Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P.  THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE  Vendin S.V.  TO THE SOLUTION OF ISSUES OF NONSTATIONARY DIFFUSION IN LAYERED ENVIRONMENTS  MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE	93
Kochurin D.V.  PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING  Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P.  THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE  Vendin S.V.  TO THE SOLUTION OF ISSUES OF NONSTATIONARY DIFFUSION IN LAYERED ENVIRONMENTS  MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE  Kruglova T.N.  STUDY OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRIC DRIVE UNDER DIFFERENT LOADING	93
Kochurin D.V.  PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING  Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P.  THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE  Vendin S.V.  TO THE SOLUTION OF ISSUES OF NONSTATIONARY DIFFUSION IN LAYERED ENVIRONMENTS  MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE  Kruglova T.N.  STUDY OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRIC DRIVE UNDER DIFFERENT LOADING CONDITIONS	93
Kochurin D.V.  PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING  Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P.  THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE  Vendin S.V.  TO THE SOLUTION OF ISSUES OF NONSTATIONARY DIFFUSION IN LAYERED ENVIRONMENTS  MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE  Kruglova T.N.  STUDY OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRIC DRIVE UNDER DIFFERENT LOADING	93
Kochurin D.V.  PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING  Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P.  THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE  Vendin S.V.  TO THE SOLUTION OF ISSUES OF NONSTATIONARY DIFFUSION IN LAYERED ENVIRONMENTS  MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE  Kruglova T.N.  STUDY OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRIC DRIVE UNDER DIFFERENT LOADING CONDITIONS  Polyakov A.N., Goncharov A.N., Parfenov I.V.	93 100 106
Kochurin D.V.  PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING  Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P.  THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE  Vendin S.V.  TO THE SOLUTION OF ISSUES OF NONSTATIONARY DIFFUSION IN LAYERED ENVIRONMENTS  MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE  Kruglova T.N.  STUDY OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRIC DRIVE UNDER DIFFERENT LOADING CONDITIONS  Polyakov A.N., Goncharov A.N., Parfenov I.V.  TECHNIQUE FOR CORRECTION OF CNC MACHINE TOOL TEMPERATURE ERROR	93 100 106 117
Kochurin D.V.  PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING  Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P.  THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE  Vendin S.V.  TO THE SOLUTION OF ISSUES OF NONSTATIONARY DIFFUSION IN LAYERED ENVIRONMENTS  MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE  Kruglova T.N.  STUDY OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRIC DRIVE UNDER DIFFERENT LOADING CONDITIONS  Polyakov A.N., Goncharov A.N., Parfenov I.V.  TECHNIQUE FOR CORRECTION OF CNC MACHINE TOOL TEMPERATURE ERROR  Bondarenko Ju.A., Khanin S.I., Bestuzheva O.V.	93 100 106
Kochurin D.V.  PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING  Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P.  THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE  Vendin S.V.  TO THE SOLUTION OF ISSUES OF NONSTATIONARY DIFFUSION IN LAYERED ENVIRONMENTS  MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE  Kruglova T.N.  STUDY OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRIC DRIVE UNDER DIFFERENT LOADING CONDITIONS  Polyakov A.N., Goncharov A.N., Parfenov I.V.  TECHNIQUE FOR CORRECTION OF CNC MACHINE TOOL TEMPERATURE ERROR  Bondarenko Ju.A., Khanin S.I., Bestuzheva O.V.  MATHEMATICAL DESCRIPTION OF STRESS-STRAIN CONDITION OF BALL  MILL'S PIN UNDER THE FORCE OF GRAVITY AND ROTATION  Ostanovskiy A.A.	93 100 106 117
Kochurin D.V.  PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING  Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P.  THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE  Vendin S.V.  TO THE SOLUTION OF ISSUES OF NONSTATIONARY DIFFUSION IN LAYERED ENVIRONMENTS  MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE  Kruglova T.N.  STUDY OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRIC DRIVE UNDER DIFFERENT LOADING CONDITIONS  Polyakov A.N., Goncharov A.N., Parfenov I.V.  TECHNIQUE FOR CORRECTION OF CNC MACHINE TOOL TEMPERATURE ERROR  Bondarenko Ju.A., Khanin S.I., Bestuzheva O.V.  MATHEMATICAL DESCRIPTION OF STRESS-STRAIN CONDITION OF BALL  MILL'S PIN UNDER THE FORCE OF GRAVITY AND ROTATION  Ostanovskiy A.A.  ANALYSIS OF THE IMPACT OF KINEMATIC INSUFFICIENCY OF BRANCHES	93 100 106 117 128
Kochurin D.V.  PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING  Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P.  THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE  Vendin S.V.  TO THE SOLUTION OF ISSUES OF NONSTATIONARY DIFFUSION IN LAYERED ENVIRONMENTS  MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE  Kruglova T.N.  STUDY OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRIC DRIVE UNDER DIFFERENT LOADING CONDITIONS  Polyakov A.N., Goncharov A.N., Parfenov I.V.  TECHNIQUE FOR CORRECTION OF CNC MACHINE TOOL TEMPERATURE ERROR BONDARD SU.A., Khanin S.I., Bestuzheva O.V.  MATHEMATICAL DESCRIPTION OF STRESS-STRAIN CONDITION OF BALL MILL'S PIN UNDER THE FORCE OF GRAVITY AND ROTATION  Ostanovskiy A.A.  ANALYSIS OF THE IMPACT OF KINEMATIC INSUFFICIENCY OF BRANCHES  OF A CLOSED CONTOUR REDUCED POWER INPUT IN THE MILL OF THE MKAD SYSTEM	93 100 106 117
Kochurin D.V.  PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING  Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P.  THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE  Vendin S.V.  TO THE SOLUTION OF ISSUES OF NONSTATIONARY DIFFUSION IN LAYERED ENVIRONMENTS  MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE  Kruglova T.N.  STUDY OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRIC DRIVE UNDER DIFFERENT LOADING CONDITIONS  Polyakov A.N., Goncharov A.N., Parfenov I.V.  TECHNIQUE FOR CORRECTION OF CNC MACHINE TOOL TEMPERATURE ERROR  Bondarenko Ju.A., Khanin S.I., Bestuzheva O.V.  MATHEMATICAL DESCRIPTION OF STRESS-STRAIN CONDITION OF BALL  MILL'S PIN UNDER THE FORCE OF GRAVITY AND ROTATION  Ostanovskiy A.A.  ANALYSIS OF THE IMPACT OF KINEMATIC INSUFFICIENCY OF BRANCHES  OF A CLOSED CONTOUR REDUCED POWER INPUT IN THE MILL OF THE MKAD SYSTEM  Yudin K.A., Kharin N.P.	93 100 106 117 128
Kochurin D.V. PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P. THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE Vendin S.V. TO THE SOLUTION OF ISSUES OF NONSTATIONARY DIFFUSION IN LAYERED ENVIRONMENTS  MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Kruglova T.N. STUDY OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRIC DRIVE UNDER DIFFERENT LOADING CONDITIONS POlyakov A.N., Goncharov A.N., Parfenov I.V. TECHNIQUE FOR CORRECTION OF CNC MACHINE TOOL TEMPERATURE ERROR Bondarenko Ju.A., Khanin S.I., Bestuzheva O.V. MATHEMATICAL DESCRIPTION OF STRESS-STRAIN CONDITION OF BALL MILL'S PIN UNDER THE FORCE OF GRAVITY AND ROTATION OStanovskiy A.A. ANALYSIS OF THE IMPACT OF KINEMATIC INSUFFICIENCY OF BRANCHES OF A CLOSED CONTOUR REDUCED POWER INPUT IN THE MILL OF THE MKAD SYSTEM YUdin K.A., Kharin N.P. THE MODELING OF A BEVEL GEAR FOR MIXER WITH BI-DIRECTIONAL ROTATIONAL	93 100 106 117 128 134
Kochurin D.V. PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P. THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE Vendin S.V. TO THE SOLUTION OF ISSUES OF NONSTATIONARY DIFFUSION IN LAYERED ENVIRONMENTS  MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Kruglova T.N. STUDY OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRIC DRIVE UNDER DIFFERENT LOADING CONDITIONS POlyakov A.N., Goncharov A.N., Parfenov I.V. TECHNIQUE FOR CORRECTION OF CNC MACHINE TOOL TEMPERATURE ERROR Bondarenko Ju.A., Khanin S.I., Bestuzheva O.V. MATHEMATICAL DESCRIPTION OF STRESS-STRAIN CONDITION OF BALL MILL'S PIN UNDER THE FORCE OF GRAVITY AND ROTATION Ostanovskiy A.A. ANALYSIS OF THE IMPACT OF KINEMATIC INSUFFICIENCY OF BRANCHES OF A CLOSED CONTOUR REDUCED POWER INPUT IN THE MILL OF THE MKAD SYSTEM Yudin K.A., Kharin N.P. THE MODELING OF A BEVEL GEAR FOR MIXER WITH BI-DIRECTIONAL ROTATIONAL IMPACT ON THE MATERIAL	93 100 106 117 128
Kochurin D.V. PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P. THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE Vendin S.V. TO THE SOLUTION OF ISSUES OF NONSTATIONARY DIFFUSION IN LAYERED ENVIRONMENTS  MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Kruglova T.N. STUDY OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRIC DRIVE UNDER DIFFERENT LOADING CONDITIONS POlyakov A.N., Goncharov A.N., Parfenov I.V. TECHNIQUE FOR CORRECTION OF CNC MACHINE TOOL TEMPERATURE ERROR Bondarenko Ju.A., Khanin S.I., Bestuzheva O.V. MATHEMATICAL DESCRIPTION OF STRESS-STRAIN CONDITION OF BALL MILL'S PIN UNDER THE FORCE OF GRAVITY AND ROTATION OStanovskiy A.A. ANALYSIS OF THE IMPACT OF KINEMATIC INSUFFICIENCY OF BRANCHES OF A CLOSED CONTOUR REDUCED POWER INPUT IN THE MILL OF THE MKAD SYSTEM YUdin K.A., Kharin N.P. THE MODELING OF A BEVEL GEAR FOR MIXER WITH BI-DIRECTIONAL ROTATIONAL	93 100 106 117 128 134

### СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/article\_5ca1f62f6b9a09.67742444

<sup>1</sup>Траутваин А.И., <sup>1</sup>Акимов А.Е., <sup>1</sup>Денисов В.П., <sup>1,\*</sup>Лашин М.В.

<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

\*E-mail: Nedostypnbli@yandex.ru

#### ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА ОБЪЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА ПО ТЕХНОЛОГИИ SUPERPAVE

Аннотация. В данной статье рассмотрена технология проектирования асфальтобетонных покрытий, по методу Superpave. Система Superpave (SUperior PERforming Asphalt PAVEments) была разработана стратегической программой исследований автомобильных дорог (SHRP) в США. Целью программы был поиск новых способов проектирования, асфальтобетонных покрытий, которые будут работать лучше при экстремальных температурах и интенсивных транспортных нагрузках. Система Superpave в первую очередь касается двух проблем, связанных с дорожным покрытием: постоянная деформация, которая является следствием недостаточной прочности асфальтобетона на сдвиг при высоких температурах и низкотемпературных разрушений, которые образуется, когда асфальтобетонное покрытие сжимается, а растягивающее напряжение превышает прочность на растяжение. Решение данных проблем осуществляется путем наиболее рационального подбора составляющих асфальтобетонной смеси. В России данной технологией заинтересовались относительно недавно. В 2016 году были переведены и выпущены предварительные национальные стандарты, в которых описаны требования к материалам и по которым осуществляется проектирование и подбор смеси. В статье проведен обзор технической документации с целью разработки методологии подбора асфальтобетонной смеси. В ходе исследований рассмотрены технологические особенности подбора и проектирования асфальтобетонной смеси по данной методике, составлена блок схема подбора состава асфальтобетона. На основе данной системы возможно проектирование крупнозернистых, мелкозернистых и щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей. Внедрение иностранного опыта в строительстве дорог, может способствовать улучшению и повышению качества российских автомобильных дорог.

**Ключевые слова:** Superpave, проектирование, асфальтобетонные покрытия, методы испытаний.

В любой стране автомобильные дороги являются одной из важнейших отраслей хозяйства. На долю автомобильных перевозок приходится большая часть пассажирского и грузовых потоков, что в свою очередь влияет на состояние дорожного покрытия. Увеличение осевой нагрузки транспортных средств и количества перевозимых грузов ведет к необходимости изменить требования к материалам для строительства автомобильных дорог. Поиск и разработка новых методов проектирования ведется во многих странах. В частности, в США бы разработан метод объемного проектирования асфальтобетонной смеси под названием «Superpave». Внедрение этой технологии может способствовать получению асфальтобетонных покрытий с высокими эксплуатационными качествами и надежностью.

Система Superpave (SUperior PERforming Asphalt PAVEments) была разработана стратегической программой исследований автомобильных дорог (SHRP) в США. Целью программы был поиск новых способов проектирования, ас-

фальтобетонных покрытий, которые будут работать лучше при экстремальных температурах и интенсивных транспортных нагрузках [1].

После пяти лет интенсивных исследований и испытаний SHRP в 1992 году ввела систему Superpave. Затем Федеральная администрация автомобильных дорог (FHWA) взяла на себя ответственность за дальнейшую разработку и проверку спецификаций Superpave, процедур испытаний и инициировала национальную программу по поощрению введения Superpave.

В систему «Superpave» вошли 3 взаимосвязанные компонента, последовательно обновив нормативную базу AASHTO и ASTM:

- SHARP технические условия и методы испытаний битума;
- Superpave технические условия и метод проектирования составов асфальтобетонных смесей с определением поровых характеристик уплотненных образцов асфальтобетона;
- методы испытаний и система анализа реологических свойств асфальтобетона с использо-

ванием математических моделей работоспособности и компьютерного программного обеспечения.

Аббревиатура AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) переводится на русский язык как американская ассоциация служащих государственных автодорог и транспортировки. ASTM International (American Society for Testing and Materials) – американская международная организация, разрабатывающая и издающая добровольные стандарты для материалов, продуктов, систем и услуг [2].

Система Superpave в первую очередь касается двух проблем, связанных с дорожным покрытием: постоянная деформация, которая является следствием недостаточной прочности асфальтобетона на сдвиг при высоких температурах и низкотемпературных разрушений, которые образуется, когда асфальтобетонное покрытие сжимается, а растягивающее напряжение превышает прочность на растяжение [3].

Решение данных проблем осуществляется путем наиболее рационального подбора составляющих асфальтобетонной смеси, а именно:

- 1. минеральных составляющих;
- 2. полимер-битумного вяжущего;
- 3. стабилизирующей добавки.

Определение зернового состава производят с использованием американских, квадратных сит, а при расчете и подборе, содержание всех составляющих асфальтобетонной смеси выражают в процентах от объёма. Такой способ позволяет учитывать плотность материалов, при их подборе.

Зерна щебня должны быть кубовидной формы и состоять из полностью дробленых зерен горных пород, при этом, при проектировании минеральной составляющей, готовят три различных зерновых состава таким образом, чтобы одна кривая приближалась к верхней границе требований к зерновому составу, другая к нижней границе, а третья находилась между этими кривыми [4], рис. 1.

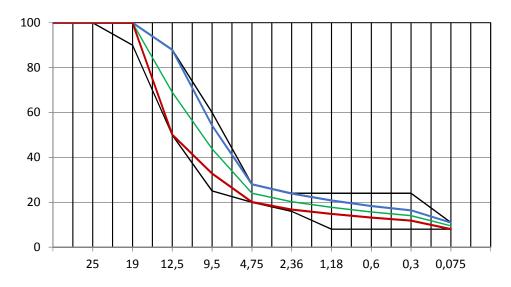


Рис. 1. График кривых различного зернового состава

Довольно сложно подобрать комбинацию минеральной составляющей, удовлетворяющую таким требованиям, не используя узкие фракции.

Минеральный порошок должен быть произведен из карбонатных горных пород. Количество зерен в составе минерального порошка размером менее  $0.075\,$  мм должно находиться в диапазоне от  $70\,$  до  $80\,$ % по массе. Количество зерен размером не менее  $0.30\,$  мм должно быть не менее  $90\,$ % по массе, а зерен размером менее  $1.18\,$  мм не менее  $100\,$ % [4].

Битумное вяжущее подбирается таким образом, чтобы верхнее и нижнее значение марки соответствовало максимальному и минимальному показателю температуры эксплуатации асфальтобетонного покрытия в определенном месте строительства. Допускается применение вяжущего с добавлением модифицирующих добавок [5–7].

Так как система «Superpave» непосредственно ориентирована на температурные и транспортные условия работы покрытия, марку вяжущего подбирают исходя из расчетов эквивалентной одноосной нагрузки, которая составляет 80 кН и расчета температуры покрытия в летний и зимний период времени.

Расчетная летняя температура в покрытии на глубине 2,0 см от поверхности выражается формулой:

$$T20 \pi em = 0.9545 (G_{7} \Omega \Omega \Omega 6 + 81 \dots \Omega \Omega \Omega \Omega 2 \Re \Omega \dots 2 \Omega \Omega \Pi 7.78 - = +^{\circ} C,$$
 (1)

где Tлет — летняя температура воздуха в тени, Lс.u. — северная широта местности.

Расчетная зимняя температура в покрытии на глубине 2,0 см от поверхности выражается формулой:

$$T20\pi em = 0.856T3uM + 1.7 = -\circ C$$
, (2)

где Тзим – зимняя температура воздуха.

Значение температуры в летний и зимний период принимают из базы данных на ближайших метеостанциях, основываясь на ежедневной температуре воздуха не менее чем за 20 лет наблюдений [8].

Затем, учитывая количество эквивалентной одноосной нагрузки и характера движения транспорта в месте проведения работ, верхнее значение марки вяжущего следует увеличить с шагом 6 °C на количество шагов, указанных в таблице Nellone 1 [9].

Таблица 1

#### Подбор марки вяжущего

	Количество шагов для увел	пичения высокотемпературных	свойств вяжущего
Приложения ЭООН <sup>1)</sup> , млн		Характер движения	
	Неподвижный <sup>2)</sup>	Медленный <sup>3)</sup>	Стандартный $^{4)}$
<0,3	$f^{5)}$	-	-
От 0,3 до <3	2	1	-
От 3 до <10	2	1	-
От 10 до <30	2	1	$f^{5)}$
≥30	2	1	1

I — ЭООН — эквивалентная одноосная нагрузка, равная 80 кН, передаваемая на дорожное покрытие от одной оси транспортного средства. Рассчитывают на 20 лет срока службы автомобильной дороги; 2 — средняя скорость движения транспорта — меньше 20 км/ч.; 3 — Средняя скорость движения транспорта находится в диапазоне от 20 до 70 км/ч.; 4 — средняя скорость движения транспорта — более 70 км/ч.; 5 — увеличение марки вяжущего определяют по согласованию с заказчиком.

Основная концепция выбора битума, при проектировании состава асфальтобетона по технологии Superpave состоит в следующем:

- 1. Смесь должна содержать достаточно много битума с учетом адсорбации его части открытыми порами на поверхности минеральных зерен, что бы все минеральные зерна были им покрыты;
- 2. Битума должно быть достаточно для обеспечения долговечности покрытия при окислительном старении и увлажнении [10].

Оптимальное количество битума подбирают так, чтобы количество пор и пустот в уплотненной щебеночно-мастичной смеси соответствовало требованиям ПНСТ 127. Показатель воздушных пустот (Va), должен составлять —  $4.0 \pm 0.3$  %. Для этого, на выбранном оптимальном зерновом составе готовят не менее трех вариантов смеси с различным содержанием вяжущего и определяя свойства каждой смеси, подбирают оптимальное количество вяжущего [11].

Уплотнение смеси производят при помощи гиратора. Использование такой установки позволяет быстро получить данные по приготовленной смеси.

Одна из особенностей системы «Superpave», состоит в том, что она ориентирована на фундаментальные, а не на эмперические, физико-механические характеристики вяжущего. В традиционных стандартах многие показатели свойств вяжущего (глубина проникания иглы, температура размягчения, растяжимость и другие) были эмпирическими величинами. Они могли быть успешно использованы только для определенного вяжущего в определенных условиях. Например, глубина проникания иглы в битум зависит от диаметра иглы, формы ее наконечника; температура размягчения по методу «кольцо и шар» зависит от диаметра кольца, на которое нанесена пленка битума, и от диаметра и массы шара. Фундаментальные же характеристики не должны зависеть от размеров или от конструкции прибора,

на котором их определяют. Такими характеристиками являются, например, модуль сдвига, функция релаксации, плотность (масса единицы объема), «абсолютная» (динамическая) вязкость при нулевой скорости деформации [10–14].

В целом, проектирование по технологии Suреграуе, можно разделить на два этапа. На первом этапе подбираются минеральные компоненты смеси, вяжущее и минеральная добавка. При этом, выбранные материалы должны полностью соответствовать стандартам ПНСТ. Если все требования соблюдаются, на основе этих материалов осуществляют подбор трех вариантов смеси, с различным зерновым составом, рис. 2.

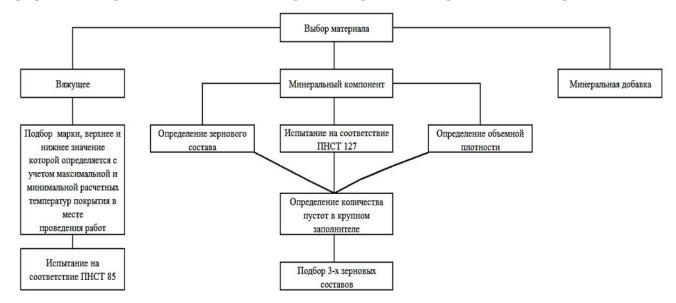


Рис. 2. Первый этап проектирования по технологии Superpave

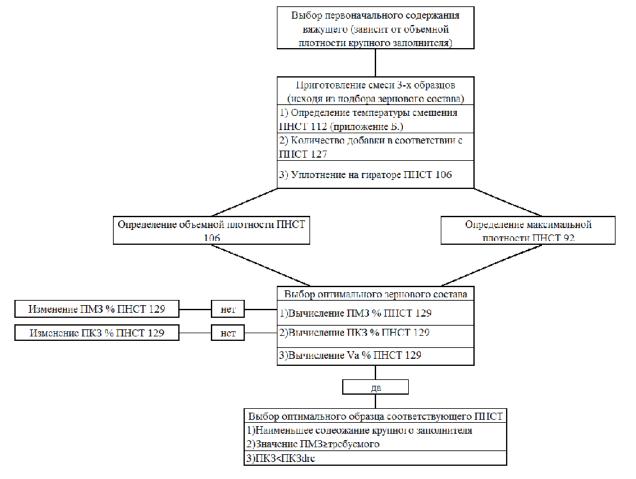


Рис. 3. Второй этап проектирования по технологии Superpave

На втором этапе подбирают количество вяжущего и приготавливают смесь асфальтобетона на 3-х различных зерновых составах. Полученную смесь испытывают на соответствие ПНСТ и выбирают вариант, который удовлетворяет всем параметрам, рис. 3.

Если такого варианта нет, составляющие смеси пытаются корректировать, если и это не помогает, следует изменить исходные материалы и проделать весь подбор заново.

Таким образом, на основе данной системы возможно проектирование крупнозернистых, мелкозернистых и щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей. Внедрение иностранного опыта в строительстве дорог, может способствовать улучшению и повышению качества российских автомобильных дорог.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Радовский Б.С. Проектирование состава асфальтобетонных смесей в США по методу Суперпейв // Дорожная техника. 2007. № 1. С. 86–99.
- 2. Кирюхин Г.Н. Плюсы и минусы системы проектирования асфальтобетона «суперпэйв» // Мир дорог. 2014. № 74. С. 2–5.
- 3. Траутваин А.И., Ядыкина В.В., Муленко Е.С. Изучение физико-механических свойств асфальтобетонных образцов на активированных минеральных порошках различных составов // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. №4. С. 44–50.
- 4. ПНСТ 129. Смеси асфальтобетонные щебеночно-мастичные. Введ. 15.07.2016. М.: ООО «ИТЦ». 2016. 12 с.
- 5. Траутваин А.И., Яковлев Е.А., Силко А.А. Взаимосвязь деформативной устойчивости асфальтобетонных покрытий и основных свойств

- органических вяжущих материалов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 9 (705). С. 50–59.
- 6. Ядыкина В.В., Гридчин А.М., Траутваин А.И., Вербкин В.И. Исследование влияния различных полимеров и пластификаторов на свойства битума БНД 60/90 и асфальтобетона на его основе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. N 6. С. 40–45.
- 7. Траутваин А.И., Гридчин А.М., Вербкин В.И. Разработка комплексного полимерного вяжущего для органоминеральных смесей, позволяющего снизить образование колеи на асфальтобетонном покрытии // Наукоемкие технологии и инновации БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. С. 112–116.
- 8. Василенко С.Д. Проектирование состава асфальтобетонных смесей в США по методу суперпейв. Технические рекомендации (извлечение). СПБ., ЗАО «Кодекс», 2012. 25 с.
- 9. ПНСТ 127. Смеси асфальтобетонные щебеночно-мастичные. Введ. 15.07.2016. М.: ООО «ИТЦ». 2016. 7 с.
- 10.ПНСТ114. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Введ. 28.04.2016. М.: ООО «ЦМИиС». 2016. 11 с.
- 11. Берилин А., Никольский В., Красоткина И. Опыт применения стандартов Superpave // Дороги М.: 2016. №3. С. 73–80.
- 12. Радовский Б.С. Суперпейв: требования к каменному материалу // Автомобильные дороги. 2014. № 7. С. 56–67.
- 13. Радовский Б.С. Современное состояние разработки американского метода проектирования асфальтобетонных смесей суперпейв // Дорожная техника. 2008. С. 12–22.
- 14. Беляев Н.Н. Американская система Superpave: проверка на российских дорогах // Автомобильные дороги. 2014. № 6. С. 62–64.

#### Информация об авторах

**Траутваин Анна Ивановна**, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог. E-mail: trautvain@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Акимов Андрей Евгеньевич**, кандидат технических наук, ведущий инженер ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова. E-mail: akimov548@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Денисов Василий Петрович**, заведующий лабораторией. E-mail: wpdbel@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Лашин Максим Викторович**, аспирант. E-mail: Nedostypnbli@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в январе 2019 г.

© Траутваин А.И., Акимов А.Е., Денисов В.П., Лашин М.В., 2019

<sup>1</sup>Traytvain A.I., <sup>1</sup>Akimov A.E., <sup>1</sup>Denisov V.P., <sup>1,\*</sup>Lashin M.V.

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov Russia, 308012, Belgorod, st. Kostykova, 46 \*E-mail: Nedostypnbli@yandex.ru

## FEATURES OF THE METHOD OF SURROUNDED DESIGN OF ASPHALT-CONCRETE ON SUPERPAVE TECHNOLOGY

Abstract. The article describes the technology of designing asphalt pavements, according to the Superpave method. The Superpave System (SUperior PERforming Asphalt PAVEments) is developed by the US Strategic Highway Research Program (SHRP). The goal of the program is to search for new ways of designing asphalt concrete pavements that will work better under extreme temperatures and intensive traffic loads. The Superpave system is primarily concerned with two problems associated with road surface: constant deformation, which is a consequence of insufficient strength of asphalt concrete in shear at high temperatures; and low-temperature damage, which is formed during the compression of the asphalt concrete pavement, the tensile stress exceeds the tensile strength. The solution of these problems is carried out by the most rational selection of components of the asphalt concrete mix. This technology has interested Russia relatively recently. In 2016, preliminary national standards have been translated and issued. They describe requirements of materials for design and selection of the mixture. The article reviews technical documentation in order to develop a methodology for the selection of asphalt mix. In the course of the research, the technological features of selection and design of the asphalt mix using the given method are considered and a block diagram is made for the selection of asphalt composition. This system makes it possible to design the fine-grained and gravelmastic asphalt mixes. The introduction of foreign experience in the construction of roads can contribute to the quality improvement of Russian highways.

Keywords: Superpave, design, asphalt pavement, test methods.

#### REFERENCES

- 1. Radovskiy B.S. Design of asphalt mixes in the USA by the method of Superpave. Road machinery, 2007, no. 1, pp. 86–99.
- 2. Kiryhin G.N. Pros and cons of the design of asphalt concrete «Superpave». World of roads, 2014, no. 74, pp. 2–5.
- 3. Trautvain A.I., Yadykina V.V., Mulenko E.S. Study of the physical and mechanical properties of asphalt concrete samples on activated mineral powders of various compositions. Construction materials and products, 2018, vol. 1, no. 4, pp. 44–50.
- 4. PNST 129. Asphalt mixes, crushed stonemastic. Introduced in 15.07.2016. M.: «ITZ», 2016, 12 p.
- 5. Traytvain A.I., Yakovlev E.A., Silko A.A. Interrelation of deformative stability of asphalt concrete pavements and basic properties of organic binding materials. News of higher educational institutions. Building, 2017, no. 9, pp. 50–59.
- 6. Yadykina V.V., Gridchin A.M., Traytvain A.N., Verbkin V.I. Study of the effect of various polymers and plasticizers on the properties of BND 60/90 bitumen and asphalt concrete based on it, Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2015, no. 6, pp. 40–45.

- 7. Traytvain A.I., Gridchin A.M., Verbkin V.I., Development of complex polymer binder for organic mixtures, allowing to reduce the formation of ruts on asphalt concrete pavement. High-Tech Technologies and Innovations of BGTU, 2014, pp. 112–116.
- 8. Vasilenko S.D. The design of the composition of asphalt mixes in the US by the method of superpave. Technical recommendations (extract). SPB., ZAO «Code», 2012, 25 p.
- 9. PNST 127. Mixes asphalt shchebeno-mastic. Introduced in 15.07.2016. M.: «ITZ», 2016, 7 p.
- 10.PNST 114. Asphalt road and asphalt concrete mixes. Introduced in 28.04.2016. M.: «TSMiS», 2016, 11 p.
- 11.Berilin A., Nikolskiy V., Krasotkina I. Experience using Superpave standards. Roads. M.: 2016, no. 3, pp. 73–80.
- 12.Radovskiy B.S. Superpave: Stone Material Requirements, Roads, 2014, no. 7, pp. 56–67.
- 13.Radovskiy B.S. The current state of development of the American method of designing asphalt concrete mixtures Superpave. Road machinery, 2008, pp. 12–22.
- 14.Belyaew N.N. American Superpave system: checking on Russian roads. Car roads, 2014, no. 6, pp. 62–64.

Information about the authors

**Trautvain, Anna I.** PhD, Assistant professor. E-mail: trautvain@bk.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Akimov, Andrey E.** PhD, Leading engineer of the Center for High Technologies. E-mail: akimov548@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Denisov, Vasiliy P.** Head of the laboratory. E-mail: wpdbel@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Lashin, Maksim V**. Research assistant. E-mail: Nedostypnbli@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in January 2019

#### Для цитирования:

Траутваин А.И., Акимов А.Е., Денисов В.П., Лашин М.В. Особенности метода объемного проектирования асфальтобетона по технологии superpave // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 8–14. DOI:  $10.34031/article\ 5ca1f62f6b9a09.67742444$ 

#### For citation:

Traytvain A.I., Akimov A.E., Denisov V.P., Lashin M.V. Features of the method of surrounded design of asphalt-concrete on superpave technology. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 8–14. DOI: 10.34031/article\_5ca1f62f6b9a09.67742444

DOI: 10.34031/article\_5ca1f62fb7b990.06921720

#### <sup>1</sup>Соков В.Н., <sup>1</sup>Баженова С.И., <sup>1,</sup>\*Петров М.А., <sup>1</sup>Пепеляева А.Ю.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет Россия,129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26 \*E-mail: bk msk@mail.ru

#### РАЗРАБОТКА КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ ВОДНО-ДИСПЕРСИОННОЙ КРАСКИ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛАЦЕТАТНОЙ ДИСПЕРСИИ

Аннотация. Интерьерная краска занимает особое место при проведении внутренних отделочных работ, вследствие чего, человек вынужден длительное время контактировать и работать с красящим материалом, а затем и постоянно находиться в помещениях с данном видом покрытия. К сожалению, не все краски способны обеспечить комфортное и безопасное использование ее в закрытом помещении. В данной работе разработан компонентный состав экологически чистой водно-дисперсионной краски на основе поливинилацетатной дисперсии, обеспечивающей защиту человека от канцерогенного, мутагенногои токсического воздействия. Также рассматриваются основные экологические требования, предъявляемые нормами, установлен контроль содержания входящих в состав краски веществ, способных нанести вред человеку. В работе раскрыта роль влияния отдельных компонентов краски на функциональность человека и возможность их замены без понижения качества исследуемого продукта. Определены основные физико-механические свойства материала: условная вязкость, плотность, массовая доля нелетучих веществ, адгезия покрытия, степень перетира, стойкость к статическому воздействию воды, атмосферостойкость и другие. Уделено внимание применяемым методикам исследования. По результатам испытаний была получена водно-дисперсионная краска с высокими техническими характеристиками, которая может применяться для всех типов зданий и сооружений, а также носить рекомендательный характер для детских, лечебных и профилактических учреждений.

**Ключевые слова:** краска, краска интерьерная, безопасность, экологичность, отделочный материал, поливинилацетатная дисперсия.

В эру экологических катастроф, эпидемий, развитий хронических заболеваний, следует особое внимание уделять безопасности жизнедеятельности человека, в частности огородить его от различных выделений вредных веществ. Повышение эффективности строительных материалов, то есть улучшение существующих или придание им новых свойств — это одна из актуальных задач современного развивающегося производства.

Основной задачей данной работы является разработка компонентного состава стойкой к мокрому истиранию, экологически чистой интерьерной водно-дисперсионной краски на основе поливинилацетатной дисперсии.

Под термином «экологически чистая краска» подразумевается:

- применение экологически совместимых материалов и компонентов;
- при производстве не нанесен вред окружающей среде;
- производимый отделочный материал должен быть нетоксичным, биоразлагаемым, экономически целесообразным и энергосберегающим.

Разрабатываемый отделочный материал должен обладать хорошими физико-механическими свойствами, а показатели, описывающие выделение вредных веществ с готового покрытия

и на всех этапах производства, должны соответствовать существующим нормам как российских, так и зарубежных стандартов, а для безукоризненного эффекта экологически чистой краски зачастую быть ниже в десятки и сотни раз [1].

Действующим документом, регламентирующим единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к продукции, подлежащей санитарно-эпидемиологическому надзору на территории РФ является Решение Таможенного Союза №299 от 28 мая 2010 г. (далее по тексту РТС №299) будут являться:

- кожно-резорбтивное действие в рекомендуемом режиме применения (отсутствие клинических признаков интоксикации во время экспозиции);
- раздражающие действие на кожные покровы в рекомендуемом режиме применения (0– 4 балла);
- сенсибилизирующие действие (допускается наличие аллергенного эффекта, при условии внесения в маркировку средств соответствующих предупреждающих надписей и использования СИЗ);
- содержание формальдегида (не более  $0.01 \text{ мг/м}^3$ ); далее по тексту отформатировать;
  - содержание стирола (не более  $0,002 \text{ мг/м}^3$ ),

- содержание дибутилфталата (не более  $0.10 \text{ мг/м}^3$ );
  - содержание ксилола (не более  $0,1 \text{ мг/м}^3$ );
  - запах (не более 2 баллов).

Благодаря соответствию заявленным контрольным параметрам, проектируемая краска будет носить рекомендательный характер для внутренних работ в детских, лечебных и профилактических учреждениях [2].

В процессе проведения исследовательской работы, для выявления оптимальной рецептуры были проведены пробные замесы. Получившиеся образцы были испытаны согласно заданным параметрам качества [2]. По результатам выявлены закономерности:

Первое: стиролакриловую дисперсию (по некоторым данным ее содержание в красках с аналогичными физико-механическими свойствами доходит до 55 %) заменить на поливинилацетатную дисперсию.

Исходя из паспортов безопасности следует, что в стироакриловой дисперсии содержатся вредные вещества, такие как полимеры проп-2еновой и 2-метилпроп-2-еновой кислот и их производных, проп-2-енонитрил+, стирол. Все перечисленные вещества относятся к разным классам опасности и оказывают раздражающее действие, могут вызвать аллергическую реакцию. Стирол, в частности, обладает мутагенным и канцерогенным эффектом и имеет очень неприятный запах (порог ощущения запаха  $-0.07 \text{ мг/м}^3$ ). При хронической интоксикации у рабочих бывают поражены центральная и периферическая нервная система, система кроветворения, пищеварительный тракт, нарушается азотисто-белковый, холестериновый и липидный обмен.

Второе: формальдегид содержащие консерванты заменить на безформальдегидные: микробиоцид на основе изотиазолонов. Известно, что формальдегид является ядом с общим токсическим действием на организм (поражает жизнен важные системы внутренних органов человека, органы зрения, является сильным аллергеном, обладает канцерогенным, тератогенным (воздействие на плод), эмбритоксическим действием). При воздействии формальдегида на клеточном уровне вызывается дефицит молекул АТФ, вследствие чего происходит разрушение нервной ткани и зрительных анализаторов. Заменив его на микробиоцид на основе изотиазолонов, были получены такие положительные качества, как отсутствие ярко выраженного запаха, быстрое высыхание покрытия, пожаробезопасность состава.

К сожалению, абсолютное отсутствие вредных веществ в данном компоненте краски избежать не удастся, но их количественное значение

в продукте, без потери физико-механических свойств, не сопоставимо с формальдегидом.

Третье: при подборе рецептуры было принято решение полностью отказаться от использования коалесцентов, главными задачами которых являются объединение частиц дисперсии в однородный слой полимерной пленки, после испарения воды с поверхности покрытия, и общее облегчение процесса коалесценции, путем понижения минимальной температуры пленкообразования. В результате многочисленных опытов была разработана интерьерная краска, стойкая к мытью, а большой процент расхода поливинилацетатной дисперсии на единицу продукта позволил произвести краску без добавления коалесцента, с неизмененными физико-механическими свойствами.

Учитывая ранее описанные особенности состава, в ходе испытаний была выявлена следующая оптимальная рецептура водно-дисперсионной интерьерной краски на поливинилацетатной дисперсии, компоненты данной разработки сведены в таблицу 1.

Для определения технических показателей существует ряд методов испытаний, с помощью которых определяется соответствие краски заданным требованиям [1].

Отбор проб производился по ГОСТ 9980.2 [3].

Для подготовки средней пробы к исследованиям по ГОСТ 28196 п. 4.2 [4] с поверхности материала была удалена пленка, далее испытуемый материал был тщательно перемешен до однородного состояния.

Допускается определять цвет и внешний вид пленки на образцах после испытаний по показателю «Укрывистость высушенной плёнки» по ГОСТ 28196 п.4.3 [4].

Укрывистость высушенной пленки возможно определить двумя методами, а именно:

- 1. Нанесение материала на лабораторную карту.
- 2. Нанесение на стеклянную пластинку по ГОСТ 8784 раздел 1 [5].

В данной работе для выявления этой характеристики использовали метод №1: на лабораторную карту с левой стороны с помощью ракли в 1 слой была нанесена исследуемая проба, толщиной 250 мкм; с правой – контрольный образец. После сушки, в течение одного часа проводилось визуальное сравнение исследуемой пробы с контрольным образцом при естественном дневном свете в помещении при температуре воздуха (20±2) °C.

Динамическая вязкость полученной поливинилацетатной краски была измерена с помощью ротационного вискозиметра Haake VT 24. Ход испытания: пробу материала тщательно перемешивали до однородной массы, избегая образования в ней пузырьков воздуха. Испытания были проведены при температуре воздуха  $(20\pm2)$  °C. Штифт вращающегося тела погружали в пластмассовый стаканчик, с исследуемой пробой, до метки, далее запускали двигатель. Через

одну минуту снимались показания измеряемой величины, со шкалы вискозиметра Haake. После окончания измерения штифт вращающегося тела осторожно промывался водой, чтобы предотвратить его повреждение. Каждое испытание проводилось два раза, а результат испытания был принят как среднее арифметическое число.

Таблица 1

#### Рецептура водно-дисперсионной краски

Компоненты	Процентное соотношение, %
Вода	16,00–22,00
Консервант	0,10-0,30
Пеногаситель	0,10-0,50
Наполнитель	20,00–30,00
Дисперсия ПВА	30,00–35,00
Белый пигмент	13,00–18,00
Силиконовая добавка	0,50–1,50
Модифицирующие добавки	0,50–1,00

*Примечание*: для сохранения уникальности данной рецептуры процентное соотношение компонентов в таблице приведено с заведомой погрешностью.

Для определения рН-диапазона использовали рН-метр со стеклянным электродом, погрешность измерения не более 0,1, пластмассовый стаканчик (объемом 240 мл, высотой 8,0 см, верхним диаметром 6,7 см, нижним диаметром 5,2 см.), дистиллированная вода по ГОСТ 6709 [14]. Все испытания проводились в соответствии ГОСТ 52020 п. 9.4 [1].

Так же были проведены исследования по определению массовой доли нелетучих веществ по ГОСТ 31939 [6].

Для обработки результатов массовую долю нелетучих веществ (X), в процентах, рассчитывали по следующей формуле

$$X = \frac{m_2}{m_1} \cdot 100$$
 (1),

где  $m_1$  — масса пробы, взятая для испытания, г;  $m_2$  — масса сухого остатка, г.

За результат анализа приняли среднее арифметическое результатов двух параллельных определений. Окончательный результат округлили до десятых долей.

Плотность определена по ГОСТ Р 53654.1 [7], адгезию покрытия испытывали согласно ГОСТ 31149 [8], степень перетира по ГОСТ 31973-2013 [9], стойкость к статическому воздействию воды по ГОСТ 9.403. метод А [10], сопротивление паропроницаемости по ГОСТ 25898 [11], условную светостойкость покрытия по ГОСТ 21903 [12], атмосферостойкость по ГОСТ Р 52020 п. 9.7 [1]. Контроль концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны определялся по ГОСТ 12.1.014 [13].

Данные испытаний были сведены в табл. 2.

Согласно результатам испытаний, типовые образцы указанной продукции были подвергнуты испытаниям на соответствие Единым санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям, утвержденным решением ТС № 299.

По результатам проведенных испытаний продукции отклонений от Единых санитарноэпидемиологических и гигиенических требований [2] не установлено.

В результате исследований была получена рецептура покрытия, которое:

- 1. Не содержит токсинов.
- 2. Не имеет ярко выраженного запаха.
- 3. Быстро сохнет.
- 4. Пожаробезопасное.
- 5. Высокая адгезия и хорошая стойкость к щелочи.
- 6. Стойкость к мокрому истиранию.
- 7. Шелковисто-матовая

Учитывая процентное соотношение сырья, способ применения, при использовании краски вредные вещества в воздух рабочей зоны не выделяются. В процессе производства лакокрасочного покрытия краска не создает в атмосферном воздухе специфического запаха, превышающего допустимую норму. Из готового к эксплуатации покрытия химические вещества в атмосферный воздух также не выделяются. В результате проведенной работы нами был получен готовый к применению стойкой к мокрому истиранию, эколо-

гически чистый материал на основе поливинилацетатной дисперсии, обеспечивающей защиту человека от канцерогенного, мутагенного и токсического воздействия.

Данная водно-дисперсионная краска на основе поливинилацетатной дисперсии может использоваться для внутренних работ во всех типах

зданий и сооружений, не нарушая экологическую составляющую обрабатываемой поверхности. Полученная краска образует стойкое покрытие и носит рекомендательный характер для детских дошкольных и образовательных учреждений, для реставрационных работ, культурно-массовых и жилых типов зданий.

 Таблица 2

 Физико-механические показатели водно-дисперсионной краски

Наименование показателей	Значение	Методы испытаний
1. Внешний вид плёнки	После высыхания композиция должна образовывать плёнку с ровной однородной матовой поверхностью	
2. Цвет плёнки и краски	Должен находиться в пределах допустимых отклонений, установленных контрольными образцами	По ГОСТ 29319
	белый	
3. Укрывистость высушенной плёнки: 3.1. Метод нанесения на лабораторную карту 3.2. Метод нанесения на стеклянную	Должна находиться в пределах допускаемых отклонений, установленных контрольными образцами	По ГОСТ 8784
пластинку, $\Gamma/M^2$ , не более	200,00	
4. Динамическая вязкость по вискозиметру Хааке, мПа·с, при температуре (20±2) °С, не менее	325,00	Inhous*
5. Плотность, г/см³, не менее	1,45	По ГОСТ 31992.1
6. pH, при температуре (20±2) °С, не менее	8,00	По ГОСТ 52020 п.9.4
7. Массовая доля нелетучих веществ, % не менее	60,00	По ГОСТ 31939
8. Адгезия покрытия, баллы, не более: -к штукатурке	1	По ГОСТ 31149
9. Адгезия покрытия, Мпа, не менее -к бетону	0,8	По ГОСТ 28574
10. Условная светостойкость покрытия, ч, не менее	24	По ГОСТ 21903
11. Время высыхания до степени три при температуре (20±2) °C, ч, не более	1	По ГОСТ 19007
12. Степень перетира, мкм, не более	70	По ГОСТ Р 52753
13. Смываемость пленки, г/м <sup>2</sup> , не более	3,5	По ГОСТ Р 52020 п.9.5
14. Стойкость к статическому воздействию воды при температуре (20±2) °C, ч, не менее	12	По ГОСТ 9.403, метод А
15. Атмосферостойкость, срок службы, год, в условиях эксплуатации: У1, ХЛ1, УХЛ1	Ограниченно атмосферостойкое 2	По ГОСТ Р 52020 п. 9.7
У2,У3, ХЛ2,УХЛ2,ХЛ3, УХЛ3		

<sup>\*</sup>Inhous – стандарт, введенный внутри организации и не выходящий за ее рамки

## Результаты испытаний на соответствие санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям

No	Определяемые показатели	Ед. измерения	Значение и допуск показателя «не более»	НД на метод испытания	Результаты испытаний
1	Кожно-резорб- тивное действие в рекомендуемом режиме примене- ния		Отсутствие клинических признаков интоксикации во время экспозиции	МУ 2196-80	Резорбтивное действие не выявлено
2	Раздражающее действие на кожные покровы в рекомендуемом режиме применения	балл	0–4	МУ 2196-80	2
3	Сенсибилизиру- ющее действие		Допускается наличие аллергенного эффекта, при условии внесения в маркировку средств соответствующих предупреждающих надписей и использования СИЗ	МУ 1.1.568-96	Сенсибилизирующее действие выявлено
4	Формальдегид	MΓ/M <sup>3</sup>	0,01	РД 52.04.186-89	<0,01
5	Стирол	MΓ/M <sup>3</sup>	0,002	МУК 4.1.3171-14	<0,001
6	Дибутилфталат	MΓ/M <sup>3</sup>	0,10	ГОСТ ИСО 16017-2007	<0,05
7	Ксилол	MΓ/M <sup>3</sup>	0,1	MP 01.023-07	<0,1
8	Запах	MΓ/M <sup>3</sup>	2	МУ 2.1.2.1829-04	1

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. ГОСТ Р 52020-2003 Материалы лакокрасочные водно-дисперсионные. Общие технические условия
- 2. Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю), утв. решением Комиссии таможенного союза № 299 от 28.05.2010 (глава 2, раздел 5)
- 3. ГОСТ 9980.2-2014 Материалы лакокрасочные и сырье для них. Отбор проб, контроль и подготовка образцов для испытаний
- 4. ГОСТ 28196-89 Краски водно-дисперсионные. Технические условия
- 5. ГОСТ 8784-75 (СТ СЭВ 5904-75) Материалы лакокрасочные. Методы определения укрывистости
- 6. ГОСТ 31939-2012 (ISO 3251:2008) Материалы лакокрасочные. Определение массовой доли нелетучих веществ
- 7. ГОСТ Р 53654.1-2009 (ИСО 2811-1:1997) Материалы лакокрасочные. Метод определения плотности. Часть 1. Пикнометрический метод

- 8. ГОСТ 31149-2014 (ISO 2409:2013) Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатого надреза
- 9. ГОСТ 31973-2013 (ISO 1524:2000, MOD) Материалы лакокрасочные. Метод определения степени перетира
- 10. ГОСТ 9.403-80 (СТ СЭВ 5260-85) Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия лакокрасочные. Методы испытаний на стойкость к статическому воздействию жидкостей
- 11. ГОСТ 25898-2012 Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропроницанию
- 12. ГОСТ 21903-76 Материалы лакокрасочные. Методы определения условной светостойкости
- 13. ГОСТ 12.1.014-84 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Воздух рабочей зоны. Метод измерения концентраций вредных веществ индикаторными трубками
- 14. ГОСТ 6709-72 Вода дистиллированная. Технические условия (с Изменениями N 1, 2)

Информация об авторах

**Соков Виктор Николаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов. E-mail: sersok\_07@mail.ru. Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26.

**Баженова Софья Ильдаровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов. E-mail: sofia.bazhenova@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26.

**Петров Максим Андреевич**, студент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов. E-mail: bk\_msk@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26.

**Пепеляева Ангелина Юрьевна**, студент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов. E-mail: pepelyaevaanyu@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26.

Поступила в декабре 2018 г.

© Соков В.Н., Баженова С.И., Петров М. А., Пепеляева А.Ю., 2019

#### <sup>1</sup>Sokov V.N., <sup>1</sup>Bazhenova S.I., <sup>1,\*</sup>Petrov M.A., <sup>1</sup>Pepelyaeva A.Yu.

<sup>1</sup>Moscow StateUniversity of Civil Engineering (National Research University) Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe sh. 26 \*E-mail: bk msk@mail.ru

## DEVELOPMENT OF ECO-FRIENDLY WATER-DISPERSION PAINT BASED ON POLYVINIL ACETATE DISPERSION

Abstract. Interior paint is important for interior decorating; this is followed by a long time working with the coloring material and a constant stay in rooms with the paint. Unfortunately, not all paints provide comfortable and safe use. This article presents the development of eco-friendly water-dispersion paint based on polyvinyl acetate dispersion. This paint provides protection from carcinogenic, mutagenic and toxic effects. The main environmental requirements set by the standards are considered; the content of substances in the paint that harms people is monitored. The influence of some paint components on person's functionality and the possibility of their replacing without quality reduction is disclosed in the paper. The main physical and mechanical properties such as conditional viscosity, density, mass fraction of nonvolatile substances, coating adhesion, milling degree, resistance to static action of water and weather resistance are determined. Attention is paid to the applied research methods. As a result of testing, a water-dispersion paint with high technical characteristics is obtained. It can be used in all types of buildings and structures and be recommended for children's, medical and preventive institutions.

Keywords: paint, interior paint, safety, eco-friendly, facing material, polyvinyl acetate dispersion.

#### **REFERENCES**

- 1. GOST R 52020-2003 Waterdispersible paint materials. General specifications.
- 2. Uniform sanitary-epidemiological and hygienic requirements for goods subject to sanitary and epidemiological supervision (control), approved. Decisions of the Commission of the Customs Union No. 299 of May 28, 2010 (Chapter 2, Section 5).
- 3. GOST 9980.2-2014 Paint materials and raw materials for them. Sampling, examination and preparation of test samples.
- 4. GOST 28196-89 Water-dispersion paints. Specifications.
- 5. GOST 8784-75 Paint materials. Methods for determination of hiding power.

- 6. GOST 31939-2012 (ISO 3251:2008) Paint materials. Determination of non-volatile-matter mass fraction.
- 7. GOST R 53654.1-2009 Paint materials. Method for determination of density. Part 1. Pyknometer method.
- 8. GOST 31149-2014 (ISO 2409:2013) Paint materials. Determination of adhesive by cross-cut method.
- 9. GOST 31973-2013 (ISO 1524:2000, MOD) Paint materials. Method for determination of fineness of grind.
- 10. GOST 9.403-80 Unified system of corrosion and ageing protection. Paint coatings. Test methods for resistance to liquid static effect.

- 11. GOST 25898-2012 Building materials and products. Methods for determination of water vapour permeability and steam-tightness.
- 12. GOST 21903-76 Paint materials. Methods of relative light-fastness determination.
- 13. GOST 12.1.014-84 Occupational safety standards system. Air in the zone of operation. Method of measuring unhealthy matters concentration using indicator tubes.
- 14. GOST 6709-72 Distilled water. Specifications.

#### Information about the authors

**Sokov, Viktor N.** DSc, Professor. E-mail:sersok\_07@mail.ru. Moscow StateUniversity of Civil Engineering (National Research University). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe sh. 26.

**Bazhenova, Sofya I.** PhD, Assistantprofessor.E-mail: sofia.bazhenova@gmail.com. Moscow StateUniversity of Civil Engineering (National Research University). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe sh. 26.

**Petrov, Maksim A.** Bachelor student. E-mail: bk\_msk@mail.ru. Moscow StateUniversity of Civil Engineering (National Research University). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe sh. 26.

**Pepelyaeva, Angelina Yu.** Bachelor student. E-mail: pepelyaevaanyu@gmail.com. Moscow StateUniversity of Civil Engineering (National Research University). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe sh. 26.

Received in Desember 2018

#### Для цитирования:

Соков В.Н., Баженова С.И., Петров М.А., Пепеляева А.Ю. Разработка компонентного состава экологически чистой водно-дисперсионной краски на основе поливинилацетатной дисперсии // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 15–21. DOI: 10.34031/article 5ca1f62fb7b990.06921720

#### For citation:

Sokov V.N., Bazhenova S.I., Petrov M.A., Pepelyaeva A.Yu. Development of eco-friendly water-dispersion paint based on polyvinil acetate dispersion. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 15–21. DOI: 10.34031/article 5ca1f62fb7b990.06921720

## DOI: 10.34031/article\_5ca1f6300a4956.62644399 <sup>1</sup>Шорстова Е.С., <sup>1</sup>Клюев С.В., <sup>1</sup>Клюев А.В.

<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
\*E-mail: klyuyev@yandex.ru

#### ФИБРОБЕТОН ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы возможности применения 3-D печати в строительной индустрии. Проведен анализ работ, выполненных по этому направлению в мире. Также представлены основные преимущества такого способа возведения конструкций и зданий в целом. Были проведены экспериментальные исследования с применением компонентов смеси: «Себряковцемент» марки ЦЕМ І 42,5H, тонкомолотый кварцитопесчаник с удельной поверхностью 700 м²/кг с использованием гипса. В качестве мелкого заполнителя использовался песок. Для придания смеси пластичности применялись такие добавки как пластификатор ПФМ-НЛК и Мигарог Котві 756. В качестве армирующей была использована базальтовая фибра. Были разработаны составы бетонной смеси дисперсно армированной базальтовой фиброй. В работе удалось разработать состав фибробетонной смеси, который можно использовать для 3D-печати. Были определены его прочностные характеристики, позволяющие сделать вывод о том, что данный состав соответствует всем требованиям, предъявляемым для такой технологии.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, строительство, 3D-печать, строительные технологии, конструкции, здания, структурная оптимизация.

Введение. В настоящее время бетон является одним из наиболее важных строительных материалов современности. Ежегодно по всему миру, предположительно, производится 8 миллиардов м³ бетона. Это означает, что примерно 1 м³ бетона производится на одного человека в год. Историю бетона как строительного материала относят к римскому периоду. Существует много способов получения высококкачественных бетонных составов для строительной индустрии [9–14].

Идея печати бетона была впервые продемонстрирована Хошневисом в конце 90-х годов. С тех пор этот метод был скопирован различными научными организациями по всему миру, и значительный рост разработанных составов бетонной смеси наблюдается после 2012 года. В университете Эйндховена проведены исследования 3D-бетонной печати с использованием технологии контурной обработки (рис. 1).







Рис. 1. Крупномасштабный бетонный принтер в Технологическом университете Эйндховена и некоторые печатные элементы

3D-печать, потенциально, способна решать следующие проблемы:

- возможна новая степень архитектурной свободы в дизайне, поскольку принтер может легко создавать более сложные формы, без установки опалубки;
- роботизированный комплекс берет на себя тяжелую работу, и вибрация бетона больше не требуется;

• производительность может быть увеличена из-за отсутствия опалубки, и роботы могут работать непрерывно [1–3].

Трехмерная печать бетона определенно демонстрирует высокий потенциал, который может быть классифицирован на иерархические уровни. Самый высокий уровень — возводить на месте целые здания. В настоящее время это направление только начинает развиваться, поскольку качество разработанных составов бетонных смесей для

3D-печати еще не может конкурировать с традиционными бетонными структурами. Кроме того, безопасность изделий и конструкций, полученных этим способом также остается не безопасной, поскольку эти составы не достаточно изучены по прочностным и деформативным характеристикам, тем самым вопрос долговечности возводимых зданий и сооружений пока остается под вопросом.

Печать зданий и сооружений на основе бетонных составов в настоящее время в США, Канаде, Японии, Германии, Китае и во многих других странах мира находит широкое применение. Для повышения эксплуатационных характеристик смеси мы предлагаем армирование фиброй [4–8].

**Методология.** В ходе проведения экспериментальных исследований по выявлению оптимальных составов для печати изделий из фибробетона на 3D-принтере были использованы различные соотношения компонентов смеси [15, 161.

В качестве вяжущего применялся товарный портландцемент АО «Себряковцемент» марки ЦЕМ I 42,5H и тонкомолотый кварцитопесчаник с удельной поверхностью  $700 \text{ m}^2/\text{kr}$ , гипс. В качестве мелкого заполнителя использовался песок. Для придания смеси пластичности применялись такие добавки как пластификатор ПФМ-НЛК и Murapor Kombi 756.

Основные характеристики портландцемента АО «Себряковцемент» марки ЦЕМ I 42,5H (табл. 1).

Таблица 1 Физико-механические характеристики портландцемент АО «Себряковцемент»

Наименование	Удельная	НГ,	Начало	Конец	Акт	ивность
вяжущего	поверхность, м <sup>2</sup> /кг	%	схватывания, час.	схватывания, час.	при изгибе,	при сжатии,
					МПа	МПа
ЦЕМ I 42,5H	320	25,2	2,30	3,30	7,8	49,3

Также в составы были введена базальтовая фибра длинной 12–18 мм, которая обеспечивала

необходимые физико-механические характеристики смеси (рис. 2).





Рис. 2. Базальтовая фибра

**Основная часть.** Экспериментальные исследования были связаны с изучением фибробетонной смеси при их выдавливании под давлением в 100 кгс.

В результате были проведено исследование следующих составов.

#### Состав 1.

Компонент	Расход на 1 м <sup>3</sup>
Цемент	560 кг
Кварцитопесчаник	190 кг
Песок	1250 кг
Суперпластификатор ПФМ-НЛК	16,8 кг
Вода	170 кг
Базальтовая фибра	16,8 кг

Данный состав обладал средней пластичностью, при этом под давлением в 100 кгс происходило выделение воды, а сама смесь уплотнялась

в цилиндре, что говорит о малом количестве воды.

#### Состав 2.

Компонент	Pacxoд на 1м <sup>3</sup>
Цемент	560 кг
Кварцитопесчаник	190 кг
Гипс	16,8 кг
Песок	1250 кг
Суперпластификатор ПФМ-НЛК	16,8 кг
Вода	200 кг
Базальтовая фибра	16,8 кг

При добавлении гипса в объеме 3 % от массы вяжущего и увеличении объема воды в состав №1 фибробетонная смесь стала более пластичной и наблюдается сокращение сроков схватывания.

Состав под давлением 100 кгс обладал хорошей удобоукладываемостью, но при этом слабо структурировался (высокая растекаемость).

#### Состав 3.

Компонент	Расход на 1м <sup>3</sup>
Цемент	560 кг
Кварцитопесчаник	190 кг
Murapor Kombi 756	3,92 кг
Песок	1250 кг
Вода	200 кг
Базальтовая фибра	16,8 кг

После замены суперпластификатора ПФМ-НЛК на добавку Murapor Kombi 756, состав стал более пластичным, но добиться нужной степени структурируемости не удалось. Он также растекался при укладке.

#### Состав 4.

Компонент	Расход на 1м <sup>3</sup>
Цемент	560 кг
Кварцитопесчаник	190 кг
Murapor Kombi 756	9,52 кг
Песок	1250 кг
Вода	180 кг
Базальтовая фибра	16,8 кг

Для увеличения пластичности и степени структурирования было увеличено количество добавки Murapor Kombi 756, что привело к снижению воды. В результате пластичность смеси

оказалась недостаточной, под давлением происходило выделение воды и уплотнение в цилиндре осущенной смеси.

#### Состав 5.

Компонент	Расход на 1м <sup>3</sup>
Цемент	560 кг
Кварцитопесчаник	190 кг
Murapor Kombi 756	11,2 кг
Песок	1250 кг
Вода	210 кг
Базальтовая фибра	16,8 кг

Данная смесь показала высокие результаты удобоукладываемости, обладала высокой пластичностью. Под давлением 100 кгс хорошо

структурировалась даже при укладке в несколько слоев сразу, не растекалась.

#### Состав 6.

Компонент	Расход на 1м <sup>3</sup>
Цемент	560 кг
Кварцитопесчаник	190 кг
Гипс	28 кг
Murapor Kombi 756	11,2 кг
Песок	1250 кг
Вода	225 кг
Базальтовая фибра	16,8 кг

Данный состав был создан путем добавления в состав 5 гипса в объеме 5 % от массы цемента для ускорения сроков схватывания, что играет важную роль в 3D-печати. Это позволит укладывать друг на друга несколько слоев в короткий промежуток времени. Добавление гипса повлекло за собой увеличение водопотребности

смеси, в результате чего был увеличен объем воды. Данная смесь обладала свойствами состава 5, при этом затвердевание произошло в течение 1 часа. Были определены прочностные характеристики разработанных составов 5 и 6 (табл. 2).

Таблица 2

#### Прочностные характеристики составов

	Предел прочности при сжатии,	Предел прочности на растяжение при
	МПа	изгибе, МПа
Состав 5	44,1	8,43
Состав 6	46,5	8,51

Выводы. Очевидно, что нужен нулевой осадок бетона. Тем не менее, бетон все еще должен быть достаточно жидким, чтобы выдавливаться из смесителя в сопло принтера. Исследования этого очевидного противоречия были выполнены, и хорошо работающие материалы исследованы. В работе удалось разработать состав фибробетонной смеси, который можно использовать для 3D-печати. Были определены его прочностные характеристики, позволяющие сделать вывод о том, что данный состав соответствует всем требованиям, предъявляемым для такой технологии возведения зданий и сооружений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. ASTM Standard, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, vol. 10.04.
- 2. Additive Manufacturing Study Shows Cuts in Material Consumption and Reduced CO<sub>2</sub> Emissions, Powder Metall Rev., (2013) http://www.ipmd.net/articles/002490.html.
- 3. Holmstrom J., Partanen J., Tuomi H., Walter M. Rapid Manufacturing in the Spare Parts Supply Chain: Alternative Approaches to Capacity Deployment. Journal of Manufacturing Technology Management, 2010, 21, pp. 687–697.
- 4. Bourell D.L., Beaman J.L., Leu M.C., Rosen D.W. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead, U.S. Turkey Workshop on Rapid Technologies, (2009).
- 5. Additive Manufacturing: Opportunities and Constraints, A report of Roundtable Hosted by the Royal Academy of Engineering, (2013), http://www.raeng.org.uk/publications/reports/additive-manufacturing.
- 6. Hype Cycle for Emerging Technologies, (2012) http://www.gartner.com/news-room/id/2124315.
- 7. Hopkinson N., Hague R., Dickens P., Rapid Manufacturing: an Industrial Revolution for the Digital Age, Chichester England: John Willey, (2006).

- 8. Денисова Ю.В. Аддитивные технологии в строительстве // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. №3. С. 33–42.
- 9. Гавшина О.В., Яшкина С.Ю., Яшкин А.Н., Дороганов В.А., Морева И.Ю. Исследование влияния дисперсных добавок на сроки схватывания и микроструктуру высокоглиноземистого цемента // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. №4. С. 30–37.
- 10. Кожухова Н.И., Строкова В.В., Кожухова М.И., Жерновский И.В. Структурообразование в щелочеактивированных алюмосиликатных вяжущих системах с использованием природного сырья различной кристалличности // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. №4. С. 38–43.
- 11. Елистраткин М.Ю., Минакова А.В., Джамиль А.Н., Куковицкий В.В., Эльян Исса Жамал Исса Композиционные вяжущие для отделочных составов // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. №2. С. 37–44.
- 12. Жариков И.С., Лакетич А., Лакетич Н. Влияние качества бетонных работ на прочность бетона монолитных конструкций // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. №1. С. 51–58.
- 13. Барабанщиков Ю.Г., Архарова А.А., Терновский М.В. Бетон с пониженной усадкой и ползучестью // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №7 (22). С. 152–165.
- 14. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Изд-во АСВ, 2003. 500 с.
- 15. Клюев С.В., Шорстова Е.С. Стеклофибробетон: секрет популярности на рынке производства // В сборнике: Наука и инновации в строительстве (к 45-летию кафедры строительства и городского хозяйства): сборник докладов Международной научно-практической конференции. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2017. С. 216–223.
- 16. Клюев С.В., Клюев А.В., Кузик Е.С. Аддитивные технологии в строительной индустрии // В сборнике: интеллектуальные строительные

композиты для зеленого строительства. Международная научно-практическая конференция, посвященная 70-летию заслуженного деятеля науки

РФ, члена-корреспондента РААСН, доктора технических наук, профессора Валерия Станиславовича Лесовика. 2016. С. 54–58.

Информация об авторах

**Шорстова Елена Степановна**, аспирант кафедры теоретической механики и сопротивления матеиалов. E-mail: kuzik\_alena@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Клюев Сергей Васильевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления матеиалов. E-mail: klyuyev@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Клюев Александр Васильевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления матеиалов. E-mail: klyuyev@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в декабре 2018 г.

© Шорстова Е.С., Клюев С.В., Клюев А.В., 2019

#### <sup>1</sup>Shorstova E.S., <sup>1,\*</sup>Klyuyev S.V., <sup>1</sup>Klyuev A.V.

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova 46 \*E-mail: klyuyev@yandex.ru

#### **IBER CONCRETE FOR 3D-PRINTING**

Abstract. The article deals with the possibility of using 3D-printing in the construction industry. The analysis of the work performed in this area in the world. It also presents the main advantages of this method of construction of structures and buildings in general. Experimental studies were carried out using the components of the mixture: CEM I 42.5H Sebryakovcement, fine ground quartzitic sandstone with a specific surface of 700 m²/kg using gypsum. Sand was used as fine aggregate. To make the mixture plasticity, such additives as plasticizer PFM-NLK and Murapor Kombi 756 were used. Basalt fiber was used as a reinforcing agent. Were developed compositions of the concrete mixture dispersed reinforced with basalt fiber. The work was able to develop the composition of fiber-reinforced concrete mixture, which can be used for 3D- printing. Its strength characteristics were determined, allowing to conclude that this composition meets all the requirements for this technology.

**Keywords:** additive technology, construction, 3D-printing, construction technology, structures, buildings, structural optimization.

#### REFERENCES

- 1. ASTM Standard, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, vol. 10.04.
- 2. Additive Manufacturing Study Shows Cuts in Material Consumption and Reduced CO<sub>2</sub> Emissions, Powder Metall Rev., (2013) http://www.ipmd.net/articles/002490.html.
- 3. Holmstrom J., Partanen J., Tuomi H., Walter M. Rapid Manufacturing in the Spare Parts Supply Chain: Alternative Approaches to Capacity Deployment. Journal of Manufacturing Technology Management, 2010, 21, pp. 687–697.
- 4. Bourell D.L., Beaman J.L., Leu M.C., Rosen D.W.A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead, U.S. Turkey Workshop on Rapid Technologies, (2009).

- 5. Additive Manufacturing: Opportunities and Constraints, A report of Roundtable Hosted by the Royal Academy of Engineering, (2013), http://www.raeng.org.uk/publications/reports/additive-manufacturing.
- 6. Hype Cycle for Emerging Technologies, (2012) http://www.gartner.com/news-room/id/2124315.
- 7. Hopkinson N., Hague R., Dickens P. Rapid Manufacturing: an Industrial Revolution for the Digital Age, Chichester England: John Willey, (2006).
- 8. Denisova Yu.V. Additive technologies in construction. Construction materials and products, 2018, vol. 1, no. 3, pp. 33–42.
- 9. Gavshina O.V., Yashkina S.Yu., Yashkin, A.N., Doroganov V.A., Moreva I.Yu. Study of the effect of dispersed additives on the setting time and

the microstructure of high-alumina cement. Construction materials and products, 2018, vol. 1, no. 4, pp. 30–37.

- 10. Kozhukhova N.I., Strokova V.V., Kozhukhova M.I., Zhernovskiy I.V. Structure formation in alkaline-activated aluminosilicate binding systems using natural raw materials of different crystallinity. Construction materials and products. 2018, vol. 1, no. 4, pp. 38–43.
- 11. Listedin M.Yu., Minakova V.A., Jamil A.N., Kukovitskii V.V. Alan Issa Issa Zhamal Composite binders for finishing compositions. Building materials and products, 2018, vol. 1, no. 2, pp. 37–44.
- 12. Zharikov I.S., Laketic A., Luketich N. The influence of the quality of concrete works on the strength of concrete of monolithic structures. Building materials and products, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 51–58.
- 13. Drummers Yu.G., Arkharova A.A., Ternovsky M.V. Concrete with reduced shrinkage and

- creep. Construction of unique buildings and structures, 2014, no. 7 (22), pp. 152–165.
- 14. Bazhenov Y.M. Technology of concrete. M.: publishing house of DIA, 2003, 500 pp.
- 15. Klyuyev S.V., Sherstova E.S. GRC: the secret of popularity on the market for the production of. In the book: Science and innovation in construction (the 45th anniversary of the Department of construction and urban development): a collection of papers of International scientific-practical conference. Belgorod state technological University. V. G. Shukhov, 2017, pp. 216–223.
- 16. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Kuzik E.S. Additive technologies in the construction industry. In the collection: intelligent building composites for green construction. International scientific and practical conference dedicated to the 70th anniversary of honored scientist of the Russian Federation, corresponding member of RAASN, doctor of technical Sciences, Professor Valery Stanislavovich Lesovik, 2016, pp. 54–58.

Information about the authors

**Shorstova**, **Elena S.** Postgraduate student. E-mail: kuzik\_alena@mail.ru.Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

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

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

Received in Desember 2018

#### Для цитирования:

Шорстова Е.С., Клюев С.В., Клюев А.В. Фибробетон для 3D-печати // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 22–27. DOI: 10.34031/article 5ca1f6300a4956.62644399

#### For citation:

Shorstova E.S., Klyuyev S.V., Klyuev A.V. Iber concrete for 3D-printing. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 22–27. DOI: 10.34031/article 5ca1f6300a4956.62644399

DOI: 10.34031/article\_5ca1f6304bd152.68288726

1,\*Эκόα С.И.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26 \*E-mail: ekba.s.ig@gmail.com

#### ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ, ПОПАДАЮЩИХ В ЗОНУ ВЛИЯНИЯ НОВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Аннотация. В данное работе рассмотрен вопрос комплексного обследования несущих конструкций зданий и сооружений с применением BIM-технологий (Building Information Model) и систем автоматизированного проектирования (САПР). Освещены ключевые задачи, решаемые в ходе оценки технического состояния зданий, сооружений и застройки, попадающей в зону влияния нового строительства. Предложен системный подход к оценке технического состояния зданий и сооружений. Данный подход и используемый инструментарий позволяет повысить эффективность производства работ по обследованию зданий и сооружений и снизить последующие эксплуатационные издержки. Произведен анализ и расчетное обоснование наиболее эффективных вариантов предотвращения сверхнормативных осадок зданий и сооружений в период нового строительства в городских условиях плотной застройки. Разработаны рекомендации по комплексному обследованию зданий и сооружений, в том числе попадающих в зону влияния нового строительства с применением BIM-модели и расчетной модели на основе метода конечных элементов.

**Ключевые слова:** комплексное обследование здания, ВІМ-модель, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, расчетная модель, САПР.

Введение. Стремительный рост объемов вводимого в эксплуатацию жилья в России связан как со строительством новых объектов, так и с капитальным ремонтом и реконструкцией зданий, не отвечающих действующим требованиям нормативно-технической документации. Значительная часть зданий, подвергающихся реконструкции располагается в условиях плотной городской застройки, что накладывает определенные сложности на стадии проектирования и производства строительно-монтажных работ. К числу ключевых этапов, предшествующих проектированию, ОТНОСЯТСЯ комплексное обследование несущих конструкций и грунтов основания реконструируемых зданий и застройки, попадающей в зону влияния строительства.

Основной целью комплексного обследования зданий является оценка категории технического состояния несущих и ограждающих конструкций и зданий целом. В ходе работ устанавливают дефекты и повреждения, причины их появления, степени физического и морального износа. Результатом обследования становится комплекс рекомендаций, обеспечивающих дальнейшую безопасную эксплуатацию объекта. Полученная информация является исходными данными для уточнения и расчета зоны влияния нового строительства в случаях реконструкции зданий и сооружений [1–3].

На практике обследователи часто сталкиваться с проблемой полного отсутствия исходных данных (проектная и рабочая документация, исполнительная документация, паспорта БТИ,

отчеты ранее выполненных обследований) и разрозненностью данных (отчеты о ранее выполненных обследования разработаны разными организациями), данные факторы существенно увеличивают трудоемкость и издержки на выполнение текущих обследовательских и обмерных работ. Несмотря на наличие нормативного документа, регламентирующего порядок обследования — ГОСТ 31937-2011, довольно часто приходится сталкиваться с субъективными трактовками разных специалистов о категории технического состояния строительных конструкций, классификации и причинах появления дефектов.

Таким образом, отсутствие единого подхода к проведению обследования зданий, единого формата обработки, представления и дальнейшего применения полученной в ходе обследования информации значительно осложняет пользование данными результатами, в том числе на этапах проектирования, реконструкции и последующей эксплуатации объекта. В процессе эксплуатации здания происходит масса событий: изменений в структуре здания, изменение эксплуатационных нагрузок, надстройки, пристройки, все данные разрознены и их сложно структурировать.

Методология. В настоящем исследовании продемонстрировано применение комбинации программных продуктов и методов обследования, позволяющих достичь повышения эффективности выполнения обследовательских и обмерных работ, снизить сроки на их реализацию. Предлагаемая методика успешно апробирована

более чем на 100 объектах различного назначения — жилые, общественные, объекты здравоохранения, спортивные сооружения.

Использование технологий информационного моделирования (BIM) в повседневной деятельности обследователя в совокупности с системами автоматизированного проектирования (САПР) дает значительные преимущества не только на этапе проектирования, но и на последующих этапах жизненного цикла зданий.

По сути ВІМ-модель — это база данных, которая в процессе жизненного цикла пополняется необходимой информацией. Создание такой модели происходит как раз на этапе обследования объекта, сюда же заносятся данные о дефектах и повреждениях строительных конструкций, элементов, узлов, в последствии появляется возможность отслеживания выявленных ранее дефектов, их динамики. В дальнейшей работе использовались методы визуального и инструментального контроля, получены данные также вносились в ВІМ-модель.

Получив информационную модель здания появляется возможность экспорта в расчетные программные комплексы. При проведении исследования для построения и анализа расчетной модели применялся метод конечных элементов. В приведенных примерах использованы ЛИРА-САПР PRO, ZSOIL, MIDAS GTS NX.

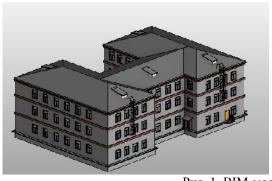
Основная часть. Применение и активное развитие ВІМ-технологий в повседневной деятельности строительных компаний уже не новинка, это тренд последних 3–5 лет. Уже сегодня действует несколько СП регламентирующих «правила игры» для пользователей ВІМ-модели, определены основные термины и определения, несомненно, будущее за ВІМ-технологиями [4–6].

Основные этапы исследования выражены в следующей последовательности действий, выполняемы в процессе обследования зданий и сооружений:

1. Изучение и анализ исходно-разрешительной, проектной, рабочей, исполнительной и иной документации.

Уже на данном этапе приходится сталкиваться с рядом сложностей – отсутствие технической документации, нечитаемостью или ветхостью документации. В большинстве случаев необходимо восстановление и разработка графической части документации, это и есть старт создания ВІМ-модели, которая дополняется необходимой информацией в процессе обследования объекта. Результатом данной работы в зависимости от целей обследования является обмерные чертежи, 3D-модель с уровнем проработки модели LOD 100 и LOD 200. В качестве ключевого программного продукта использовался Autodesk Revit. Примеры реализованных в ходе исследования объектов представлены на рис. 1.

0



a



Рис. 1. ВІМ-модель объектов обследования: a - вид 1; 6 - вид 2

2. Составление Программы работ обследования зданий, попадающих в зону влияния нового строительства/реконструкции.

Сутью данного этапа является анализ исходной геоподосновы, рекогносцировка местности, установление факта наличия на местности зданий и сооружений, попадающих в зону влияния нового строительства/реконструкции, выбор оптимальных методов проведения работ. Схемы зон влияния нового строительства представлены на рис. 2.

3. Инженерно-техническое обследование несущих конструкций, в том числе фундаментов и основания.

Один из ключевых этапов работ, именно здесь производится сбор и обработка основных параметров строительных конструкций, последующее наполнение и детализация ВІМ-модели. К числу получаемых параметров относятся: прочность бетона, каменной кладки и раствора, схемы армирования железобетонных элементов, химический состав стали, геометрические размеры,

физико-механические характеристик грунтов. Кроме этого, проводится сплошной обмер всех строительных конструкций, элементов, узлов и помещений. Здесь уровень проработки ВІМ-

модели достигает LOD 300 и LOD 400, результатом становится комплект чертежей марки AP и/или KP.

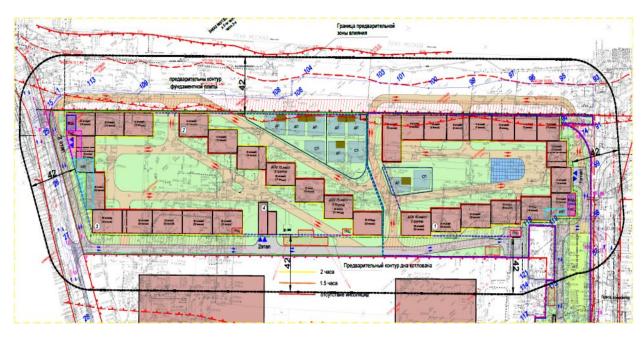


Рис. 2. План-схема с указанием предварительной зоны влияния строящегося объекта на окружающую застройку

Неотъемлемой частью данного этапа является фотофиксация факта выполнения работ, выявленных повреждений строительных конструкции и дефектов, их величины (прогиб, ширина раскрытия трещин, крен, осадка). В проводимых исследованиях на ряде объектов апробирован метод фотограмметрии с целью получения ВІМмодели. Последовательность работ включала в себя фотосъемку камерой высокого разрешения, постобработку снимков и получение облака точек, сшивка облака точек и последующая разработка ВІМ-модели. Основными достоинствами данного метода является достаточная точность

параметров обследуемых объектов в рамках конкретных задач, снижение трудоемкости работ [7–10].

Еще одним вариантом решения поставленной задачи, а именно, получение исходных данных для создания ВІМ-модели, является применение дрона для получения фотоснимков труднодоступных объектов или комплекса объектов. Последующие операции аналогичны, как и для наземной фотосъемки. Одним из недостатков данного подхода является жесткий регламент получения разрешения для полетов над г. Москвой, ограниченность разрешенных зон полета. Примеры облака точек полученного в результате съемки объекта дроном представлены на рис. 3.





Рис. 3. Облако точек, полученное на основе съемки дроном: a – вид 1;  $\delta$  – вид 2

4. Разработка расчетной модели объекта и анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) объекта.

Работы данного этапа базируются на полученных данных в ходе инженерно-технического обследования. В большинстве случаев на апробированных объектах выполнялось моделирование

объекта обследования, анализ НДС и поверочные расчеты несущих конструкций. Расчет НДС выполнен с применением программного комплекса ЛИРА-САПР PRO. Фрагмент расчётной модели показан на рис. 4.

a

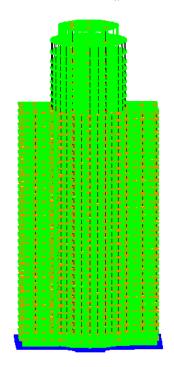




Рис. 4. Расчетная модель в программных комплексах: a –ЛИРА-САПР PRO;  $\delta$  – САПФИР

5. Моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния грунтового массива, в том числе анализ нескольких вариантов усиления грунтового массива с целью обеспечения сохранности и безопасной эксплуатации зданий и сооружений, попадающих в зону влияния строительно-монтажных работ.

Дополнительно при оценке зоны влияния нового строительства/реконструкции производилось численное моделирование как в плоской постановке, так и в трехмерной. В качестве примера на рис. 5 представлены результаты расчета НДС методом конечных элементов (МКЭ) с помощью программного комплекса MIDAS GTS NX, апробированного при строительстве большого числа строительных объектов. Грунтовая среда моделировалась на основе нелинейной упруго-пластической модели Мора-Кулона (Моhr-Coulomb).

6. Формирование технического заключения, с выводами и рекомендациями по устранению выявленных дефектов и повреждений.

Финальной точкой становится техническое заключение, концентрирующее в себе результаты все

проделанной работы. Важной частью заключения являются корректно и однозначно сформированные выводы о техническом состоянии всех несущих конструкций, в том числе фундаментов и основания, и здания в целом. Предложенная и апробированная методология проведения работ, используемый инструментарий и САПР (Autodesk Revit, ЛИРА-САПР PRO, ZSOIL, MIDAS GTS NX) дают возможность сделать это с высокой точностью.

Выводы. В результате выполненных исследований предложена методология выполнения инженерно-технического обследования несущих конструкций зданий, сооружений и застройки, попадающей в зону влияния нового строительства/реконструкции, позволяющая сократить сроки работ, повысить их точность, снизить издержки, за счет применения технологичного оборудования. Главным преимуществом является получение ВІМ-модели объекта с высоким уровнем проработки и возможность ее дальнейшего применения на всех этапах жизненного цикла здания (эксплуатация, реконструкция, снос).

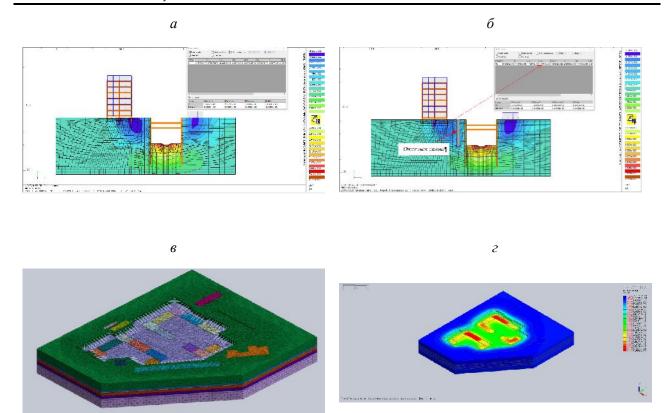


Рис. 5. Расчетная модель в программных комплексах: a,  $\delta$  – ZSOIL;  $\theta$ ,  $\varepsilon$  - MIDAS GTS NX

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Allen B. The Future of BIM is Not BIM and It's Coming Faster Than You Think. 2016. URL: evolvebim.com/single-post/2016/11/21/The-Future-of-BIM-is-Not-BIM-and-Its-Coming-Faster-Than-You-Think (дата обращения: 12.02.2019).
- 2. Бедов А.И., Знаменский В.В., Габитов А.И. Оценка технического состояния, восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. В 2-х частях. Ч.І. Обследование и оценка технического состояния оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. Под ред. А.И. Бедова: Учеб.пос. М: Изд-во АСВ, 2014. 704 с.
- 3. Малахова А.Н., Малахов Д.Ю. Оценка несущей способности строительных конструкций при обследовании технического состояния зданий: учебное пособие; М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. Исследоват. Моск. гос. Строит. ун-т. 2-е изд. Москва: НИУ МГСУ, 2016. 96 с.
- 4. Дубинин Д.А., Набок А.А., Харин В.А., Лаврентьева Л.М. Преимущества использования и развития отечественного ВІМ: системы для трехмерного проектирования Renga // Инженерный вестник Дона. 2017. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4334.

- 5. Alderton M. 3 Keys That Will Unlock the Future of BIM in Buildings, 2017. URL: autodesk.com/redshift/future-of-bim (дата обращения: 12.02.2019).
- 6. Kuchinskas S. 3 Top Trends Show Green-Building Technology on the Rise. 2018. URL: auto-desk.com/redshift/green-building-technology (дата обращения: 12.02.2019).
- 7. Усатая А. Информационные технологии строительного контроля. 2018. URL: blog.infars.ru/informacionnye-tehnologii-stroitelnogo-kontrolya (дата обращения: 12.02.2019).
- 8. Иванов М. О внедрении BIM технологий в регионах. 2018. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article\_num=20181 (дата обращения: 12.02.2019).
- 9. Mohd-Nor M.F.I., Grant M.P. Building information modelling (BIM) in the malaysian architecture industry. WSEAS Transactions on Environment and Development. 2014. 10. Pp. 264–273.
- 10.Papadonikolaki E., Vrijhoef R. and Wamelink H. The interdependences of BIM and supply chain partnering: empirical explorations // Architectural Engineering and Design Management. 2016. Vol. 12. №. 6. Pp. 476–494.

Информация об авторах

Экба Сергей Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и организации строительного производства. E-mail: ekba.s.ig@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Поступила в феврале 2019 г. © Экба С.И., 2019

#### 1, \*Ekba S.I.

<sup>1</sup>Moscow StateUniversity of Civil Engineering (National Research University) Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26 \*E-mail: ekba.s.ig@gmail.com

## COMPREHENSIVE SURVEY FEATURES OF BEARING STRUCTURES WITHIN THE AREA OF NEW CONSTRUCTION

Abstract. In this paper, the issue of comprehensive survey of bearing structures and buildings is considered using BIM-technologies (Building Information Modeling) and computer-aided design systems (CAD). The key tasks solved during the assessment of the technical condition of buildings within the area of new construction are highlighted. A systematic approach to assessing the technical condition of buildings and structures is proposed. This approach and tools used can improve the efficiency of buildings and structures survey and reduce subsequent operating costs. The analysis and design justification of the most effective options to prevent excessive precipitation of buildings and structures during the period of new construction in urban areas of dense development have been made. Recommendations on a comprehensive survey structures, including those falling into the area of new construction using the BIM model and the calculation model based on the finite element method, have been developed.

**Keywords:** comprehensive building survey, BIM model, finite element method, stress-strain state, calculation model, CAD.

#### **REFERENCES**

- 1. Allen B. The Future of BIM is Not BIM and It's Coming Faster Than You Think. 2016. URL: evolvebim.com/single-post/2016/11/21/The-Future-of-BIM-is-Not-BIM-and-Its-Coming-Faster-Than-You-Think (дата обращения: 12.02.2019).
- 2. Bedov A.I., Znamensky V.V., Gabitov A.I. Evaluation of the technical condition, restoration and strengthening of the foundations and structures of buildings in use. In 2 parts. Part I. Inspection and technical condition assessment of foundations and structures of buildings in use. Ed. A.I. Bedova: Tut. M: Publishing house DIA, 2014. 704 p.
- 3. Malakhova A.N., Malakhov D.Yu. Assessment of the bearing capacity of building structures in the inspection of the technical condition of buildings: tutorial; M-Education and Science Rus. Federation, Nat. Research. Mos. State civ un-ty. 2nd ed. Moscow: NRU MSUCI, 2016. 96 p.
- 4. Dubinin D.A., Nabok A.A., Kharin V.A., Lavrentieva L.M. Advantages of the use and development of domestic BIM: systems for three-dimensional design of Renga. Engineering Bulletin of the Don, 2017, no. 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4334.

- 5. Alderton M. 3 Keys That Will Unlock the Future of BIM in Buildings. 2017. URL: autodesk.com/redshift/future-of-bim (дата обращения: 12.02.2019).
- 6. Kuchinskas S. 3 Top Trends Show Green-Building Technology on the Rise. 2018. URL: auto-desk.com/redshift/green-building-technology (дата обращения: 12.02.2019).
- 7. Usata A. Information technology of building control. 2018. URL: blog.infars.ru/informacionnyetehnologii-stroitelnogo-kontrolya (access date: 12.02.2019).
- 8. Ivanov M. On the introduction of BIM technology in the regions. 2018. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article\_num=20181 (access date: 12.02.2019).
- 9. Mohd-Nor M.F.I., Grant M.P. Building information modelling (BIM) in the malaysian architecture industry. WSEAS Transactions on Environment and Development, 2014, 10, pp. 264–273.
- 10. Papaonikolaki E., Vrijhoef R., Wamelink H. The interdependences of BIM and supply chain partnering: empirical explorations, Architectural Engineering and Design Management, 2016, vol. 12, no. 6, pp. 476–494.

Information about the authors

**Ekba, Sergey I.** PhD, Assistant professor. E-mail: ekba.s.ig@gmail.com. Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26.

Received in February 2019

#### Для цитирования:

Экба С.И. Особенности комплексного обследования несущих конструкций зданий, попадающих в зону влияния нового строительства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 28–34. DOI:  $10.34031/article\ 5ca1f6304bd152.68288726$ 

#### For citation:

Ekba S.I. Integrated inspection peculiarities of load-bearing structural elements of buildings in new construction influence zone. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 28–34. DOI: 10.34031/article 5ca1f6304bd152.68288726

DOI: 10.34031/article\_5ca1f630af2168.19171746

#### <sup>1,</sup>\*Кононова М.С., <sup>1</sup>Жерлыкина М.Н., <sup>1</sup>Малышева А.Н.

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет Россия, 394026, Воронеж, Московский проспект, 14 \*E-mail: kniga18@mail.ru

#### КОМПЛЕКСНЫЙ КРИТЕРИЙ СРАВНЕНИЯ СИСТЕМ ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ ЗДАНИЙ

Аннотация. Системы естественного освещения вносят существенный вклад в энергетический баланс здания. Изменение их геометрических и оптических характеристик влияет не только на освещенность в помещении, но и определяет эксплуатационные расходы, связанные с обслуживанием, теплопоступлениями и теплопотерями через светопрозрачные ограждения. Рассмотрена задача сравнения нескольких систем естественного освещения зданий. Для сравнения предложен комплексный критерий, учитывающий оптические, теплозащитные, эксплуатационные свойства, а также капитальные затраты. Предложенный критерий позволяет убирать несущественные для конкретного здания показатели или добавлять новые в соответствии с требованиями заказчика. Приведены расчетные зависимости по определению численных значений отдельных коэффициентов, входящих в комплексный критерий. Для удобства сравнения все коэффициенты представлены безразмерными. Разработан алгоритм и составлена методика применения предложенного комплексного критерия для сравнения систем естественного освещения.

**Ключевые слова:** система естественного освещения, энергетический баланс здания, коэффициент естественной освещенности.

**Введение.** Естественное освещение имеет важное гигиеническое значение для жизни и деятельности человека. Результаты исследований показывают, что правильно организованное освещение влияет не только на производительность труда, но и определяет психологический комфорт человека в помещении [1, 2].

Существует много систем естественного освещения (СЕО), различающихся конструктивными, функциональными и энергетическими параметрами. Помимо традиционных окон в зданиях могут применяться системы верхнего освещения в виде световых фонарей, которые позволяют увеличить равномерность естественного освещения и уменьшить потребление энергии [3]. Хорошими теплозащитными и оптическими свойствами обладает группа отражающих устройств в виде световых полок [4], но они требуют точного соответствия расположения отражающих элементов и планировочной структуры помещения.

Отдельно следует выделить относительно новую группу систем естественного освещения в виде полых трубчатых световодов, позволяющих передавать свет на расстояние нескольких этажей [5, 6].

У каждой из перечисленных систем естественного освещения есть свои достоинства и недостатки, а также ограничения по возможности применения в зданиях различного назначения [7]. Большое различие в оптических, эксплуатационных и теплозащитных свойствах существу-

ющих систем естественного освещения обусловливает актуальность задачи выбора их оптимальной конструкции применительно к конкретному зданию [8–11].

Много исследований посвящено оценке экономической эффективности применения дневного света, но при этом чаще всего учитываются энергетические характеристики, связанные с применением систем охлаждения или искусственного освещения здания [12—18].

Некоторые авторы сравнивают различные системы естественного освещения между собой [19–21], но полученные ими результаты представляют частные случаи решения задачи выбора оптимальной конструкции СЕО.

В результате проведенного обзора научных публикаций выявлено, что отсутствует методика сравнения различных СЕО, учитывающая их разнообразные характеристики (оптические, теплозащитные, эксплуатационные).

Описание предлагаемого критерия. Авторами предлагается комплексный критерий  $\eta$  для сравнения различных систем освещения, представленный произведением:

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4, \tag{1}$$

где  $\eta_1$  — показатель оптических характеристик;  $\eta_2$  — показатель теплозащитных характеристик;  $\eta_3$  — показатель эксплуатационных характеристик;  $\eta_4$  — показатель капитальных затрат.

Структура комплексного критерия представлена на рис. 1.

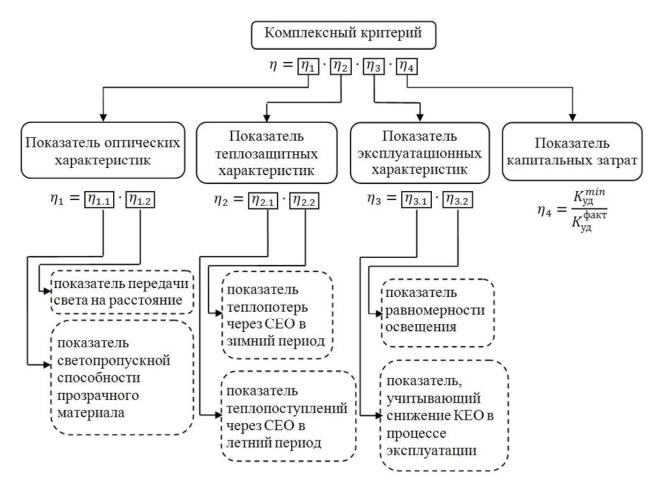


Рис. 1. Структура комплексного критерия для сравнения систем естественного освещения

Одной из основных характеристик является способность CEO передавать дневной свет в помещение. Эта способность зависит от материала, расположения и конструктивных особенностей CEO.

Показатель светопередающих характеристик  $\eta_1$ , предлагается определять по формуле:

$$\eta_I = \eta_{IJ} \quad \eta_{IJ}, \tag{2}$$

где  $\eta_{1.1}$  – показатель светопропускной способности прозрачного материала;  $\eta_{1.2}$  – показатель передачи света на расстояние.

Показатель светопропускной способности прозрачного материала  $\eta_{1.1}$  зависит от типа стекол, их толщины, количества, характера поверхности (шероховатость, рубчатость, загрязненность). Значения показателя  $\eta_{1.1}$  можно определить по справочной или нормативной литературе, где он носит название коэффициент светопропускания.

Показатель передачи света на расстояние  $\eta_{1.2}$  предлагается оценивать по формуле:

$$\eta_2 = E_{\text{int}} / E_{\text{ext}} \tag{3}$$

где  $E_{\text{int}}$  – естественная освещённость внутри помещения на выходе из светопередающего устройства, лк;  $E_{\text{ext}}$  – естественная освещённость снаружи перед центром светопередающего ограждения, лк.

Показатель передачи света на расстояние является аналогом коэффициента естественной освещенности, отличаясь от него местами расположения точек, в которых определяется освещенность. Так как конструкции СЕО достаточно разнообразны, то предлагается определить стационарные места расположения точек замера в соответствии со схемами, приведенными на рис. 2. Численные значения освещенности  $E_{int}$  и  $E_{ext}$  могут быть определены путём моделирования или экспериментальной оценки систем естественного освещения [8].

Показатель теплозащитных характеристик  $\eta_2$  предлагается рассчитывать по формуле:

$$\eta_2 = \eta_{2.1} \quad \eta_{2.2},$$
(4)

где  $\eta_{2.1}$  — показатель теплопоступлений через СЕО в летний период;  $\eta_{2.2}$  — показатель теплопотерь через СЕО в зимний период.

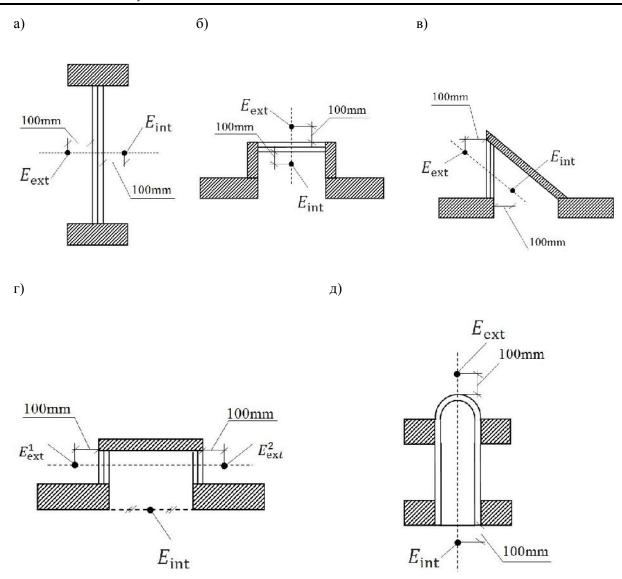


Рис. 2. Схемы расположения точек замера  $E_{\rm nt}$  и  $E_{\rm ext}$ : а – для окна; б – для зенитного фонаря; в – для шедового фонаря; г – для фонаря-надстройки ( $E_{\rm ext}$  вычисляется как среднее арифметическое  $E^I_{\rm ext}$  и  $E^2_{\rm ext}$ ); д – для полого трубчатого световода

Учитывая разнообразие существующих СЕО, обладающих различными характеристиками и размерами, для определения коэффициентов  $\eta_{2.1}$  и  $\eta_{2.2}$  предлагается использовать алгоритм, приведенный на рис. 3. Для каждой из сравниваемых СЕО рассчитываются теплопоступления в теплый период года  $q_{\text{ТПГ}}$ і,  $\text{Вт/м}^2$ , и теплопотери в холодный период года  $q_{X\Pi\Gamma i}$ ,  $B_T/M^2$ . На данном этапе расчетов предполагается использование существующих методик расчета, учитывающих конструктивные особенности светопрозрачных ограждений и климатологические характеристики местности, для которой проводится расчет [20-23].

Из вычисленных значений  $q_{\text{ТПГ,i}}$  (рис. 3, а) и  $q_{\text{ХПГ,i}}$  (рис. 3, б) выбираются минимальные значения, используемые для получения безразмерных коэффициентов  $\eta_{2.1}$  и  $\eta_{2.2}$ .

Коэффициент  $\eta_{2.1}$ , учитывающий количество теплопоступлений от солнечной радиации, находится по формуле:

$$\eta_{2.1} = q_{\text{TIII}i}^{\text{min}} / q_{\text{TIII}i}, \tag{5}$$

где  $q_{\text{ТПГ}i}$ , — удельное значение теплоты, поступающей через рассматриваемую СЕО от солнечной радиации,  $\text{Вт/м}^2$ ;  $q_{\text{ТПГ}i}^{\text{min}}$  — минимальное из сравниваемых вариантов удельное значение теплоты, поступающей через СЕО от солнечной радиации,  $\text{Вт/м}^2$ .

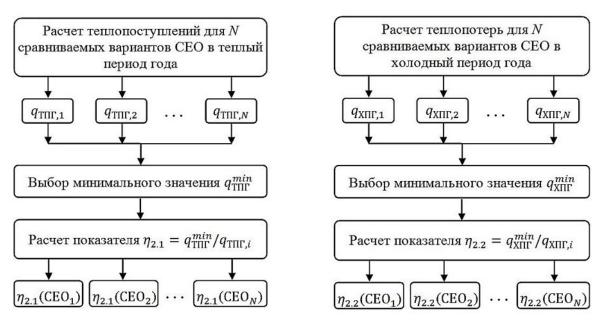


Рис. 3. Алгоритм определения коэффициента, учитывающего теплопоступления через СЕО  $\eta_{2.1}$  (a) и коэффициента, учитывающего теплопотери через СЕО  $\eta_{2.2}$  (б)

Соответственно, коэффициент  $\eta_{2.2}$ , учитывающий потери теплоты через ограждающие конструкции, найдем по формуле:

$$\eta_{2,2} = q_{XIII,i}^{\min} / q_{XIII,i}$$
 (6)

где  $q_{\rm XПГ}$ , — удельное значение потерь теплоты через ограждающие конструкции рассматриваемой СЕО,  ${\rm BT/m^2}$ ;  $q_{\rm XПГ}^{\rm min}$  — минимальное из сравниваемых вариантов удельное значение потерь теплоты через ограждающие конструкции,  ${\rm BT/m^2}$ .

Основной функцией сравниваемых СЕО является их способность создать достаточный уровень освещенности. В рассматриваемой комплексном критерии эту функцию предлагается учитывать с помощью показателя эксплуатационных характеристик  $\eta_3$ , определяемого по формуле:

$$\eta_3 = \eta_{3.1} \cdot \eta_{3.2} \,, \tag{7}$$

где  $\eta_{3.1}$  – показатель, учитывающий снижение коэффициента естественной освещенности (КЕО) в процессе эксплуатации;  $\eta_{3.2}$  – показатель равномерности освещения.

Показатель  $\eta_{3.1}$ , учитывающий снижение KEO в процессе эксплуатации, найдем из зависимости:

$$\eta_{3,1} = 1/K_3 \,, \tag{8}$$

где  $K_3$  – коэффициент запаса, учитывающий снижение освещенности в из-за загрязнения и старения светопрозрачных заполнений в световых

проемах, а также снижение отражающих свойств поверхностей помещения; принимается по СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение».

Показатель равномерности освещения  $\eta_{3.2}$  предлагается вычислять по формуле:

$$\eta_2 = E_{\text{min}} / E_{\text{max}} \tag{9}$$

где  $E_{\min}$  — наименьшая освещенность на рабочей плоскости помещения, лк;  $E_{\max}$  — наибольшая освещенность на рабочей плоскости помещения, лк.

Важным фактором при выборе СЕО являются затраты на их устройство Для определения показателя капитальных затрат  $\eta_4$  предлагается использовать алгоритм, аналогичный приведенному на рис. 3.

Вначале для сравниваемых систем естественного освещения рассчитываются удельные затраты на единицу коэффициента естественной освещенности  $K_{y\partial}$ , руб./ед. по формуле:

$$K_{yo} = K_i / e_{pi}, \tag{10}$$

где  $K_i$  – капитальные затраты на устройство системы естественного освещения, руб.;  $e_{pi}$  – расчетное значение коэффициента естественной освещенности/

Из вычисленных значений  $K_{y\partial}$  выбирается минимальное значение  $K_{yд}^{\min}$ , с использованием которого вычисляется показатель капитальных затрат  $\eta_4$  по формуле:

$$\eta_4 = K_{y\partial}^{\min} / K_{y\partial,i} , \qquad (11)$$

где  $K_{y\partial,i}$  — удельные затраты на устройство рассматриваемой СЕО, руб./ед.;  $K_{y\partial}^{\min}$  — минимальные из сравниваемых удельные затраты на повышение естественной освещенности помещения, руб./ед.

Следует отметить, что все показатели, входящие в состав комплексного критерия (формула (1)) являются безразмерными, их значение не превышает единицу. Такая структура критерия позволяет убирать несущественные для конкретного здания показатели или добавлять новые, в соответствии с требованиями заказчика.

Алгоритм применения комплексного критерия сравнения. Предлагаемый комплексный критерий может быть использован при выборе систем естественного освещения как при новом проектировании, так и при реконструкции с целью увеличения освещенности помещения. Практическое применение комплексного критерия может быть реализовано на основе алгоритма, приведенного на рис. 4.

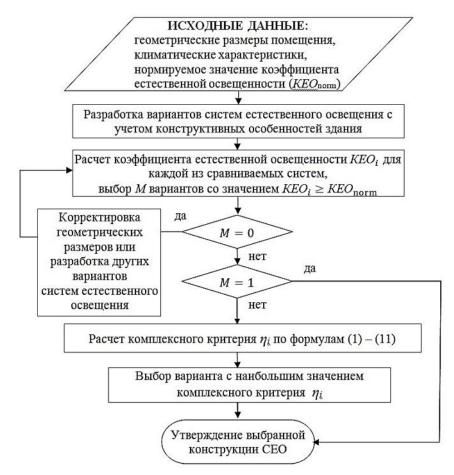


Рис. 4. Алгоритм выбора системы естественного освещения на основе комплексного критерия

На начальном этапе должны быть сформированы исходные данные, необходимые для разработки конструктивных решений систем естественного освещения: геометрические размеры и назначение помещения, географические координаты района строительства.

При формировании сравниваемых вариантов важным условием является возможность интегрирования СЕО в объемно-планировочную структуру здания, а также должны учитываться конструктивные особенности наружных ограждений. В результате формирования возможных вариантов СЕО должны быть определены их геометрические и конструктивные характеристики и подобраны материалы.

Далее производится расчет коэффициента естественной освещенности для сравниваемых вариантов соответствии с утвержденными методиками свода правил СП 52.13330.2011 или другими авторскими методиками [5, 21]. Для дальнейшего сравнения выбираются такие конструкции систем естественного освещения, которые обеспечивают естественную освещенность не менее нормируемого значения. В случае, если таких вариантов не оказалось, то нужно скорректировать размеры разработанных СЕО или рассмотреть другие варианты.

Далее проводятся вычисления комплексного показателя по формулам (1)–(11) и на основе

сравнения полученных значений выбирается конструкция системы естественного освещения.

Выводы. Предложенный комплексный критерий позволяет учитывать при сравнении разные характеристики систем естественного освещения. Безразмерная форма критерия позволяет добавлять или убирать некоторые из показателей. Например, вместо показателя, учитывающего капитальные затраты, можно ввести показатель, учитывающий приведенные затраты. Это целесообразно в случае, когда предполагается значительная разница в затратах на эксплуатационное обслуживание сравниваемых вариантов систем естественного освещения.

Достоинством предлагаемого комплексного критерия является возможность использования при вычислении входящих в него показателей различных методик расчетов, учитывающих конструктивные особенности светопередающих устройств. Возможно также использование результатов расчетов отдельных характеристик, полученных другими авторами, что позволит сократить трудоёмкость вычисления критерия сравнения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Ковальковская Н.О. Энергетическое и санитарно-гигиеническое значение естественного освещения рабочей зоны // Техносферная безопасность: материалы второй межвузовской научно-технической конференции с международным участием (Омск, 28 апреля 2015 г.), Омск: Изд-во ОГТУ, 2015. С. 90–92.
- 2. Gou Z., Lau S., Qian F. Comparison of mood and task performance in naturally-lit and artificially-lit environments // Indoor and built environment. 2015. Vol. 24. Issue 1. Pp. 27–36.
- 3. Djenadic D. M., Manic M. T., Riznic D.T. The impact of clerestory lights on energy efficiency of buildings // Thermal science. 2015. Vol. 19. Issue 3. Pp. 893–904.
- 4. Kontadakis A., Tsangrassoulis A., Doulos L. An active sunlight redirection system for daylight enhancement beyond the perimeter zone // Uilding and environment. 2017. Vol. 113. Pp. 267–279.
- 5. Стецкий С.В. Световые колодцы как фактор повышения качества световой среды в многоэтажных зданиях // Научное обозрение. 2016. № 15. С. 59–64.
- 6. Овчаров А.Т., Селянин Ю.Н. Технология Solatube: перспективы в архитектуре и строительстве в России // Светотехника. 2016. №1. С. 36–41.
- 7. Малышева А.Н., Кононова М.С., Воробьева Ю.А. Анализ применимости различных систем естественного освещения для зданий гражданского назначения // Жилищное хозяйство и

- коммунальная инфраструктура. 2018. № 2(5). С. 9–17.
- 8. Spacek A.D., Neto J.M., Bilessimo L.D. Proposal for an Experimental Methodology for Evaluation of Natural Lighting Systems Applied in Buildings // Energies. 2017. Vol. 10. Issue 7. Article number 1014.
- 9. Zambrano P., Prado L. Simulation of Natural lighting in offices: comparison of light levels according to season, orientation, color and time: Implications for visual efficiency // Estoa-revista de la facultad de arquitectura y urbanismo de la universidad de cuenca. 2016. Vol. 5. Issue 8. Pp. 37–50.
- 10. Ёрс П.Ф., Казанасмаз Т. Расчётное сравнение современных систем естественного освещения в целях улучшения уровня и равномерности освещённости // Светотехника. 2015. № 1. С. 28–35.
- 11. Lewis A. The mathematisation of daylighting: a history of British architects' use of the daylight factor // Journal of architecture. 2017. Vol. 22. Issue 7. Pp. 1155–1177.
- 12. Krarti M., Erickson P.M., Hillman T.C. A simplified method to estimate energy savings of artificial lighting use from daylighting // Building and environment. 2005. Vol. 40. Issue 6. Pp. 747–754.
- 13. Lam J.C., Li D. An analysis of daylighting and solar heat for cooling-dominated office buildings // Solar energy. 1999. Vol. 65. Issue 4. Pp. 251–262.
- 14. Shishegar N., Boubekri M. Quantifying electrical energy savings in offices through installing daylight responsive control systems in hot climates // Energy and buildings. 2017. Vol.153. Pp. 87–98.
- 15. Коржнева Т.Г., Ушаков В.Я., Овчаров А.Т. Учет ресурса естественного света при оптимизации энергозатрат помещения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 3. С. 156–164.
- 16. Nemri A., Krarti M. Analysis of electrical energy savings from daylighting through skylights // International Solar Energy Conference: collection of reports(Orlando 2017, Aug 08-09). 2006. Pp. 51–57.
- 17. Al-Ashwal N.T., Hassan A.S. The Integration of Daylighting with Artificial Lighting to Enhance Building Energy Performance // Proceedings of the international conference of global network for innovative technology and awam international conference in civil engineering (IGNITE-AICCE'17): Sustainable technology and practice for infrastructure and community resilience: AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1892. Article number UNSP 160010-1.
- 18. Демина А.В., Редина Е.В. Сравнительный анализ естественного и искусственного освещения в жилом секторе // Экология, окружающая среда и здоровье человека: XXI век: сборник статей по материалам II международной научно-

практической конференции. (Красноярск, 12-15 ноября 2016 г.), Красноярск: Изд-во КГАУ, 2016. С. 261–265.

- 19. Соловьев А.К., Туснина О.А. Сравнительный теплотехнический расчет систем верхнего естественного освещения (зенитные фонари и полые трубчатые световоды) // Инженерностроительный журнал. 2014. № 2(46). С. 24–35.
- 20. Коржнева Т.Г., Ушаков В.Я., Овчаров А.Т. Анализ теплопотерь помещений через системы естественного освещения // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 322. № 4. С. 56–60.
- 21. Палагин А.В. Стерхов А.И., Корепанов Е.В. Сравнение систем естественного освещения

зданий по функционально-энергетическим факторам // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 2 (24). С. 191–194.

- 22. Кононова М.С., Сороченкова Е.Ю., Смирнова Н.Н. Оценка потенциальной экономии энергоресурсов на отопление зданий за счет теплопоступлений от солнечной радиации // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2016. № 1(22). С. 35–41.
- 23. Park J.J., Kim Y., Chung K. Infiltration and Heating Load Analysis of an Apartment with Respect to Window Type, Window Location, and Lock Operation // Ashrae transactions. 2017. Vol. 123. Pp. 201–214.

#### Информация об авторах

**Кононова Марина Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры жилищно-коммунального хозяйства. E-mail: kniga18@mail.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394026, Воронеж, Московский проспект, д. 14.

**Жерлыкина Мария Николаевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры жилищно-коммунального хозяйства. E-mail: zherlykina@yandex.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394026, Воронеж, Московский проспект, д. 14.

**Малышева Анастасия Николаевна**, магистрант кафедры жилищно-коммунального хозяйства. E-mail: malysheva-a2013@yandex.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394026, Воронеж, Московский проспект, д. 14.

Поступила в ноябре 2018 г.

© Кононова М.С., Жерлыкина М.Н., Малышева А.Н., 2019

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University Russian, 394026, Voronezh, Moscow Avenue, 14 \*E-mail: kniga18@mail.ru

<sup>1,\*</sup>Kononova M.S., <sup>1</sup>Zherlykina M.N., <sup>1</sup>Malysheva A.N.

# A COMPREHENSIVE COMPARISON CRITERION OF NATURAL LIGHTING SYSTEMS FOR BUILDINGS

Abstract. Natural lighting systems make a significant contribution to the energy balance of the building. Changing its geometric and optical characteristics affects the illumination in the room and determines the operating costs associated with maintenance, heat and heat losses through translucent fences. The problem of comparison several systems of natural lighting of buildings is considered. For comparison, a complex criterion is proposed that takes into account optical, thermal, operational properties, as well as capital costs. The proposed criterion allows to remove irrelevant indicators for a particular building or add new ones according to customer requirements. The calculated dependences to determine the numerical values of the individual coefficients included in the complex criterion are given. The calculated dependences to determine the numerical values of the individual coefficients included in the complex criterion are presented. The algorithm and the method of application the proposed complex criterion for comparison of natural light systems are developed. Keywords: natural lighting system, energy balance of the building, natural light factor.

#### REFERENCES

1. Kowalkowska N.O. Energy and sanitary-hygienic significance of natural lighting of working area. Technosphere safety: proceedings of the second inter-University scientific and technical conference with international participation (Omsk, April 28,

- 2015), Omsk: publishing house of the OSTU, 2015. pp. 90–92.
- 2. Gou Z., Lau S., Qian F. Comparison of mood and task performance in naturally-lit and artificially-lit environments. Indoor and built environment, 2015, vol. 24, issue 1, pp. 27–36.
  - 3. Djenadic D.M., Manic M.T., Riznic D.T. The

- impact of clerestory lights on energy efficiency of buildings. Thermal science, 2015, vol. 19, Issue 3, pp. 893–904.
- 4. Kontadakis A., Tsangrassoulis A., Doulos L. An active sunlight redirection system for daylight enhancement beyond the perimeter zone. Uilding and environment, 2017, vol.113, pp. 267–279.
- 5. Stetsky S.V. Light tubes as a factor of light environment quality increase in high-rise buildings. Scientific review, 2016, no. 15, pp. 59–64.
- 6. Ovcharov A.T., Selyanin Yu.N. Solatube technology: perspectives in architecture and construction in Russia. Lighting engineering, 2016, no. 1, pp. 36–41.
- 7. Malysheva A.N., Kononova M.S., Vorob'eva Y.A. Analysis of applicability of various natural lighting systems for civil design buildings. Housing and utilities infrastructure, 2018, no. 2(5), pp. 9–17.
- 8. Spacek A.D., Neto J.M., Bilessimo L.D. Proposal for an Experimental Methodology for Evaluation of Natural Lighting Systems Applied in Buildings . Energies, 2017, vol. 10, issue 7, article number 1014.
- 9. Zambrano P., Prado L. Simulation of Natural lighting in offices: comparison of light levels according to season, orientation, color and time: Implications for visual efficiency. Estoa-revista de la facultad de arquitectura y urbanismo de la universidad de Cuenca, 2016, vol. 5, issue 8, pp. 37–50.
- 10. Ers P.F. Kazanasmaz T. Calculated comparison of modern systems of natural lighting in order to improve the level and uniformity of illumination. Lighting engineering, 2015, no.1, pp. 28–35.
- 11. Lewis A. The mathematisation of daylighting: a history of British architects' use of the daylight factor. Journal of architecture, 2017, vol.22, issue7, pp. 1155–1177.
- 12. Krarti M., Erickson P.M., Hillman T.C. A simplified method to estimate energy savings of artificial lighting use from daylighting. Building and environment, 2005, vol. 40, issue 6, pp. 747–754.
- 13. Lam J.C., Li D. An analysis of daylighting and solar heat for cooling-dominated office buildings. Solar energy, 1999, vol. 65, issue 4. pp. 251–262
- 14. Shishegar N., Boubekri M. Quantifying electrical energy savings in offices through installing daylight responsive control systems in hot climates. Energy and buildings, 2017, vol. 153, pp. 87–98.

- 15. Korzhneva T.G., Ushakov V.Y., Ovcharov A.T. Aylight resourses accounting of energy cost optimization. Bulletin of Tomsk state University of architecture and construction, 2013, no. 3, pp. 156–164.
- 16. Nemri A., Krarti M. Analysis of electrical energy savings from daylighting through skylights. International Solar Energy Conference: collection of reports. (Orlando 2017, Aug 08-09), 2006, pp. 51–57
- 17. Al-Ashwal N. T., Hassan A. S. The Integration of Daylighting with Artificial Lighting to Enhance Building Energy Performance. Proceedings of the international conference of global network for innovative technology and awam international conference in civil engineering (IGNITE-AICCE'17): Sustainable technology and practice for infrastructure and community resilience, 2017, vol. 1892, article number UNSP 160010-1.
- 18. Demina A.V., Redina E.V. Comparative analysis of lighting in residential sector. Ecology, environment and human health: XXI век century. Collection of articles on the materials of the II international scientific-practical conference. (Krasnoyarsk 12-15 November 2016), Krasnoyarsk: publishing house of KSAU, 2016, pp. 261–265.
- 19. Soloviev A.K., Tusnina O.A. Comparative thermotechnical calculation of systems of upper natural illumination (zenith lanterns and hollow tubular light guides). Magazine of Civil Engineering, 2014, no. 2(46), pp. 24–35.
- 20. Korzhneva T.G., Ushakov V.YA., Ovcharov A.T. Analysis of heat loss of premises through natural lighting systems. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2013, vol. 322, no. 4. pp. 56–60.
- 21. Palagin A.V., Sterkhov A.I., Korepanov E.V. Comparison of the systems of natural lighting of buildings by functional-energy factors. Intellectual systems in production, 2014, no. 2 (24), pp. 191–194.
- 22. Kononova M.S., Sorochenkova E.Yu., Smirnova N.N. Estimation of potential energy savings for heating of buildings due to heat input from solar radiation. Science Magazine. Engineering systems and facilities, 2016, no. 1(22), pp. 35–41.
- 23. Park J.J., Kim Y., Chung K. Infiltration and Heating Load Analysis of an Apartment with Respect to Window Type, Window Location, and Lock Operation. Ashrae transactions, 2017, vol. 123, pp. 201–214.

Information about the authors

**Kononova, Marina S.** PhD, Assistant professor. E-mail: kniga18@mail.ru. Voronezh State Technical University. Russian, 394026, Voronezh, Moscow Avenue, 14.

**Zherlykina**, **Mariya N.** PhD, Assistant professor. E-mail: zherlykina@yandex.ru. Voronezh State Technical University, Russian, 394026, Voronezh, Moscow Avenue, 14.

**Malysheva, Anastasiya N.** Master. E-mail: malysheva-a2013@yandex.ru. Voronezh State Technical University, Russian, 394026, Voronezh, Moscow Avenue, 14.

Received in November 2018

## Для цитирования:

Кононова М.С., Жерлыкина М.Н., Малышева А.Н. Комплексный критерий сравнения систем естественного освещения зданий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 35–43. DOI: 10.34031/article 5ca1f630af2168.19171746

#### For citation:

Kononova M.S., Zherlykina M.N., Malysheva A.N. A comprehensive comparison criterion of natural lighting systems for buildings. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 35–43. DOI: 10.34031/article 5ca1f630af2168.19171746

# DOI: 10.34031/article\_5ca1f631244a52.27503491

# <sup>1</sup>Оберемок М.И., <sup>1,\*</sup>Наумов А.Е., <sup>1</sup>Щенятская М.А.

<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46
\*E-mail: naumov.ae@bstu.ru

# КВАЛИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВИДОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИЛОЙ НЕДВИЖИМОСТИ

Аннотация. Одним из сегментов жилой недвижимости города являются квартиры, характеризующиеся особым видом из окна. Квартиры с уникальными видовыми характеристиками, как правило, пользуются повышенным спросом у населения, отчего стоимость таких объектов превышает среднерыночную. С учетом высокой ликвидности видовой недвижимости в процессе разработки проектов девелоперы стараются наилучшим образом использовать визуальные перспективы строящегося жилого комплекса. Данная статья представляет собой квалиметрический анализ удельных стоимостей видовых характеристик квартир в г. Белгороде по основным базовым спросообразующим факторам. Производится классификация характеристик видов из окна жилой недвижимости на основании градостроительных, эстетических, эмоциональных и прочих функций. Формируются выводы о стоимости видовых параметров жилой недвижимости с учетом критериев их привлекательности. Получена функциональная зависимость, позволяющая определить надбавку к стоимости жилой недвижимости на основании различий вида из окна. Практическая значимость определения специфики ценообразования в сегменте видовых квартир состоит в возможности управления спросом и повышении эффективности девелопмента жилой недвижимости.

**Ключевые слова:** квалиметрический анализ, рыночная стоимость, оценка недвижимости, жилая недвижимость, факторы спроса.

Введение. Видовые характеристики зданий выступают необходимым условием создания компактного и вертикального города. Исследование ценообразования видовых квартир может способствовать лучшему пониманию важного теоретического вопроса о том, сколько семья готова потратить на различные атрибуты местоположения квартиры [9].

Взаимосвязь между стоимостью жилой недвижимости и ее расположением достаточно многогранна. Согласно зарубежным исследованиям, время в пути от квартиры до центрального делового района отрицательно коррелирует с ценой на жилье. Покупатели также готовы платить больше за квартиры с видом на природные пейзажи и чистый воздух. Тем не менее, расположение в зеленой зоне не является существенной переменной по цене на жилье [6]. Увеличение расстояния между квартирой и предпочтительным природным ландшафтом приводит к снижению цены сделки. Негативное восприятие на оживленную улицу вызывает снижение цены на 3,7 % [7].

Разнообразные виды из окон зданий оказывают влияние на эмоциональное состояние их обитателей. Обстановка также переживается человеком издалека, а не только при нахождении в непосредственном окружении [10]. Результаты опросов жителей малоэтажных жилых домов [8] свидетельствует о том, что возможность визуального обзора многообразия природных элементов

из окна здания в значительной степени способствует удовлетворенности жителей своим соседством и переживанию чувства благополучия. При виде одного элемента, напротив, фиксировалось удовлетворение, но не благополучие. Вид на небо и изменение погодных условий не оказали существенного влияния на самочувствие испытуемых. Таким образом, чтобы привнести значительный вклад в удовлетворение и благополучие жителей, потенциальные элементы природы должны обладать определёнными характеристиками.

Количественная оценка ценности природы и природных богатств в городах могла бы стать основой политики и стратегий городского планирования, развития, охраны природы и оценки собственности.

Практическая значимость определения специфики ценообразования в сегменте видовых квартир состоит в возможности управления спросом и повышении эффективности девелопмента жилой недвижимости. При наличии информации о вероятной стоимости элитных квартир с видом застройщик будет осведомлен о наиболее выгодном местоположении новостроек в пределах города и получит возможность инвестирования средств с наибольшей выгодой [3].

**Основная часть.** В данной работе производится вычисление удельных стоимостей видовых характеристик жилой недвижимости, а также определяется процентная надбавка для видовых

квартир на основании различий видов из окна на примере г. Белгорода.

На рис. 1 представлена карта наиболее привлекательных мест г. Белгорода, включая архитектурные достопримечательности, парки и сады, места отдыха населения [12]. В основном,

линией сосредоточения аттракторов является вертикальная магистраль города – пр-т Б. Хмельницкого – пр-т Ватутина, соединяющая городские центры дуоцентричного Белгорода с развивающимся торгово-деловым районом Харьковской горы.

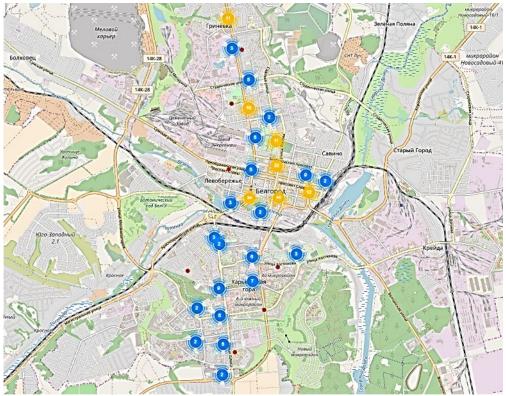


Рис. 1. Месторасположение достопримечательностей г. Белгорода [13]

В Белгороде особой популярностью видовых квартир премиум-класса пользуются апартаменты с видом на Соборную площадь, парк Победы, Свято-Троицкий бульвар, парк им. В.И. Ленина. Стоимость жилой недвижимости в новостройках в пределах этих районов начинается от 70000 руб./кв. м. В районе Харьковской горы г. Белгорода возводится достаточное количество

новостроек, с последних этажей которых открываются захватывающие виды на панораму города, телевышку, мемориалы и локальные парки, но все же именно городской центр остается наиболее приоритетным месторасположением для видовых домов [5, 6].

Согласно оценочной практике наличие видовых характеристик в среднем добавляет около 8 % к стоимости рядовых квартир (рис. 2) [11].

Наименование коэффициента	Среднее значение	Доверительнь интервал	
3. Массовое современное жилье, 4. Ж комфортности	илье повыше	нной	
Отношение удельной цены квартиры с хорошими видовыми характеристиками к удельной цене такой же квартиры без видовых характеристик	1,08	1,06	1,10

Однако, приведенные выше данные, полученные экспертным путем, являются чрезмерно обобщенными и не позволяют увидеть различия в стоимости между видовыми квартирами для рынка недвижимости конкретного города, обла-

дающего индивидуальной визуальной спецификой, видовыми лимитами и существенным потенциалом управления стоимостью недвижимости, рационально этими ограничениями оперирующей [1, 6].

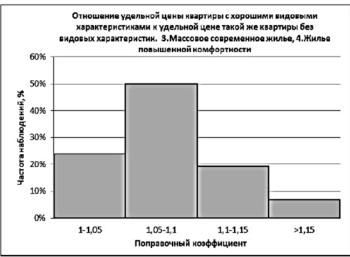


Рис. 2. Значения корректирующих коэффициентов, усреднённые по городам России и границы доверительных интервалов [11]

С целью дальнейшего анализа был проведен опрос мнений риэлтерских агентств г. Белгорода о влиянии привлекательного вида из окна на стоимость квартиры [17]. Результаты оказались неоднозначными. Одни данные свидетельствовали об абсолютном отсутствии влияния, другие — о субъективном воздействии на желание покупателя приобрести квартиру. Отдельные агентства утверждали о функциональной зависимости видовых характеристик и стоимости объекта недвижимости. Также были получены данные о варьировании стоимостью видовых квартир непосредственно застройщиками, при этом в отношении собственников четкая тенденция отсутствовала.

Таким образом, чтобы нивелировать погрешности справочников и субъективность участников рынка недвижимости авторами было решено провести исследование с использованием фактических данных о стоимости квартир в населенном пункте.

Для анализа были отобраны новостройки Белгорода, из окон которых открываются примечательные виды на город. Выборку составляли квартиры, где отличительным ценообразующим фактором является вид из окна при том, что остальные характеристики остаются сходными: выбранные квартиры являются трехкомнатными, представлены к продаже под самоотделку, расположены на средних и верхних этажах в новостройках монолитного типа, сданы в эксплуатацию и находятся в кварталах с высоким уровнем развития социально-бытовой инфраструктуры. Выбор трехкомнатных квартир в качестве аналитических данных обусловлен принадлежностью таких объектов к сегменту жилой недвижимости элитного класса, который чаще всего представлен с привлекательными видовыми характеристиками.

В табл. 1 собраны данные о жилищных комплексах г. Белгорода, отвечающие указанным выше критериям, с указанием специфических видовых характеристик, а также абсолютных и удельных стоимостей квартир. Источниками информации послужили сведения о стоимости квартир, представленные на официальных сайтах застройщиков и информационных порталов о недвижимости города [13, 14, 15, 16]. В таблице произведено сравнение видовых и типовых квартир для каждого жилищного комплекса, где в результате рассчитывалась стоимость различных видовых характеристик, включая долю стоимости вида в общей стоимости объекта.

Очевидно, что видовые характеристики квартиры в целом, как ценообразующий фактор, весьма волатильны и для эффективного управления нуждаются в структурированном представлении, сводящемся к разложению видов на базовые составляющие, которые относятся к градостроительной, эстетической, эмоциональной и прочим функциям вида как спросообразующей характеристики жилой недвижимости [2, 3].

Таким образом, был произведен рейтинг представленных видов от 10 до 100 баллов по пяти основным базовым видоформирующим составляющим (по каждой оценка от 1 до 5), таким как:

- 1) масштаб разворачивающегося вида (от 1 одиночный объект до 5 панорама);
- 2) современность/технологичность наблюдаемого для горожанина (от 1 рядовое природное явление до 5 высокотехнологичный/уникальный рукотворный объект);
- 3) видовое разнообразие (от 1 визуализация в редкие часы суток/сезонный вид до 5 объект, обладающий серией эффектных визуализаций для времен года и суток);

4) эмоционально-цветовая характеристика (от 1 — монотонный темный/холодный цвет до 5 — вариативный теплый цвет).

Количество баллов согласно перечисленным критериям определялось экспертным методом. Удельные веса для каждого показателя рассчиты-

вались посредством применения системы весовых коэффициентов Фишберна в первом приближении, уточняемых в дальнейшем методологией линейного программирования. Квалиметрический анализ рейтинга привлекательности видов отображен в табл. 2.

Tаблица l Сегментация новостроек г. Белгорода на основании видовых характеристик

$N_{\overline{0}}$	Наименование ЖК	Месторасположе- ние	Вид из окна	Площадь, кв.м	Стоимость квартир с видом, руб.	Стоимость 1 кв.м квартир с видом, руб./кв.м	Площадь, кв.м	Стоимость типовых квартир, руб.	Стоимость 1 кв.м типовых квартир, руб./кв.м	Стоимость вида, руб.	Стоимо-сть вида- руб./кв.м	Доля стоимости вида %
1	Импе- риал	Свято- Тро- ицкий бул., 32	Покровская церковь, Успенско- Никольский собор, Марфо-Мариинский монастырь, сквер на Свято- Троицком бульваре, памятник Святителю Иосафу, БелГУ	103	7970655	77385	103	7078500	68723	892155	8662	11,2
2	Госте- нский	ул Госте- нская, 16	Покровская цер- ковь, сквер на Свято-Троицком бульваре, памят- ник Святителю Иосафу, БелГУ	82	5200000	63415	83	4900000	59036	300000	4378	6,9
3	Уют- ный	ул. Ча- пае-ва, 14а	р. Везелка, БелГУ	94	4880000	51915	94	4687500	49867	192500	2048	3,9
4	Шала- ндина 5а	ул. Шала- ндина, 5а	Телевышка, парк Южный, ДС Кос- мос	89	5400000	60674	89	5169000	58079	231000	2596	4,3
5	Флаг- ман	буль- вар 1 Салю- та, 6В	Телевышка, БГТУ м. Шухова, тц Модный бульвар	117	5300000	45299	117	4890000	41795	410000	3504	7,7
6	Граж- данс- кий прос- пект 25	Граж- данс- кий прос- пект 25	Соборная пло- щадь, Смоленский собор, церковь А. Невского, памят- ники	105	7500000	71429	109	7200000	66055	300000	5374	7,5
7	Гранд парк	Белго- родс- кий прос- пект, 114	Центральный парк им. Ленина	104	5472000	52615	105	5264000	50133	208000	2482	4,7
8	Архи- ерейс- кая роща	улица Горь- кого, 54Б	парк "Архиерей- ская роща", цер- ковь	100	4536000	45360	101	4500720	44562	35280	798	1,8
9	Пар- ковая 8	Пар- ковая улица 8	Центральный парк им. Ленина, ДК Энергомаш	110	6300000	57273	108	5650000	52315	650000	4958	8,7
10	Вокза- льная 26а	Вокза- льная улица, 26A	Филармония	95	4950000	52105	94	4600000	48936	350000	3169	6,1
11	Париж	Харь- ковс- кая улица, 3	парк Победы, р. Везелка, музей-ди- орама «Огненная дуга»	78	5200000	66667	72	4400000	61111	800000	5556	8,3

Таблица 2

Рейтинг привлекательности видов из окон новостроек г. Белгорода

No		Масштаб-	Современность /	Видовое	Эмоционально-	Привлека- тельность	
п/п	Наименование ЖК		технологичность	разнооб-ра-	цветовая харак-		
11/11		ность вида	вида	зие	теристика	вида, %	
1	Империал	5	4	5	5	96	
2	Гостенский	4	4 4		3	77	
3	Уютный	3	3 4		3	64	
4	Шаландина 5а	4	3	2	4	65	
5	Флагман	4	5	3	5	81	
6	Гражданский проспект 25	5	3	4	3	81	
7	Гранд парк	4	3	3	3	67	
8	Архиерейская роща	3	2	2	4	53	
9	Парковая 8	5	3	4 5		86	
10	Вокзальная 26а	3	4	5	2	73	
11	Париж	4	4	5	4	86	
	Удельные веса	0,37	0,21	0,28	0,14	∑=1	

Результаты вычислений свидетельствуют о минимальном влиянии фактора эмоциональноцветовой характеристики на стоимость видовых параметров. Эксперты объясняют данную ситуацию неоднозначностью и субъективностью индивидуальных предпочтений покупателей квартир. Наибольшую значимость приобрел фактор масштабности вида, практически равное значение имеют факторы технологичности и видового разнообразия.

Согласно полученным данным построена парная линейная регрессия зависимости процентной надбавки к стоимости жилой недвижимости за вид из окна и привлекательностью вида (рис. 1).

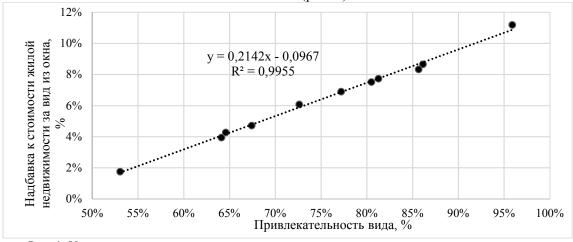


Рис. 1. Удельная цена видовых характеристик квартиры на основе привлекательности вида

**Выводы.** В результате проведенного анализа были сделаны следующие выводы:

- усредненное превышение стоимости видовой жилой недвижимости над типовыми квартирами в историческом центре города составляет 7,5 %, вблизи парков и лесных массивов 5,9 %, с видом на городскую панораму 9,0 % в текущих рыночных условиях г. Белгорода;
- надбавка к стоимости жилой недвижимости за вид из окна прямо пропорциональна привлекательности вида, являющейся производной функцией от четырех факторов привлекательности, таких как градостроительный, эстетический,

эмоциональный и прочие, формирующих цену предложения;

- рост привлекательности видовых характеристик на 4–5 % влечет увеличение к стоимости недвижимости на 1 %;
- наибольшая удельная цена вида из окна достигается при сочетании многообразия аттракторов: природные пейзажи, исторические объекты, городская панорама и т.д. Для г. Белгорода объектами с богатым визуальным обзором выступают квартиры на верхних этажах жилого комплекса «Париж», где в отдельных случаях надбавка к стоимости вида из окна в общей стоимости объекта составляет до 12 % [17];

Таким образом, представленный количественный анализ по категориям позволяет девелоперу осуществлять эффективное управление градостроительным потенциалом территории и стратегией рыночного продвижения объектов жилой недвижимости.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Абакумов Р.Г., Оберемок М.И. Аналитический обзор методических инструментов, применяемых в методе сравнения продаж при корректировках цен аналогов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №3. С. 182–191.
- 2. Щербакова М.И., Наумов А.Е., Авилова И.П. К вопросу о рациональном составе инфраструктуры территорий индивидуального жилищного строительства // В сборнике: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2016. С. 5377–5382.
- 3. Оберемок М.И. Эффективность инвестирования индивидуальной жилой застройки с учетом сложности освоения территории // В сборнике: Международный студенческий строительный форум 2016 (к 45-летию кафедры строительства и городского хозяйства): электронный сборник докладов. 2016. С. 913–919.
- 4. Оберемок М.И. Оптимизация расходов на инфраструктурное оснащение территорий под индивидуальное жилищное строительство // В сборнике: Международный студенческий строительный форум 2016 (к 45-летию кафедры строительства и городского хозяйства): электронный сборник докладов. 2016. С. 905–912.
- 5. Оберемок М.И. Транспортная доступность территории ИЖС как ценообразующий фактор на рынке земли // В сборнике: Международный студенческий строительный форум 2016 (к 45-летию кафедры строительства и городского хозяйства): электронный сборник докладов. 2016. С. 920–926.

- 6. Eddie C.M. Hui C.K., Chau Lilian Pun M.Y. Law. Measuring the neighboring and environmental effects on residential property value: Using spatial weighting matrix // Building and Environment. 2007. Volume 42. Issue 6. Pp. 2333–2343.
- 7. Jim C.Y., Wendy Chen Y. Value of scenic views: Hedonic assessment of private housing in Hong Kong // Landscape and Urban Planning. Volume 91. Issue 4. 30 July 2009. Pp. 226–234.
- 8. Rachel Kaplan. The Nature of the View from Home: Psychological Benefits // Environment and Behavior. 2001. Vol 33. Issue 4.
- 9. Ian D Bishop, Eckart Lange, Alani Muhammad Mahbubul. Estimation of the Influence of View Components on High-Rise Apartment Pricing Using a Public Survey and GIS Modeling // Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science. 2004. Vol 31. Issue 3.
- 10. Roger S. Ulrich. Visual landscapes and psychological well-being // Landscape Research Journal. 2007. Pp. 17–23,
- 11. Лейфер Л.А., Крайникова Т.В. Справочник оценщика недвижимости 2018. Квартиры. Нижний Новгород, 2018 г.
- 12. RuTraveller. Достопримечательности г. Белгорода. URL: https://www.rutraveller.ru/resort/1872 (21.01.2019).
- 13. Трансюжстрой ПГС. URL: https://tus-pgs.ru (21.01.2019).
- 14. OOO «Bera». URL: http://bel-vega.ru (21.01.2019).
- 15. Циан. База недвижимости в Белгороде. URL: https://belgorod.cian.ru (21.01.2019).
- 16. Мир квартир недвижимость в Белгороде и области. URL: https://www.mirkvartir.ru (21.01.2019).
- 17. Данные опроса риэлтерских агентств г. Белгорода: АН «Мой город», АН «Дельфин», АН «ЖилТрест», АН «Вертикаль».

### Информация об авторах

**Оберемок Марина Игоревна**, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства, ассистент кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: marina-over@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

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

**Щенятская Марина Александровна**, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: marine-r@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в январе 2019 г.

© Оберемок М.И., Наумов А.Е., Щенятская М.А., 2019

## <sup>1</sup>Oberemok M.I., <sup>1,\*</sup>Naumov A.E., Shchenyatskaya M.A

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov Russia, 308012, Belgorod, St. Kostyukova, 46 \*E-mail: naumov.ae@bstu.ru

# QUALITATIVE ANALYSIS OF VIEW CHARACTERISTICS OF RESIDENTIAL PROPERTY

Abstract. Some kinds of residential real estate are characterized by a special view from the windows. Apartments with unique characteristics are in high demand among the population, therefore the cost of these objects exceeds the average market price. As a rule, developers try to make the best use of the visual prospects of residential real estate. The paper provides a qualimetric analysis of estimation the view characteristics of apartments in Belgorod based on the demand factors. There is the classification of view components of residential real estate on the basis of urban planning, aesthetic, emotional and other functions. Conclusions on the cost of the view are formed taking into account the criteria of its attractiveness. Functional dependence is obtaine. It allows to determine the surcharge to the cost of residential real estate based on differences in the view. The practical aim of determining the specifics of apartments pricing with a view is the ability to manage demand and to improve the efficiency of residential real estate development.

Keywords: qualimetric analysis, market value, residential real estate valuation, demand factors.

#### REFERENCES

- 1. Abakumov R.G., Oberemok M.I. Analytical review of methodological tools in the sales comparison method. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2017, no. 3, pp. 182–191.
- 2. Shcherbakova M.I., Naumov A.E., Avilova I.P. To a question of rational structure of territories infrastructure of individual housing construction. In the collection: International scientific and technical conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2016, pp. 5377–5382.
- 3. Oberemok M.I. Efficiency of investment of individual housing development taking into account complexity of the territory development. In the collection: International student construction forum 2016 (to the 45th anniversary of chair of construction and municipal services): electronic collection of reports, 2016, pp. 913–919.
- 4. Oberemok M.I. Optimization of expenses on infrastructure equipment of territories for individual housing construction. In the collection: International student construction forum 2016 (to the 45th anniversary of the Department of construction and municipal services): electronic collection of reports, 2016, pp. 905–912.
- 5. Oberemok M.I. Transport accessibility of the territory of individual housing construction as a pricing factor in the land market. In the collection: International student construction forum 2016 (the 45th anniversary of the Department of construction and urban management): electronic collection of reports, 2016, pp. 920–926.
- 6. Eddie C.M., Hui C.K., Chau Lilian Pun M.Y. Law. Measuring the neighboring and environmental effects on residential property value: Using

- spatial weighting matrix. Building and Environment, vol. 42, issue 6, june 2007, pp. 2333–2343.
- 7. Jim Wendy C.Y., Chen Y. Value of scenic views: Hedonic assessment of private housing in Hong Kong. Landscape and Urban Planning. Volume 91, Issue 4, 30 July 2009, pp. 226–234.
- 8. Rachel Kaplan. The Nature of the View from Home: Psychological. Benefits. Environment and Behavior, 2001, vol 33, issue 4.
- 9. Ian D Bishop, Eckart Lange, Alani Muhammad Mahbubul. Estimation of the Influence of View Components on High-Rise Apartment Pricing Using a Public Survey and GIS Modeling. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, Vol. 31, Issue 3, 2004.
- 10. Roger S. Ulrich. Visual landscapes and psychological well-being. Landscape Research Journal, 2007, pp. 17–23,
- 11. Leifer L.A., Krainykovo T.V. Directory of real estate appraiser 2018. The Apartment. Nizhny Novgorod, 2018.
- 12. RuTraveller. Attractions of Belgorod. Available at: https://www.rutraveller.ru/resort/1872 (accessed 21.01.2019).
- 13. Transyuzhstroy PGS. Available at: https://tus-pgs.ru (accessed 21.01.2019).
- 14. VEGA, OOO. Available at: http://belvega.ru (accessed 21.01.2019).
- 15. Cyanogen. Real estate base in Belgorod. Available at: https://belgorod.cian.ru (accessed 21.01.2019).
- 16. World apartments-real estate in Belgorod and the region. Available at: https://www.mirkvartir.ru (accessed 21.01.2019).
- 17. Survey data from the real estate agencies in Belgorod: "My city", "Dolphin", "Zhiltrest", "Vertical".

Information about the authors

**Oberemok, Marina I.** Postgraduate student, assistant. E-mail: marina-over@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.

**Shchenyatskaya, Marina A.** PhD, Assistant professor. E-mail: marine-r@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in January 2019

#### Для цитирования:

Оберемок М.И., Наумов А.Е., Щенятская М.А. Квалиметрический анализ видовых характеристик жилой недвижимости // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 44–51. DOI:  $10.34031/article\_5ca1f631244a52.27503491$ 

#### For citation:

Oberemok M.I., Naumov A.E., Shchenyatskaya M.A. Qualitative analysis of view characteristics of residential property. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 44–51. DOI: 10.34031/article 5ca1f631244a52.27503491

# DOI: 10.34031/article\_5ca1f6317f5159.81058787 <sup>1,\*</sup>Петрусенко Ю.В.

<sup>1</sup>Южный Федеральный Университет. Академия архитектуры и искусств Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42 \*E-mail: miss.smiyukha21@yandex.ru

## КОНСТРУКТИВНЫЕ И АРХИТЕКТУРНО-ХУДОЖЕСТВЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПАВИЛЬОНА КРЫТОГО РЫНКА НА СТАРОМ БАЗАРЕ В Г. РОСТОВЕ-НА-ДОНУ

Аннотация. В данной статье автором рассматриваются архитектурно-художественные и конструктивные особенности павильона крытого рынка на Старом базаре. Производится поиск и выявление аналогов крытого рынка, архитектура которых повлияла на внешний и внутренний облик здания. Определяется основные условия проектирования, значение объекта в исторической застройке. Целью исследования является выявление конструктивных и архитектурно-художественных особенностей павильона крытого рынка на Старом Базаре в Ростове-на-Дону. В творчестве его автора архитектора Соколова Николая Матвеевича (1859—1906), как и в архитектуре данного объекта прослеживается влияние «архитектора-наставника» Китнера Иеронима Севастьяновича (1839—1929) — представителя рационального направления архитектуры XIX в. Одной из важнейших проблем данного исследования стало выявление влияния зодчих-наставников на творческую деятельность городского архитектора Н.М. Соколова на примере рассматриваемого павильона крытого рынка на Старом базаре.

**Ключевые слова:** архитектура, строительство, крытые рынки, аналоги, архитектор Соколов Н.М., архитектурная практика, Старый базар, Ростов-на-Дону.

Введение. Исторический центр Ростова — Центральный рынок (Старый базар) — самое древнее городское образование. «С него, первого ростка, начинался город. А сам рынок возник на перекрестке двух важнейших дорог, одна из которых вела на Северный Кавказ, а вторая в Причерноморскую степь» [1].

Актуальность данной темы возрастает в современных условиях в связи с возникшим интересом к историческому наследию региональной архитектуры и с расширением процессов реконструкции и нового строительства в условиях исторического центра города. Центральный рынок г. Ростова-на-Дону (Старый базар) – одна из главных достопримечательностей донской столицы, находящаяся на территории «Солдатской слободы». Актуальность работы обусловлена недостаточной изученностью конструктивных и архитектурно-художественных особенностей павильона крытого рынка на старом базаре в городе Ростове-на-Дону. В данной работе рассматриваются историческое возникновение павильонов крытых рынков Старого базара. Рассматриваются и выявляются конструктивные и архитектурно-художественные особенности павильонов крытых рынков, формирующих архитектурно-строительную практику г. Ростова-на-Дону. Производится выявление аналогов крытых рынков, архитектура которых повлияла на внешний и внутренний облик здания. Целью исследования является рассмотрение и установление архитектурно-художественных особенностей павильона крытого рынка. В образе данного павильона и творчестве архитектора Соколова Николая Матвеевича (1859–1906) прослеживается влияние «архитектора-наставника» Китнера Иеронима Севастьяновича (1839–1929) — последователя линии «рациональной архитектуры». Проблема исследования заключается в установлении влияния зодчихнаставников на творческую деятельность городского архитектора Н.М. Соколова на примере рассматриваемого павильона крытого рынка на Старом базаре. Данное исследование проделано с целью рассмотрения архитектуры конкретного объекта для создания в последующем общей картины о творчестве архитектора Н.М. Соколова, проектирующего в конце XIX— начала XX века в г. Ростове-на-Дону.

Торговля на Старом базаре производилась в торговых рядах и отдельно стоящих лавках, причем поначалу все помещения были деревянными. В сохранившихся сведениях о каменных зданиях, существовавших в Ростове в 1821 г., отсутствуют упоминания о торговых корпусах на Старом базаре. «Первые корпуса были возведены в 20-х – 40-х гг. XIX в. на улице Московской. Новый этап строительства каменных торговых помещений на территории Старого базара пришелся на 1880-1890-е гг.» [2, с.1]. Во второй половине XIX в. появляется новый тип торговых сооружений - крытые рынки, строительство которых позволяло упорядочить розничную торговлю и улучшить санитарные условия. Первый корпус - Рождественский рынок строится в 1886г., был построен второй корпус крытого рынка на Старом базаре на углу Таганрогского проспекта (ныне – Буденновский) и Полицейском (ныне – Тургеневской)

улицы – 1891 г., третий корпус крытого рынка на Старом базаре – автором проекта был городской архитектор Н.М. Соколов, 1893 г. [3, с. 34–36]. В период XX - начала XXI вв. функциональное назначение здания не изменялось. Здания крытых рынков имели большой российский успех - своего рода визитная карточка торгово-купеческого Ростова той эпохи. Николай Матвеевич Соколов «Родился в 1859 г., учился в Пинском, а затем в Виленском реальном училище, в 1880 г. поступил в Институт гражданских инженеров, откуда выпущен по первому разряду с настоящим званием в 1885 г. ...В скором времени (1886 г.) перешёл в Ростов н/Д на место городского техника с правами государственной службы... С 1887 г. состоит городским архитектором второго участка города Ростова-на-Дону и помимо служебных обязанностей, занимается и частной практикой» [10]. «Второй участок» включал в себя тогда район Богатого колодезя, торгового порта, Нового базара, Покровской площади, больницы Красного креста и др. [12].

Методология. Метод исследования основан на натурном исследовании, фотофиксации существующих построек Николая Матвеевича Соколова, изучение архивных документов, охранных обязательств, связанных с данным объектом, исследование и изучение с помощью сравнительно исторического метода. Систематизация и обобщение уже известных материалов, выявление новых документов в разных проектных организациях, архивах и музейных фондах, изучение общей и специальной литературы по данному вопросу.

Основная часть. Здание павильона рассматриваемого Крытого рынка располагается в системе застройки ул. Станиславского и пр. Буденновского по адресу: ул. Станиславского, 56, является частью комплекса торговых строений Старого базара (рис. 1). Композиционная значимость объекта является неотъемлемой стьюзастройки исторического центра г. Ростована-Дону. Павильон крытого рынка является объектом культурного наследия. Особенностью объекта являются его конструкции и объемно-пространственная композиция кирпичного здания, прямоугольной конфигурации в плане, с переменной этажностью, высотой от одного до двух этажей. Архитектурно-художественный облик здания включает в себя доминирующий объем двухсветного зала с примыкающими к нему одноэтажными торговыми ячейками магазинов. Треугольный фронтон торгового зала оформлен парапетами и ритмом разновеликих полуциркульных оконных проемов в тимпанах.



Рис. 1. «Павильон крытого рынка». Вид здания с северо-западной стороны фото Петрусенко Ю.В. 2018 г.

«При строительстве были использованы прогрессивные для Европы и России безопорные большепролетные металлические фермы, учтены удобства торговых и складских операций с соблюдением санитарно-гигиенических и противопожарных условий» [4, с. 80]. На крыше был устроен световой фонарь. В последующем, «в ходе ремонтов верхний световой фонарь был демонтирован» [2, с. 2]. Корпус Крытого рынка представляет собой в плане здание прямоугольной конфигурации с доминирующим центральным двухсветным объемом торгового зала и одноэтажными пристройками, расположенными по периметру здания. Несущие стены здания выполнены на цементно-песчаном растворе из полнотелого керамического кирпича. Перекрытие подвала выполнено из большеразмерного кирпича в виде массивных цилиндрических сводов. Перекрытия над одноэтажными пристройками - деревянные по деревянным балкам, над двухсветным объемом торгового зала конструкциями перекрытия являются большепролетные металлические фермы. Крыша над двухсветным объемом торгового зала двухскатная, над одноэтажными пристройками – односкатная. Оконные проемы двух видов - арочные с полуциркульными перемычками и прямоугольные. Стены нижнего яруса фасадов оштукатурены и окрашены. Верхний ярус фасадов решен в «кирпичном стиле» [2].

В объемно-пространственной композиции здания доминирует центральный двухсветный объем торгового зала, к которому по периметру примыкают одноэтажные торговые ячейки-магазины (рис. 2). Фасады здания по стилистике однородны и имеют симметричную композицию. Композиционно фасады делятся на два яруса: верхнюю часть двухсветного зала и фасады одноэтажной пристройки. Симметричную композицию западного и восточного фасадов в уровне верхнего яруса основного объема подчеркивают треугольные фронтоны с парапетами и ритмом разновеликих полуциркульных оконных проемов

в тимпанах. Архитектурно-художественный облик второго яруса сформирован завершающим карнизом, витражными проемами, в простенках которых, располагаются пилястры и массивными подоконниками. Порталы наружных входов в павильон делают упор на симметрию нижнего яруса фасада. Архитектура нижнего яруса фасада сформирована профилированным карнизом, небольшими «полочками» - тениями, завершающими ордер, рустовкой, оформляющей простенки оконных проемов, а также перемычками оконных проемов [2]. С востока фасад двухэтажной пристройки по композиции также разделен на два яруса. Две крайние раскреповки с полуциркульными проемами входов подчеркивают симметрию композиции фасада. Раскреповки завершаются треугольными фронтонами. Внешний облик восточного фасада сформирован антаблементом, включающимся карнизом и ритм декоративных кронштейнов, тениями и метопами фриза раскреповок. Верхний ярус фасада представлен пилястрами стилизованного ионического ордера, оформляющие боковые части раскреповки. В простенках проемов верхнего яруса фасада расположены пилястры стилизованного ионического ордера, оформленные декоративными муфтами. Верхний ярус центральной части фасада сформирован и представлен рустовкой стен и выделенными замками клинчатых перемычек оконных проемов. Пилястры, декорированные муфтами, оформляют боковые части раскреповки в уровне нижнего яруса фасада. Полуциркульные арочные проемы входных порталов венчают декоративные замки. Внешний облик южного и северного фасадов в уровне второго яруса образован с помощью профилированного карниза, композицию создает ряд чередований из витражей оконных проемов и пилястр в простенках между ними. «Архитектурно-художественный облик фасадов здания дополняют ворота проездов. Ворота стальные двустворчатые с фрамугами, со стороны восточного, западного и южного фасадов фрамуги и створки ворот глухие, декорированы ажурными решетками со стороны северного фасада полотна ворот и фрамуга ажурные» [2, c. 4].

Рассмотрев архитектурно-художественные и конструктивные особенности павильона Крытого рынка на Старом базаре, можно сделать предположение, что на образ данного павильона и творчество архитектора Соколова Николая Матвеевича, повлияло творчество архитектора Китнера Иеронима Севастьяновича (1839–1929) – русского архитектора и преподавателя, профессора строительного училища – Института гражданских инженеров и Института ин-

женеров путей сообщения, почетного члена Императорской Академии художеств, представителя «кирпичного стиля»[5]. Иероним Севастьянович Китнер внес крупный вклад в развитие русской архитектуры и воспитал не одно поколение архитекторов, продолжающих его творческую линию и линию его наставников. В творчестве Китнера особенности развития эклектики проявились под знаком глубокого осмысления происходящих изменений [13].

Аналогом рассматриваемого в данной статье корпуса крытого рынка на Старом базаре послужил проект Китнера – Корпуса крытого рынка на Сенной площади (1883–1885 гг.; павильоны были разобраны в 1939 году, конструкции употребили для перекрытия торгового зала Калининского рынка – Полюстровский пр., 45) [7].

Первоначальный вариант проекта Корпусов рынка на Сенной площади И.С. Китнера представлял собой сочетание корпусов, образующих одно здание в центре площади, формирующее в плане восьмиконечный крест. Такое оригинальное решение, соответствующее центральной схеме расположения, позволяло сформировать большее количество места под торговые лавки и в то же время, создать просторные хозяйственные дворы. Достаточно подробно описан внешний облик и структура рынка в газете «Голос» 1880 г.: «...новый рынок помещается в одном неразрывном здании, имеющем в плане форму восьмиконечного креста, состоящего из центрального продольного объема и трех поперечных нефов, расположенных симметрично на всем пространстве Сенной площади, остающемся за отделением обязательной ширины проездов по четырем сторонам...» [6].

Другим вариантом решения проекта было расположение четырех павильонов (литер «А», «Б», «В», «Г») (рис. 3). Дума 10 декабря 1882 года отдала предпочтение проекту из четырех павильонов, который и был принят [6].

Новаторским подходом Китнера в комплексе павильонов Сенного рынка является применение металлического рамного каркаса и сплошного остекления. Исходя из планировочного решения корпусов рынка, которые не предусматривали большое количество промежуточных опор и горизонтальных затяжек каркаса, были применены уникальные конструкции перекрытия большепролетных помещений. Оригинальным и простым способом был монтаж металлических конструкций, который заключался в том, чтобы с помощью уже установленной опоры в вертикальное положение выводилась следующая и так далее. Металлические конструкции были разработаны инженерами Г.Е. Паукером и директором металлического завода О.Е. Крелем [7].

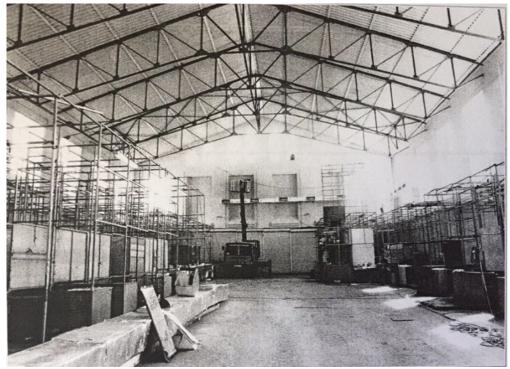


Рис. 2. «Павильон крытого рынка». Интерьер двухсветного торгового зала [2]

Интерьер был представлен открытыми металлическими конструкциями перекрытия, большими поверхностями остекления. Применение широкой полосы окон по продольным фасадам и огромных арочных окон в торцах здания явилось основой новых эстетических качеств сооружения. Можно предположить, что Китнер применил здесь опыт, полученный у архитектора В. Бальтара, строившего павильоны рынка в Париже (рис. 4). Проект В. Бальтара предполагал двена-

дцать крытых остекленных павильонов с крытыми остекленными улицами на чугунных колоннах. В то время началось активное внедрение металлоконструкций в совокупности с остеклением. Но Иероним Китнер пошел дальше — он создал новую архитектуру из железа, стекла и стали. Эти павильоны явились образцами рациональной архитектуры вследствие четкой объемно-пространственной композиции и функциональной планировке [8].

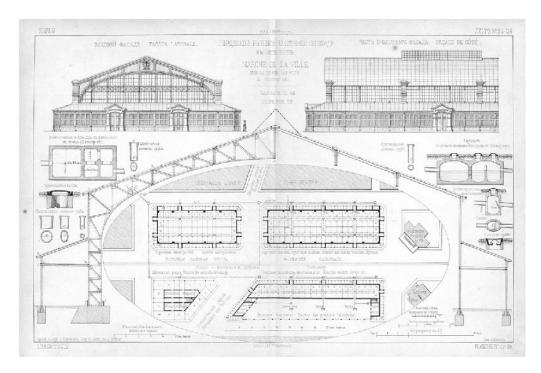


Рис. 3. Проект Городского рынка на Сенной площади. И. С. Китнер. Г. Санкт-Петербург [11]



Рис. 4. Здания крытого рынка в Париже архитектор Виктор Бальтар [8]

#### Выводы.

- 1. В работе выявлены основные конструктивные особенности здания павильона крытого рынка конструкция, состоящая из безопорных большепролетных металлических ферм, позволяющая создать доминирующий объем двухсветного пространства торгового зала.
- 2. Следующей особенностью было решение на планировочном уровне, отвечающее высочайшим мировым стандартам противопожарной системы и санитарно-гигиеническим нормам.
- 3. Несущие стены здания выполнены на цементно-песчаном растворе из полнотелого керамического кирпича, что характерно для «кирпичного стиля» в работах Н.М. Соколова второй половины XIX—начала XX века.
- 4. Архитектурно-художественный облик здания представляет собой объемно-пространственную композицию с доминирующим центральным двухсветным объемом торгового зала, к которому по периметру примыкают одноэтажные торговые ячейки-магазины.
- 5. В работе также были выявлены аналоги, повлиявшие на архитектурно-художественный и конструктивный облик и структуру Павильона Крытого рынка на Старом Базаре, построенного архитектором Н.М. Соколовым (1859-1906). Это проект Корпусов крытого рынка на Сенной площади (1883-1885гг.) по проекту архитектора И.С. Китнера (1839-1929), который в свою очередь использовал опыт архитектора В. Бальтара, строившего павильоны рынка в Париже.
- 6. Павильоны И.С. Китнера на Сенной площади явились образцами рациональной архитектуры вследствие четкой объемно-пространственной композиции и функциональной планировке, что оставило несомненный отпечаток на творчестве архитектора Н.М. Соколова.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Официальный сайт Центрального рынка города Ростова-на-Дону // Историческая справка. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: http://www.trademarket.ru 18.10.2018.
- 2. Охранное обязательство № 186-14 от 29 августа 2014 г. на объект культурного наследия Закрытое акционерное общество «Центральный рынок».
- 3. Иванова-Ильичева А.М. Рационалистические тенденции в архитектуре городов Нижнего Дона и Приазовья второй половины XIX начала XX вв.: На примере Таганрога, Ростова-на-Дону и Нахичевани-на-Дону, Новочеркасска. Москва, 2000 г.
- 4. Кукушин В.С. История архитектуры Нижнего Дона и Приазовья. Ростов-на-Дону: издательство «ГинГо», 1996. С. 274.
- 5. Китнер Ю.И. Архитектор И.С. Китнер // Архитектурное наследство. М., 1976. Вып. 25. С. 154–175.
- 6. Юркова З.В. Сенная площадь. Вчера, сегодня, завтра // Конкурс на проект Сенного рынка и его строительство. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://history.wikireading.ru/300665. 16.10.2018
- 7. Николаева Т.И. Виктор Шретер. Иероним Китнер. Санкт-Петербург: Изд.дом «Коло», 2007. 400 с.
- 8. Миропольская Р.А. Архитекторы Петербурга: Иероним Китнер. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://www.nrfmir.ru/en/content/arhitektory-peterburga-ieronim-kitner. 16.10.2018.
- 9. Волошинова Л.Ф. Счастливый человек// Новая городская газета. 1998 г. 13–19 февраля. №7. С. 6–7.

10.Барановский Г.В. Юбилейный сборник сведений о деятельности бывших воспитанников Института гражданских инженеров (Строительного училища) 1842-1892 г. г. Санкт-Петербург, 1893г.

11.3одчий. 1883. №12. С. 33,34,35,36. 12.3одчий. 1873. № 3-4. С. 37-40.

#### Информация об авторах

**Петрусенко Юлия Викторовна**, аспирант кафедры Истории Архитектуры Искусств и Архитектурной Реставрации, ассистент кафедры Основ Архитектурно-Художественного Проектирования. E-mail: miss.smiyukha21@yandex.ru. Южный Федеральный Университет. Академия архитектуры и искусств. Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая,105/42.

Поступила в феврале 2019 г. © Петрусенко Ю.В., 2019

#### 1,\*Petrusenko Y.V.

<sup>1</sup>Southern Federal University. Academy of Architecture and Arts Russia, 344006, Rostov-on-don, Bolshaya Sadovaya street, 105/42 \*E-mail: miss.smiyukha21@yandex.ru

# CONSTRUCTIVE AND ARCHITECTURAL QUALITIES OF THE PAVILION OF THE COVERED MARKET ON THE OLD BAZAAR IN ROSTOV-ON-DON

Abstract. The author examines the architectural, artistic and structural features of the pavilion of covered market in the Old Bazaar. Search and identification of analogues of the covered market, which architecture influenced the external and internal appearance of the building is produced. The basic design conditions and the value of the object in the historical building are determined. The aim of the study is to identify the constructive, architectural and artistic features of the pavilion in the Old Bazaar in Rostov-on-Don. In the works of its architect Nikolai Sokolov (1859–1906), as well as in the architecture of this object, the influence of the "architect-mentor" Jeronim Kitner (1839–1929) – a representative of the rational architecture of the XIX century – is marked. One of the most important issue of this study is to identify the influence of architect-mentors on the creative activity of Nikolai Sokolov, on the example of considered pavilion at the Old Bazaar.

**Keywords:** architecture, building, covered markets, equivalent, analogues, architect Sokolov N. M. architectural practice, Old Bazaar, Rostov-on-Don.

#### REFERENCES

- 1. The official website Of the Central market of the city of Rostov-on-don. Historical information. [Electronic resource] access Mode: URL: http://www.trademarket.ru 18.10.2018.
- 2. Security obligation No. 186-14 of 29 August 2014. the object of cultural heritage closed joint stock company «Central market».
- 3. Ivanova-Ilyicheva A.M. The Rationalist trends in the architecture of the cities of the Lower don and the Azov region of the second half of the XIX-XX centuries: on the example of Taganrog, Rostov-on-don and Nakhichevan-on-don, Novocherkassk, Moscow, 2000.
- 4. Kukushin V.S. History of architecture of the Lower don and the Azov sea. Rostov-on-don: Gingo publishing house, 1996, p. 274.
- 5. Kitner Yu. I. Architect I. S. Kitner Architectural heritage. M., 1976, vol. 25, pp. 154–175.
- 6. Yurkova Z.V. Sennaya square. Yesterday, today, tomorrow. Competition for the hay market

- project and its construction. [Electronic resource]. access Mode: URL: https:// history.wikireading.ru/300665.16.10.2018.
- 7. Nikolaeva T.I. Victor Shreter. Jerome Kitner. St. Petersburg: Ed.home «Kolo» in 2007, 400 P.: Il.
- 8. Miropolsky R.A. Architects of St. Petersburg: Jerome Kitner. [Electronic resource] access Mode: URL: https://www.nrfmir.ru/en/content/arhitektory-peterburga-ieronim-kitner.16.10.2018.
- 9. Voloshinova L. Happy man. Novaya Gorodskaya Gazeta, 1998, February 13–19, no. 7, pp. 6–7.
- 10.Baranovskiy G.V. Commemorative collection of information about the activities of former pupils of the Institute of civil engineers (Building schools) 1842–1892. Saint-Petersburg, 1893.
  - 11. Architect, 1883, no. 12, pp. 33, 34, 35, 36. 12. Architect, 1873, no. 3–4, pp. 37–40.

Information about the authors

**Petrusenko, Yulia V.** Post-graduate student. E-mail: miss.smiyukha21@yandex.ru. Federal state Autonomous educational institution of higher education «Southern Federal University». Academy of architecture and arts. Russia, 344006, Rostov-on-don, Bolshaya Sadovaya street, 105/42.

Received in February 2019

#### Для цитирования:

Петрусенко Ю.В. Конструктивные и архитектурно-художественные особенности павильона крытого рынка на старом базаре в г. Ростове-на-Дону // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №3. С. 52–58. DOI: 10.34031/article 5ca1f6317f5159.81058787

#### For citation:

Petrusenko Y.V. Constructive and architectural qualities of the pavilion of the covered market on the old bazaar in Rostov-on-Don. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 52–58. DOI: 10.34031/article 5ca1f6317f5159.81058787

## DOI: 10.34031/article\_5ca1f631dd9ac4.78538855 <sup>1</sup>,\*Колесникова Л.И., <sup>1</sup>Цветкова Ю.П.

<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

\*E-mail: architektura bgty@mail.ru

# ДРЕВНИЙ БЕЛГОРОДСКИЙ ПАМЯТНИК АРХИТЕКТУРЫ «УСПЕНСКО-НИКОЛАЕВСКИЙ СОБОР», 1692—1703 ГОДОВ, — ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЫ XIX ВЕКА

Аннотация. В статье освещается история строительства древнейшего в Белгородской области, сохранившегося до наших дней, русского православного храма «Успенско-Николаевский собор». Приводятся библиографические сведения, касающиеся истории и времени строительства храма, возведенного в эпоху московского барокко — нового стилевого направления в архитектуре Москвы и Подмосковья конца XVII — начала XVIII вв., для которого характерны логичность в соотношении масс, пышность белокаменного декора, в котором своеобразно интерпретированы орнаментальные и ордерные элементы западноевропейского барокко — картуши, «разорванные» фронтоны, колонки и пилястры с растительными капителями и т.п.

Описываются местоположение храма, возведенного в бывшей слободе Жилой, расположенной западнее города Белгорода, застроенного по генеральному плану 1768 г. арх. А.В. Квасова после пожара, случившегося в 1766 г., и современная градостроительная ситуация местоположения храма в структуре современной городской застройки. Рассматривается исторический планировочный каркас.

Анализируются: объемно-планировочное и объемно-пространственное решение соборного храма в исторической хронологии, а также конструктивные решения четверика храма, колокольни и двухстолиной трапезной, возведенной в первой половине XIX века, декоративное оформление фасадов и интерьеров. Рассмотрены основные строительные этапы храма от его создания до проведения реставрационных работ, выполненных в 2005 году. Описываются укрепительные и реставрационные работы по сохранению объекта культурного наследия. Приводится картографический материал, планы здания храма разных строительных этапов, архивные и современные фотографии экстерьеров и интерьеров, как в процессе реставрационных работ, так и после реставрации.

**Ключевые слова:** храм, собор, объем, планировка, реставрация, фасад, свод, купола, фриз, апсида, четверик, колокольня, шатер, укрепительные работы, картография, фото фиксация, зодчество, московское барокко.

В истории русской культуры XVII век занимает особое место. Современники называли его «бунташным» из-за бунтов и народных войн, широкой волной прокатившимися по Руси, и теми переменами, которые за ними последовали. В архитектуре культовых и светских зданий развивается новое направление, получившее название барокко, позднее — московское барокко, которое включает в себя различные стили, среди которых: строгановский, нарышкинский, голицынский стили, петровское барокко, русское барокко елизаветинского времени.

К первому этапу развития русского барокко относится «нарышкинское барокко» название этого архитектурного течения было обязано боярскому роду Нарышкиных, в чьих московских и подмосковных имениях были построены церкви с некоторыми элементами нового для России того времени стиля барокко [9].

Московское барокко — это условное название стиля русской архитектуры последних десятилетий XVII — первых лет XVIII вв., основной

особенностью которого является широкое применение элементов архитектурного ордера и использование центрических композиций в храмовой архитектуре. В различных регионах России объемно-пространственные решения и характерная система оформления (но в несколько упрощенном виде) прослеживается вплоть до конца XVIII в. [10].

С развитием Петербурга и ориентацией на западноевропейскую архитектуру и её мастеров, открыто провозглашенную Петром I, происходит постепенное затухание «московского барокко».

Московское барокко в своем классическом варианте представляет собой стилистически довольно однородное явление. Вне зависимости от географического расположения художественные элементы оформления: ордер, обрамления оконных и дверных проемов, колокольни с шатровым завершением и другие элементы декора следуют стандартной модели и потому легко узнаваемы (рис. 1) [10].

Дух петровских начинаний последних десятилетий XVII – первых лет XVIII вв. напрямую

коснулся и архитектуры [11]. Последние десятилетия XVII в. отмечены большим размахом церковного строительства. Постройкой церквей и

соборов занимались, как разбогатевшие купцы, так и прихожане (т. н. строительство храмов «всем миром»).







Рис. 1. Примеры храмов, построенных в стиле московского барокко: а – Покровский храм в Филях («нарышкинское барокко») 1690–1694 гг.; б – Спасо-Преображенский собор в Костроме 1685–1688 гг.; в – Вознесенская церковь Александровского монастыря в Суздале 1695 г.

Иван Башилов - курский землемер, составивший в 1785 году «Описание курского наместничества вообще и порознь всякого города и уезда с планами городам и картами уездам», описывая застройку г. Белгорода, сообщает интересные сведения о дате начала строительства Успенско-Николаевского храма – 1692 г. [1]. И хотя это свидетельство не подтверждается ссылками на подлинные архивные документы рубежа XVII-XVIII вв., оно не вызывает сомнений. Убедиться в его достоверности позволяет стилистический анализ памятника. Рассматривая объемно-пространственное построение храма, его планировку и архитектурный декор, можно сделать однозначный вывод, что храм был построен в эпоху «московского барокко».

Успенско-Николаевский соборный храм был возведен в бывшей слободе Жилой по ул. Батальонная (современная ул. Пушкина), которая «была заселена ратными людьми Белгородского гарнизона и носила второе название «Солдатская». Слобода Жилая была расположена западнее города Белгорода за Ново-Московской улицей. После пожара, случившегося в Белгороде в 1766 г.,

Белгород был отстроен по новому генеральному плану 1768 г., разработанного архитектором А.В. Квасовым. Прилегающие слободы в генплан не были включены и до 1954 г. первоначальная планировка и застройка слободы Жилой практически не менялась. С образованием Белгородской области в 1954 г. прилегающие слободы были включены в городскую территорию, исторически сложившаяся планировочная структура, как слобод, так и города, стала быстро изменяться. В структуре современной застройки города слобода Жилая расположена западнее исторического центра. Между ними проходит в направлении север-юг пр. Б. Хмельницкого (бывшая Ново- Московская улица).

Во второй половине XVIII века севернее Успенского собора была возведена Покровская церковь, которая перестраивалась в XIX в. Сегодня эти два здания составляют единый церковный ансамбль XVII–XIX вв. и приписаны к Марфо-Мариинскому женскому монастырю (рис. 2, 15).



Рис. 2. Карты города: а – выкопировка из плана 1911 г.: 1 – Успенско-Николаевский собор, 2 – Покровская церковь, 3 – Свято-Троицкий собор мужского монастыря; б – выкопировка из плана города 2018 г.: 1 – Успенско-Николаевский собор, 2 – Покровская церковь, 3 – местоположение Свято-Троицкого собора мужского монастыря

Успенско-Николаевский собор был вторым кирпичным храмом в Белгороде после Свято-Троицкого собора мужского монастыря, возведенного на территории последней Белгородской крепости в 1690 г. (не сохранился до наших дней) (рис. 2). Священник Г. Введенский – исследователь истории собора, во второй половине XIX века писал: «Успенско-Николаевский собор в городе Белгороде Курской епархии замечательный храм в истории русской церковной архитектуры. По времени построения он древнее многих русских церквей; по системе или плану постройки он во многом отличен от церквей новых, которые строились в настоящем и прошлом столетиях» [2].

Строительство собора осуществлялось силами солдат белгородского Гарнизона и московскими стрельцами во главе с Иваном Прокофьевым, о которых сообщает Иван Башилов [1]. Это сообщение позволяет предположить, что Московская бригада Мастеров привнесла характерные для московского зодчества того времени объемно-планировочные, декоративные и конструктивные решения в архитектуру Успенско-Николаевского собора.

Объемно-пространственная композиция первоначального вида представляла собой высокий четверик храма с тремя полукруглыми алтарными апсидами и завершением из пяти глав, и отдельно стоящей колокольней с шатровым завершением, расположенной на продольной оси храма (рис. 3).

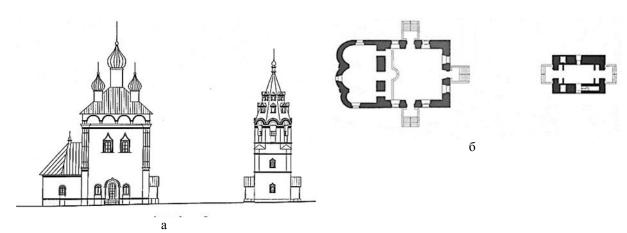


Рис. 3. Первоначальная объемно-пространственная композиция храма: а – северный фасад; б – план храма и колокольни

Объемно-композиционное решение храма и колокольни представляло собой: храм - двухсветный доминирующий по высоте мощный четверик из керамического кирпича с тремя полукруглыми алтарными апсидами, завершенный высокой четырехскатной крышей, несущей пять крупных луковичных глав с крестами, стоящих на глухих барабанах; фасады четверика храма декорированы по углам сдвоенными полуколоннами, сами углы закреплены трехчетверными колоннами, световые проемы двух типов - в нижнем уровне - арочные, выше - высокие прямоугольные, обрамленные наличниками в виде полуколонок, поддерживающих «разорванные» фронтоны, украшенные в местах раскреповки стилизованными вазами; завершены фасады четверика храма – антаблементом, состоящим из: архитрава, имитированного полочками, украшенными снизу трехчастным поребриком, высокого фриза, декорированного архивольтами на импостах, выполненных из лекального кирпича трех типов и невысокого ступенчатого карниза. Фасады апсид прорезаны арочными проемами, верхняя часть фасадов опоясана фризом из трехчастного поребрика и простым карнизом; алтарные апсиды перекрыты кирпичными сводами (конхами), храм — перекрыт четырехлотковым сомкнутым кирпичным сводом, по углам свода заложены голосники (глиняные кувшины, выполняющие роль резонаторов звука); отдельно стоящая колокольня, возведенная по типу «восьмерик на четверике» из керамического кирпича, по высоте уступает четверику храма; грани восьмерика имеют килевидные завершения и арочные проемы звона; на гранях кирпичного шатра в два ряда размещены маленькие арочные слухи с фронтончиками; шатер завершен глухим барабанчиком с луковичной главкой и крестом.

До сих пор в памяти людей живы воспоминания о том, что Петр I пожертвовал деньги на строительство собора. Этому событию есть документальные подтверждения. В книге «Белгород с уездом», изданной в 1882 г. в Харькове и переизданной в 1886 г., автор А.М. Дренякин цитирует текст документа связанного с постройкой собора:

«1701 года июля в 15 день великий государь и великий Князь Петр Алексеевич всея великия и малыя и белыя России самодержец пожаловал на свое Государское Богомолье на строения каменныя церкви Успение Пресвятые Богородицы да великого чудотворца Николы что строица в Белгороде в солдатской слободе Жилой сто рублев денег» [3]. Из этого текста следует, что в 1701 г. на храме еще велись строительные работы, и Петр I пожертвовал деньги на продолжение его строительства, которое было завершено в 1703 г.

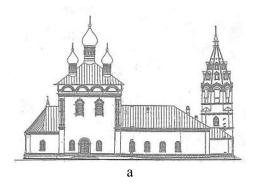
В конце 30-х начале 40-х годов XIX века были начаты работы по строительству большой трапезной части храма, которая должна была объединить четверик храма и отдельно стоящую колокольню. В процессе этих работ южная алтарная апсида была расширена для соединения с новой алтарной апсидой, устроенной в юго-восточной части нового объема трапезной. Западный вход в четверик храма при этих работах был растесан под устройство большой арки в 1842 г. Большая площадь трапезной была разделена по продольной оси двумя мощными столбами, несущими сводчатые перекрытия. Об этом пишет Г. Введенский: "Широкая зала (трапезная) разделена на две части, северную и южную, столбами, между которыми ставятся в зимнее время стеклянные перегородки, чтобы была теплою южная часть залы, где алтарь Николая Чудотворца. Этот алтарь отделяется от залы старинным резным позолоченным иконостасом в пять ярусов икон. В северной зале (трапезной) на восточной стороне, между аркою, ведущею в большой квадрат (в четверик храма), и северною стеною залы, в углу, приставлен новый алтарь в честь Иоанна Предтечи в 1851 г. Из северной залы теперь аркою, а до 42 года малою дверью проход в высокий квадрат (в четверик храма). Здесь в западной стене его, или над головами входящих в эту часть, были хоры. На северной и южной стенах находятся стенные картины Иисуса Страждущего, на западной стене около входа картина Архангела Михаила, поражающего Сатану, и Чудотворца Николая, над хорами изображена вечеря Господня...Иконостас алтаря Успения Божией Матери старинной резной работы, вызолоченный листовым золотом, о шести ярусах икон. В алтаре, в среднем полукружии против окна на восток, было, как видно из описи 1829 года «горнее место и древняя живопись». Горнее место деревянное резное, о шести гладких колоннах, покрыто все листовым золотом. Между колоннами с правой стороны изображение Живоначальной Троицы, а с левой сошествие Святого Духа. В окне по обеим сторонам изображены апостолы Петр и Павел. Над окном сверх карниза на фронтоне написан Бог Отец, над этим живописным образом по правую сторону деревянное вызолоченное Евангелие, по левую деревянные вызолоченные скрижали, между Евангелием и скрижалями такая же чаша. Все это обнесено деревянным вызолоченным сиянием. Под аркою, ведущею в южное полукружие на правой стороне, изображен собор апостолов, а на левой страстная икона – положение во гроб Спасителя. Жертвенник устроен на четырех колоннах, между задними колоннами в рамах изображение Рождества Христова, а выше образ Святого Духа. По левую сторону жертвенника изображение иконы Спасителя, а на окне (в северном полукружии) с одной стороны Предтеча, а с другой – праведный Ной, приносящий жертву Богу. Горнего места и древней живописи в алтаре теперь нет и неизвестно время их уничтожения" [2]. Из этого текста можно сделать вывод, что к 1851 году строительство трапезной части было закончено, так как в этом году: «между аркою, ведущею в большой квадрат (в четверик храма), и северною стеною залы (трапезной), в углу, приставлен новый алтарь в честь Иоанна Предтечи».

После возведения трапезной планировка храма меняется. План становится асимметричным благодаря тому, что южная стена трапезной значительно продвинута на юг относительно четверика храма. Этот прием позволил расположить в юго-восточном углу трапезной полукруглый алтарь Николая Чудотворца и помещение для ризницы за ним, соединившее новый алтарь и южную алтарную апсиду четверика храма, расширенную в южную сторону. Благодаря этому приему первоначальный алтарь и новый соединяются между собой через ризницу. Окна (первый свет) и дверь на южном фасаде четверика храма и окна на западном фасаде были заложены. Объемно-планировочная композиция храма приобрела редкий для Белгородского региона оригинальный асимметричный план с бесстолпным храмом и двухстолпной трапезной. Объемнопространственное решение храма становится целостной монументальной композицией с мощным, доминирующим по высоте объемом четверика храма (рис. 4).

В 1859 году храм сильно пострадал от пожара: сгорели деревянная крыша, купола, иконостас, обгорели стены. Западная стена трапезной в южной половине и юго-западный угол колокольни получили повреждения, возможно связанные с просадками грунта. В процессе восстановительных работ в архитектуру храма были привнесены изменения, исказившие его первоначальный облик. Первоначально большие луковичные главы четверика храма были заменены малыми главками. Появилась высокая крыша над

трапезной, выполненная с применением подсечки в верхней трети ее высоты. С севера и юга

колокольня была обстроена небольшими одноэтажными помещениями, выполнявшими роль контрофорсов (рис. 5, 6).



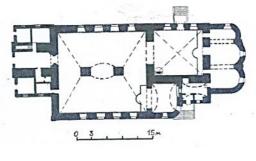


Рис. 4. Вид храма после завершения строительства трапезной: а – северный фасад, б – план храма

В «Путеводителе по Белгороду», вышедшему в 1911 г., автор И. Кулегаев в главе «Достопримечательности Белгорода и исторические памятники» сообщает: «При Успенско-Николаевском соборе, на углу церковной ограды изящная часовня, сооруженная в 1889 г. в память избавления Государя императора Александра III и его Августейшего Семейства от угрожавшей опасности при крушении поезда 17 октября 1887 г.» [4].



Рис. 5. Северный фасад Успенско-Николаевского собора. Фото 1911 г.



Рис. 6. Вид Успенско-Николаевского собора с юго-западной стороны. Фото 1911 г.

На фотографии, выполненной до 1917 г. (рис. 5), в северо-западном углу церковной ограды просматривается небольшой объем выше упомянутой часовни. Ограда представляла собой

высокий каменный забор с лежачими нишами по всему периметру, по ее углам были поставлены круглые башенки, завершенные восьмигранными куполами, с северной, юго-западной, и, возможно, восточной сторон были устроены ворота с массивными столбами, декорированными нишами экседрами (рис. 6).

В начале 30-х годов XX века собор был закрыт. С 40-х годов стал использоваться под хозяйственные нужды. В процессе эксплуатации и послевоенных разрушений собор претерпел значительные изменения. В связи с приспособлением здания к технологическому процессу хлебозавода были осуществлены значительные переделки интерьера: устроен плоский потолок в



помещении храма, прорублены широкие проемы в северной стене трапезной, изменены помещения алтарной части главного престола (заложен арочный проем, ведущий из храмового помещения в алтарную часть). Часть окон заложены. С северной, западной и южной сторон пристроены многочисленные помещения. Утрачены колокольня и завершение храма, искажены конструкции кровли алтарной части и трапезной (рис. 7). Полностью разрушена часовня и утрачено убранство интерьеров.



Рис. 7. Фасады храма до реставрации: а-северный фасад, фото 1986 г.; б-вид храма с юго-восточной стороны, фото 1997 г.

В 1986 году храм был взят под государственную охрану как памятник архитектуры регионального значения. В 1998 году передан Белгородской и Старооскольской епархии, в 1999 г. к празднику Пасхи вошел в состав Марфо-Мари-инского женского монастыря. Главный престол — в честь Успения Пресвятой Богородицы, южный престол — во имя Святителя Николая, архиепископа Мир Ликийского, Чудотворца, в трапезной, в северной ее части устроен алтарь во имя Святого Иоанна Крестителя.

С момента передачи храма Белгородской и Старооскольской епархии начались восстановительные работы, которые первоначально заключались в демонтажных работах, по разборке пристроенных к храму помещений и внутренних конструкций поздних перекрытий и перегородок. После завершения демонтажных работ были выполнены натурные исследования, в результате которых были выявлены два строительных периода храма – XVII и XIX вв., что подтверждалось устройством и глубиной заложения фундаментов четверика храма, апсид и колокольни, которые выполнены из обожженного кирпича и заложены на глубину около 2-х метров, в то время как фундаменты трапезной, возведенные на насыпном грунте, выложены из бутового камня и имеют неглубокое заложение около 50 см. Были обнаружены следы перекладки южной алтарной апсиды

четверика храма; также и анализ архитектурного решения трапезной показал, что фасадный декор более характерен для середины XIX века, чем для эпохи московского барокко.

В процессе реставрационных работ были выполнены первоочередные укрепительные работы, которые включили укрепление фундаментов трапезной с помощью бетонной обоймы, соединенной с бутовой кладкой арматурой, забитой в фундамент в шахматном порядке; выполнена обвязка стен трапезной, и арочного проема, растесанного в 1842 году, металлическими швеллерами; вертикальная обвязка столбов металлическими уголками горизонтальными металлическими полосами и сеткой; укреплены воздушные связи; восстановлена северная стена трапезной; выполнена вычинка разрушенного кирпича в кладке стен и фасадном декоре (рис. 8, 9). В процессе реставрации были восстановлены луковичные главы на четверике храма, восьмерик колокольни с луковичной главой и помещения, пристроенные к северному и южному фасадам колокольни.

В конце 2005 года были завершены реставрационные работы (авторский коллектив проектировщиков: арх. Колесникова Л.И. совместно с ОАО «Белпромпроект»; реставрационные работы выполнило ООО «Возрождение»).





Рис. 8. Реставрационные работы:

a – обвязка стен металлическими швеллерами; б – восстановленная северная стена трапезной. Фото 2005 г.



Рис. 9. Храм в процессе реставрации фасадов и колокольни. Фото 2005 г.

После завершения строительных реставрационных работ (рис. 11, 12) были выполнены новые иконостасы в четверике храма (престол в честь Успения Пресвятой Богородицы) и в трапезной – перед алтарем свт. Николая архиепископа Мир Ликийского (рис. 10, 13, 14), Чудотворца, храм наполнен убранством. В четверике храма над западною аркою возведены хоры, на которые можно подняться по винтовой лестнице.

Освящен собор 24 декабря 2005 г. Архиепископом Белгородским и Старооскольским Иоанном (рис. 10).

В состав Марфо-Мариинского женского монастыря, открытого в 1999 г., входят два бывших приходских храма: Успенско-Николаевский собор и Покровский храм, образующих церковный ансамбль XVII—XIX вв. Кроме этих храмов на территории монастыря имеется мемориальная часовня, два дома — для паломников и проживания монахинь, и хозяйственный корпус. Все строения обнесены общим высоким кирпичным забором. Территория Марфо-Мариинского женского монастыря вытянута с севера на юг вдоль ул. Пушкина, расположенная перпендикулярно к бульвару Святителя Иоасафа, являющимся продолжением Свято-Троицкого бульвара, замыкает бульвар с западной стороны (рис. 2, 15).



Рис. 10. Освящение храма Архиепископом Белгородским и Старооскольским Иоанном 24 декабря 2005 года



Рис. 11. Храм после реставрации. Вид храма со стороны алтарных апсид Фото 2007 г

В современной застройке города церковный ансамбль XVII—XIX вв. Марфо-Мариинского женского монастыря занимает видное место. Его архитектурно-культурная значимость определена не только стилевыми характеристиками обоих храмов, но и древностью Успенско-Николаевского собора начатого строительством в конце XVII века, история которого связана с именем Петра I, и всеми перипетиями последующих веков.



Рис 12. Храм после реставрации. Северный фасад. Фото 2007 г.







Рис. 13. Интерьеры храма: a — вид из северной половины трапезной на иконостас в четверике храма через арку, растесанную в 1842 г.;  $\delta$  — интерьер алтаря при четверике храма;  $\epsilon$  — интерьер северной половины трапезной залы







Рис. 14. Интерьеры храма: a — интерьер южной половины трапезной залы;  $\delta$  — иконостас перед алтарем во имя Святителя Николая, архиепископа Мир Ликийского, Чудотворца;  $\epsilon$  — вид на столбы, разделяющие трапезную на две части: северную и южную



Рис. 15. Общий вид Марфо-Мариинского монастыря

**Источник финансирования.** Программа развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Башилов И.Ф. Описание Курского наместничества вообще и порознь всякого города и уезда, с планами города и картами уезда. Курск, 1785.
- 2. Введенский Г. Успенско-Николаевский собор г. Белгорода, Смоленский собор г. Белгорода. // Сб. Белгородские святыни. Белгород, 1995.
- 3. Дренякин А.М. Белгород с уездом: Историко-статистический очерк. Харьков, 1882.
- 4. Кулегаев И.В. Путеводитель по Белгороду. Спутник приезжающего с планом города. Харьков, 1911.

- 5. Златоверховников Н.И. Памятники старины и Нового времени. Курск, 1902.
- 6. Покрышкин Н.П. Курской губ. г. Белгород. Успенско-Николаевский собор (1701-1709 гг.) и другие церкви, (извлечения из рапортов): // Сб. Белгородские святыни. Белгород, 1995.
- 7. Анатолий, архимандрит. Белгород и его святыни // В сб. Истоки, вып. І. Белгород, 1993.
- 8. Колесникова Л.И. Православные храмы Белгорода и Старого Оскола. Белгород, 2012.
- 9. Московское барокко, изящество стиля [Электронный ресурс] URL:

http://fb.ru/article/57727/moskovskoe-barokkoizyaschestvo-stilya / (дата обращения 5.05.2018).

- 10. Московское барокко [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BE%D0%B2%D1%81%D 0%BA%D0%BE%D0%B5\_%D0%B1%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%BA%D0%BA%D0%BE (дата обращения 7.05.2018).
- 11. Архитектура России 18 века [Электронный ресурс] URL: http://totalarch.ru/art\_history/18th\_century/russia/ar chitecture (дата обращения 10.05.2018).

#### Информация об авторах

**Колесникова Людмила Ильинична**, Заслуженный архитектор РФ, профессор кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: architektura\_bgty@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

**Цветкова Юлия Павловна**, магистрант кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: architektura\_bgty@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

Поступила в октябре 2018 г. © Колесникова Л.И., Цветкова Ю.П., 2019

## <sup>1,\*</sup>Kolesnikova L.I., <sup>1</sup>Tsvetkova Y.P.

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, St. Kostyukova, 46 \*E-mail: architektura bgty@mail.ru

# ANCIENT ARCHITECTURAL MONUMENT OF BELGOROD «USPENSKO-NICHOLAS CATHEDRAL" 1692–1703, – FIRST HALF OF THE XIX

**Abstract.** This article highlights the history of construction the most ancient in the Belgorod region Russian Orthodox Uspensko-Nicholas Cathedral, which has survived to the present day. Bibliographic information relating to the history and time of church construction, erected in the era of Moscow baroque — a new style in the architecture of Moscow region of the late XVII — early XVIII centuries, is given. This style is characterized by consistency in the mass ratio, the pomp of white-stone decor, in which the ornamental and order elements of Western European baroque — cartouches, "torn" pediments, columns and pilasters with plant capitals — are peculiarly interpreted.

The location of the Cathedral is described. It is built in the former residential settlement Zhiloy, located to the west of Belgorod, constructed according to the general plan of 1768 by architect A.V. Kvasov after the fire of 1766. In addition, the modern urban situation of the cathedral's location in the structure of modern urban development is presented. Historical planning frame is considered.

The space-planning and space-spatial solution of the cathedral church in historical chronology, as well as constructive solutions of the cathedral's octagon on cube, bell tower and two-column refectory, built in the first half of the XIX century, the decorative design of the facades and interiors are analyzed.

The main construction stages of the church from its creation to the restoration works carried out in 2005 are considered. Strengthening and restoration on the preservation of cultural heritage are described. Cartographic material, plans building at different construction stages, archival and modern photographs of the exteriors and interiors, both during and after the restoration process, are given.

**Keywords:** church, cathedral, volume, planning, restoration, facade, dome, frieze, apse, octagon on cube, bell tower, tent.

#### REFERENCES

1. Bashilov I.F. Description of the Kursk governorship in general and separately of every city and county, with plans of the city and maps of the county. Kursk, 1785.

- 2. Vvedensky G. Uspensky-Nicholas Cathedral of Belgorod, Smolensk Cathedral of Belgorod. Sat. Belgorod shrines. Belgorod, 1995.
- 3. Drenyakin A.M. Belgorod with the county: Istoriko-statistical essay. Kharkov, 1882.
- 4. Kolegaev I.V. Guide to Belgorod. Satellite coming with a plan of the city. Kharkov, 1911.
- 5. Zlatoverkhovnikov N.I. Monuments of antiquity and New time. Kursk, 1902.
- 6. Pokryshkin N.P. Kursk Province Bel-city. Uspensky Nicholas Cathedral (1701-1709) and other churches (extracts from pa-ports): Coll. Belgorod shrines. Belgo-Rod, 1995.
- 7. Anatoly, Archimandrite. Belgorod and its shrines. In Sat. Sources, vyp. I. Belgorod, 1993.
- 8. Kolesnikova L.I. Orthodox temples of Belgorod and Stary Oskol. Belgorod, 2012.

- 9. Moscow baroque, elegance of style [Electronic resource] URL: http://fb.ru/article/57727/moskovskoe-barokko-izyaschestvo-stilya / (circulation date 05/05/2018).
- 10. Moscow Baroque [Electronic resource] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D1%81%D0%BA%D08e%D0%B2%D1%81 % D0% BA% D0%BE% D0% B5\_% D0% B1% D0% B0% D1% 80%D0% BE% D0% BA% D0% BA% D0% BE (circulation date 07/05/2018).
- 11. Architecture of Russia of the 18th century [Electronic resource] URL: http://to-talarch.ru/art\_history/18th\_century/russia/architecture (circulation date 05/05/2018).

#### Information about the authors

**Kolesnikova, Lyudmila I.** Professor. E-mail: architektura\_bgty@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, St. Kostyukova, 46.

**Tsvetkova**, **Julia P.** Master student. E-mail: architektura\_bgty@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, St. Kostyukova, 46.

Received in October 2018

#### Для цитирования:

Колесникова Л.И., Цветкова Ю.П. Древний белгородский памятник архитектуры «Успенско-Николаевский собор», 1692–1703 годов, – первой половины XIX века // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 59–68. DOI: 10.34031/article 5ca1f631dd9ac4.78538855

#### For citation:

Kolesnikova L.I., Tsvetkova Y.P. Ancient architectural monument of Belgorod «Uspensko-Nicholas cathedral» 1692–1703, – first half of the XIX. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 59–69. DOI: 10.34031/article 5ca1f631dd9ac4.78538855

DOI: 10.34031/article\_5ca1f632425466.42246350
<sup>1,\*</sup>Уморина Ж.Э.

<sup>1</sup>Уральский государственный архитектурно-художественный университет Россия, 620075, г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, д. 23 \*E-mail: umorina87@yandex.ru

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БИОНИЧЕСКОЙ АРХИТЕКТУРЫ

Аннотация. Благодаря развитию научно-технического прогресса в архитектуре возникло и активно развивается новое явление — бионическая архитектура. Основываясь на уже созданных методиках проектирования в рамках «зеленых стандартов», бионическая архитектура способствует улучшению экологического баланса окружающей среды и сохранению природных ресурсов. Использование новейших технологий строительства, формообразования, проектирования, альтернативных источников энергии позволило сформировать этот инновационный стиль, который по сути своей является ветвью развития экологического подхода. В статье раскрыты основные достижения в области применения технических устройств повышения эффективности применения ресурсов в объектах архитектуры и их влияние на формообразование.

**Ключевые слова:** бионическая архитектура, инженерное оборудование, экология, форма, комфорт.

Введение. Зодчие разных периодов – от момента возникновения потребности в строительстве жилища до наших дней – черпали свое вдохновение у природы, пытаясь повторить и применить формы ее объектов в своих творениях. Однако этот процесс претерпел ряд трансформаций на пути своего развития, что привело к современным тенденциям в архитектуре, которые можно обозначить как бионическая архитектура – инновационный стиль, основанный на экологическом подходе и новейших технологиях и строительных материалах. Суть его заключается в глубоком анализе внутренних процессов природы, в применении принципов живого в «рукотворных» технологиях, в создании архитектуры человека как логического довершения архитектуры окружающей среды; в преодолении конфликта природы и человека, организации внешней гармонии путем гармонизации внутренней составляющей [1, с. 355]. Конечным результатом ставиться создание экологического здания с максимально замкнутой экосистемой.

В настоящий моменет тема бионической архитектуры с применением новейших технологий может считаться изученной лишь частично, поскольку появление перспективных разработак и экспериментов в данной области только набирает обороты. Теоретической основой исследования проблемы образования нового стиля «Бионическая архитектура» послужили научные работы, в которых рассмотрены её отдельные аспекты:

— литература, раскрывающая исторический аспект формирования бионической архитектуры: Бассегода Н.Х., Зинченко С.А., Марков Д.И., Колясников В.А., Сапрыкина Н.А., Мартека В., Маркузон В.Ф. и др.;

- литература, в которой исследуются принципы стилеобразования в архитектуре: Асташенков П.Т., Горский Д.П., Лебедев Ю.С., Литинецкий И.Б., Мартека В., Молчанов В.М. и др.;
- источники, содержащие описание современных достижений в архитектуре и строительной индустрии (в области разработки и применения строительных материалов и технологий): Белюченко И.М., Варежкин В.А., Волкотруб И.Т., Гийо Агнес, Ермолов В.В., Иовлев В.И., Крайзмер Л.П. Селезнев В.П., Пономарев В.А., Табунщиков Ю.А., Фадеева М., Bloom Р. и др.

В результате их анализа получены следующие выводы:

- к настоящему моменту накоплен огромный эмпирический материал по разработке проектов уникальных архитектурных объектов, обладающих набором особенностей, позволяющих выделить их в одну группу, детальное изучение которой позволит доказать формирование нового архитектурного стиля на рубеже XX–XXI вв.;
- в современной архитектуре явно просматривается влияние экологического подхода, под воздействием которого происходит развитие новых и трансформация существующих направлений (в том числе под воздействием научно-технического прогресса);
- существует множество работ, посвященных бионическому формообразованию, но не изучен вопрос его влияния на развитие в архитектуре новых стилей и направлений;
- нет оценочной шкалы (критериев, системы оценки), позволяющей классифицировать здания и сооружения, выполненные с учетом требований «зеленых» стандартов, Green-BIM-технологий, бионического формообразования, экологического подхода, как отдельный стиль

или стилевое направление при существовании значительного количества осуществленных объектов;

- существует противоречие в оценке эффективности объектов бионической архитектуры с экономической точки зрения, требующее тщательного изучения;
- бионическая архитектура не выведена на уровень самостоятельного архитектурного стиля (трактуется как ветвь различных стилей), вследствие чего не изучен вопрос возникновения предпосылок ее формирования и развития [2, с 36].

Основная часть. Без научных основ экологии и климатологии сегодня невообразимо создать полноценный эко-комплекс, гармонично сочетающий внешнюю форму (оболочку) с внутренним строением (строительные материалы и конструкции, инженерное оборудование, функциональное зонирование). В этом направлении уже сделаны существенные шаги:

- энергоэффективный дом (Energy Efficient Building): потребление энергии из централизованных источников низкое или нулевое; объект может быть оснащен устройствами, вырабатывающими энергию;
- умный дом (Intellectual Building): автоматизация управления и оптимизация использования ресурсов;

- пассивный дом (Passive Building): естественный теплообмен, фактическое отсутствие отопление, использование энергосберегающих материалов и систем;
- здоровый дом (Healthy Building): применение природного материала, системы активных очисток отработанных ресурсов;
- биоклиматическая архитектура (Bioclimatic Architecture): применение технологий, обеспечивающих комфортные условия с учетом климатических особенностей региона.

Все перечисленные виды разработки экозданий напрямую связаны с развитием научно-технического прогресса и активным применением современных технологий, направленных на повышение комфорта в помещениях и сохранение природного баланса. Рассмотрим их особенности более подробно.

Энергоэффективный дом представляет собой сооружение, в котором энергопотребдение снижено до минимума, а энергопотери отсутствуют. Яркими примерами таких зданий являются: проект семейного дома ZEB Pilot House (бюро Снехетта, Норвегия), дома Heliotrope в Германии (архитектор Ральф Диша), Саппоп beach residence, штат Орегон (архитектурное бюро Nathan Good Architects) и т.д. (рис. 1).

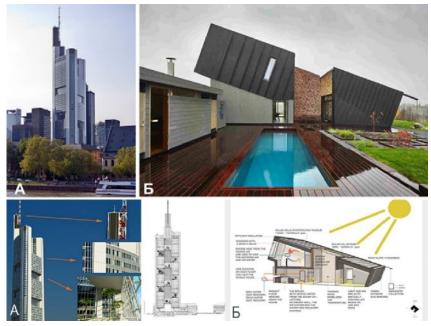


Рис. 1. А) Энергоэффективное здание «Commerzbank», Франкфурт-на-Майне, Германия [8]; Б) проект семейного дома ZEB Pilot House, Норвегия (разработчики: бюро Снехетта) [9]

Этот метод основан на применении строительных материалов и конструкций, позволяющих сократить теплопотери. Характерным элементом при таком подходе также становятся всевозможные солнечные батареи, ветрогенераторы и др. устройства, позволяющие получить энер-

гию из альтернативных источников. Стоит отметить, что прямого влияния на формообразование объекта эти материалы и устройства не оказывают, за исключением вопроса размещения элементов сбора и трансформации энергии в соответствии с климатическими особенностями района строительства.

Умный дом — это гибкая приспособляемая инженерная система, состоящая из датчиков контроля и реагирования, пульта управления и связей между ними. Данная концепция предполагает новый подход к организации жизнеобеспечения здания, направленный на повышение эффективности использования функциональных про-

странств и ресурсов [3, с 23]. Примеров применения этого метода в архитектуре довольно много: дом Трон – дом японского профессора Кена Сакамуры в Токио, дом Била Гейтса в Вашингтоне (рис. 2). Однако особого влияния на форму объекта данная система не оказывает, т.к. довольно легко приспосабливается к различным конфигурациям.



Рис. 2. «Умный дом» Била Гейтса в Вашингтоне, интеллектуальные системы управления зданием [10]

Пассивным домом принято называть объект, у которого отсутствует необходимость в устройстве традиционной системы отопления (энергосберегающий дом). Основу этой концепции составляют принципы: компактности, ориентации по сторонам света, тщательного подхода к утеплению ограждающих конструкций, а также избегание возникновения мостиков холода. Примерами известных домов, построенных по принципу пассивного энергосбережения, являются: Есопо-Ноизе в Финляндии, «Башня жемчужной реки» в Гуанчжоу и др. (рис. 3). В данном случае влияние подхода на форму объекта весьма значительно, поскольку расход тепла напрямую связан с геометрией й форм и их размерами. Геометрия

форм должна учитывать направление воздушных потоков, и если здание оборудовано ветро-генераторами как в «Башня жемчужной реки» в Гуанчжоу, их располагают перпендикулярно ветропотокам. Есопо-Ноиѕе в Финляндии в своей конструкции имеет компактность, ориентацию по сторонам света, тщательный подход к утеплению ограждающих конструкций, а также избегание возникновения мостиков холода, за счет чего отпадает необходимость в отоплении. Главный фасад общественных зданий ориентируют на максимально освещенную сторону света для естественного нагрева помещений и используют двойные утепленные фасады.

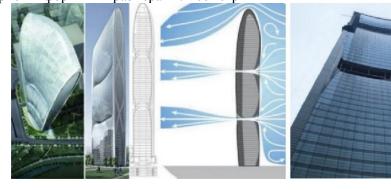


Рис. 3. Гуанчжоу, «Башня жемчужной реки» [11]

Здоровый дом — это инновационный подход к проектированию и строительству, основывающийся на здоровом образе жизни. «Здоровый дом рассматривает среду обитания в качестве актива, который может максимально увеличить человеческий потенциал, и стремится создать

среду, которая побуждает нас жить лучше, культивируя здоровый образ жизни, и помогает предотвратить проблемы со здоровьем» [4]. Например, проект дома Джека Хенстрайджа, в котором применен способ строительства «поленница» и «зеленая кровля» (рис. 4).



Рис. 4. Дома-полленницы (технология - cordwoodmasonry или earthwood): A) офис студии звукозаписи Ханса Либерга (Hans Liberg) [12]; Б) дома Джека Хенстрайджа (Henstridge House) [13]

Биоклиматическая архитектура является особой методикой проектирования, основанной на особенностях климата региона строительства. Она имеет довольно глубокие корни зарождения, огромное количество уникальных образцов, богатый спектр подходов в зависимости от природных условий, но обладает (и всегда обладала) це-

лью создания комфортного микроклимата жилища (объекта) с минимальным использованием энергии. Яркими примерами биоклиматической архитектуры современности являются: «Городские ворота Дюссельдорфа», многоэтажное жилое здание с низким энергопотреблением в Берлине (Assmann, Solomon, Scheidt), здание Helikon Building в Лондоне (Sheppard Robson) (рис. 5).



Рис. 5. А) Городские ворота Дюссельдорфа [14]; Б) многоэтажное жилое здание с низким энергопотреблением в Берлине, архитекторы Assmann, Solomon и Scheidt [15]; В) здание китайско-итальянского научно-исследовательского центра энергоэффективности на территории Университета Цинхуа в Пекине, Китай [16, 17]

На сегодняшний день разработка обозначенных инженерных и конструктивных систем, позволяющих создавать здания с системой самообеспечения, является одним из актуальных вопросов в теории и практике архитектуры. К настоящему моменту уже разработано множе-

ство систем автономного энергообеспечения: генераторы волн, генераторы глубинных подводных течений, генераторы на солнечных батареях, генераторы энергии ветра, генераторы тепловой энергии Земли, устройства переработки отходов с выработкой энергии и т.д. (рис. 6).



Рис. 6. А) генератор энергии воды (волн) [18]; Б) интегрированные в черепицу солнечные батареи, Techtile [19]; В) генераторы энергии глубинных подводных течений [20]; Г) генераторы энергии ветра [21]

Такие разработки почти всегда сочетаются с бионическим формообразованием как оболочки, так и конструкции сооружения, что направлено на обеспечение абсолютной гармонизации с окружающей средой. Архитектурная бионика также продолжает развиваться как отдельный метод. При этом отсутствует устоявшаяся методика применения выше указанных способов в различных сочетаниях в процессе проектирования экологических зданий. За относительно короткий срок накоплен огромный эмпирический материал, требующий систематизации, упорядочивания, выстраивания в некий алгоритм, что и позволит, в конечном счете, приблизится к созданию инновационной методики проектирования - бионической архитектуре.

Бионическая архитектура – не просто внешняя, причудливая форма грациозных кривых, отсылающих зрителей к пейзажам живой природы. Это целый комплекс инновационных разработок организации жизненного пространства человека, основанный на методах автономного энергообеспечения, применении природных технологий, технологий очистки окружающей среды и переработки вторичного сырья, использование экологически-чистых строительных материалов и бионических конструкций. Бионическая архитектура объединила точную науку с чувственным искусством, абстрактное и рациональное, природу естественного мира и мира человека, синтезировал законы строгого с доводами эстетичного. Примеры проектных разработок таких объектов уже существуют (рис. 7).

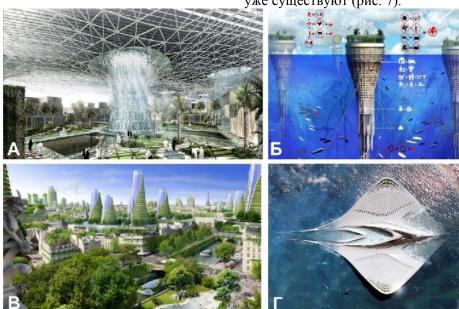


Рис. 7. А) Масдар, проект будущего эко-города в Абу-Даби [22]; Б) водоскреб [23]; В) проект озеленения Парижа [24]; Г) Плавучее поселение Франция [25]

Стоит отметить, что в области разработки технических устройств и строительных конструкций также произошли изменения, связанные с решением вопроса их применения в биоморфных объектах. Рассмотрим несколько примеров.

Жидкие солнечные нанобатареи можно смело считать важным достижением в решении

вопроса сочетания бионического формообразования и экотехнологий (рис.8, А). Они могут покрывать весь открытый солнцу фасад здания любой конфигурации благодаря своей пластичности, что позволит получить максимальное количество энергии. Однако исследования в этой области еще не окончены [5].





Рис. 8 А) Жидкие солнечные нанобатареи [26]; Б) Солнечные воздушные шары [27]

Интересной альтернативой для уже примелькавшихся солнечных батарей стала разработка Р. Ламкина «Солнечные воздушные шары», представляющая довольно простое и недорогое устройство (рис. 8, Б). Такое оборудование способно увеличить генерацию электроэнергии в 400 раз больше чем традиционные солнечные панели [6].

Помимо решения проблемы сбережения ресурсов в виде источников энергии, ученые сосредоточили свои силы на разработке новых конструктивных систем, обладающих большей прочностью и способных перекрывать большие площади, но при этом при возведении которых про-

исходило бы значительное снижение расхода материалов. Источником вдохновения вновь стала природа (рис. 9).

Технологические разработки на основе биологических конструкций (паутина, соты, муравейник) активно используются в наше время. К примеру, применение стальной паутины в гипербалоидах Шухова, применение конструкции сот в проекте жилого дома на Багамах, проект биоклиматического небоскреба для Рио-де-Жанейро (Термитник) демонстрирует применение такой конструкции как муравейник. Эти примеры обладают уникальными механическими свойствами: их легкость граничит с невероятными прочност-



Рис. 9. А) муравейник [28]; Б) гиперболоид Шухова [29]; В) висячее сетчатое покрытие Шухова (овальное здание) [30]; Г) жилой дом на Багамах [31]

Заключение. На рубеже XX–XXI вв. можно наблюдать активный синтез разрозненных методов экологического подхода в области повышения комфорта и экологичности городской среды. Данный междисциплинарный диалог можно рассматривать как предвестник рождения нового глобального архитектурного стиля, формирование которого уже началось. Это можно наблюдать при анализе создаваемых проектных решений объектов различного функционального назначения, объединенных общей идеологической линией. Подобно футуристическим проектам прошлых лет они опираются на новейшие инженерно-технические разработки, а также можно проследить связь с предыдущими находками в этой области. Так, к примеру, в проекте эко-города Масдар отчетливо просматривается сетчатое покрытие овального здания инженера Шухова, а в плавучем поселении Франция использовано давно известное нам оболочковое покрытие со стальной мембраной и вантовым хребтом применяемое на велотреках и стадионах, например, в Крылатовске. Используя новые разработки в области энергосбережения и аккумуляции природных ресурсов с уже известными нам приемами бионического формообразования можно создавать здания нового уровня, обеспечивающего человечеству возможность не только пережить экологические катастрофы, но и избежать их.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Морелли Э.Г. Кодекс природы или Истинный дух ее законов / перевод с французского М.Е. Ландау. М.-Л.: изд-во Академии наук СССР, 1956. 304 с.
- 2. Уморина Ж.Э. Бионическая архитектура как уникальное явление XX–XXI вв. Приволжский научный журнал. Декабрь 2017. №4. С.36-43.
- 3. Витюк Е.Ю. В поисках идеального города. Екатеринбург: Архитектон, 2015. 156 с.
- 4. Здоровый дом: пространство, которое способствует здоровью и благополучию [Электронный источник]. Эконет.ру. URL: http://econet.ru/articles/142191-zdorovyy-dom-prostranstvo-kotoroe-sposobstvuet-zdorovyu-i-blagopoluchiyu
- 5. Ученые разработали жидкие солнечные батареи [Электронный источник] // Word Science. URL: http://wordscience.org/
- 6. Солнечные воздушные шары генерируют в 400 раз больше энергии, чем традиционные панели [Электронный источник] // Робовид.ру. URL: http://rodovid.me/solar\_power/solnechnye-vozdushnye-shary.html

- 7. Виноградова Т.П., Авдеев С.Н. Код Шухова Нижний Новгород: Покровка. 7. 2013. 144 с.
- 8. Энергоэффективное здание «Commerzbank», Франкфурт-на-Майне, Германия [источник: https://www.abok.ru/for\_spec/articles.php?nid=285
- 9. Проект семейного дома ZEB Pilot House, Норвегия (разработчики: бюро Снехетта) [Электронный источник] URL: http://shkolaremonta.info/topics/samyeenergoeffektivnye-doma-v-mire/
- 10.«Умный дом» Била Гейтса в Вашингтоне [Электронный источник] URL: http://compuzilla.ru/umnye-doma/
- 11.Гуанчжоу, «Башня жемчужной реки» [Электронный источник] URL: http://ecofriendly.ru/bashnya-zhemchuzhnaya-reka-nulevoi-neboskreb-v-kitae
- 12.Дома-полленницы (технология cordwoodmasonry или earthwood): А) офис студии звукозаписи Ханса Либерга (Hans Liberg) [Электронный источник] URL: http://tehne.com/event/koncepty/offis-polennica
- 13.Дома Джека Хенстрайджа (Henstridge House) [Электронный источник] URL: http://www.mensh.ru/henstridge house
- 14.Городские ворота Дюссельдорфа [Электронный источник]. URL: http://img-fotki.yandex.ru/get/3406/264922533.1/0\_135a5c\_41ce8199\_XL.jpg
- 15.Многоэтажное жилое здание с низким энергопотреблением в Берлине, архитекторы Assmann, Solomon и Scheidt [Электронный источник] URL: https://www.abok.ru/for\_spec/articles.php?nid=318
- 16.Здание китайско-итальянского научноисследовательского центра энергоэффективности на территории Университета Цинхуа в Пекине, Китай [Электронный источник]. URL: https://hvoya.wordpress.com/2013/06/17/sieeb/
- 17.Здание китайско-итальянского научноисследовательского центра энергоэффективности на территории Университета Цинхуа в Пекине, Китай [[Электронный источник]. URL: https://hvoya.wordpress.com/2013/06/17/sieeb/
- 18.Генератор энергии воды (волн) [Электронный источник]. URL: https://www.theengineer.co.uk/issues/sept-2012-online/engineering-opportunities-in-the-marine-renewables-sector/
- 19.Интегрированные в черепицу солнечные батареи, Techtile [Электронный источник]. URL: http://rodovid.me/eco\_friendly\_product\_design/techtile-cherepica-kotoraya-mozhet-generirovat-energiyu-iz-vozobnovlyaemyh-istochnikov.html

- 20.Генераторы энергии глубинных подводных течений [Электронный источник]. URL: http://futuristicnews.com/underwater-turbine-tested-successfully-in-scotland/
- 21.Генераторы энергии ветра [Электронный источник]. URL: http://www.mnn.com/greentech/research-innovations/blogs/japanese-break-through-will-make-wind-power-cheaper-than
- 22. Масдар, проект будущего эко-города в Абу-Даби; [Электронный источник]. URL: https://you-journal.ru/life/interesting/10-gorodov-budushhego-kotorye-budut-postroeny-v-blizhajshie-15-let
- 23.Водоскреб; [Электронный источник] URL: http://animalworld.com.ua/news/Water-Scraper
- 24.Проект озеленения Парижа [Электронный источник]. URL: http://prohitech.ru/futuristicheskij-parizh-smart-city-so-svoej-novoj-kontseptsiej-umnogo-goroda-2050

- 25.Плавучее поселение Франция [Электронный источник]. URL: https://you-journal.ru/life/interesting/10-gorodov-budushhego-kotorye-budut-postroeny-v-blizhajshie-15-let
- 26.Жидкие солнечные нанобатареи [Электронный источник]. URL: http://www.sheltonproductions.com/doublet2/images/solar/grids/curved%20roof%20grid.jpg
- 27.Солнечные воздушные шары [Электронный источник]. URL: http://rodovid.me/solar power/solnechnye-vozdushnye-shary.html
- 28.Муравейник [Электронный источник] URL: http://archinews.ru/termitnik-mnogofunktsionalnyiy-kompleks/
- 29.Гиперболоид Шухова [Электронный источник]. URL: http://russos.livejournal.com/1102231.html
- 30.Жилой дом на Багамах [Электронный источник]. URL: http://astid.ru/honeycomb/

#### Информация об авторах

**Уморина Жанна** Эдуардовна, аспирант кафедры архитектуры, старший преподаватель кафедры основ архитектурного проектирования. E-mail: umorina87@yandex.ru. Уральский государственный архитектурно-художественный университет. Россия, 620075, г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, д. 23.

Поступила в ноябре 2018 г. © Уморина Ж.Э., 2019

### 1,\*Umorina J.E.

<sup>1</sup>Ural state University Architectural and Art Russia, 620075, Ekaterinburg, Karla Libknekhta, 23 \*E-mail: umorina87@yandex.ru

### TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE BIONIC ARCHITECTURE

Abstract. The development of scientific and technological progress in architecture gave the rise to a new phenomenon – the bionic architecture. Bionic architecture is based on already established methods of design in the framework of the "green standards"; it contributes to the improvement of the ecological balance of the environment and preservation of natural resources. The use of new technologies of construction, fabrication, design, alternative energy sources allowed to create this innovative style, which is essentially a branch of the ecological approach. The article reveals main achievements in the field of application of technical devices to increase the efficiency of resource use in architectural objects and their impact on morphogenesis.

Keywords: bionic architecture, engineering, ecology, form, comfort.

#### REFERENCES

- 1. Morelli E.G. The Code of Nature or the True Spirit of its Laws. Translation from French ME. Landau. M.-L.: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1956, 304 p.
- 2. Umorina J.E. Bionic architecture tour as a unique phenomenon of the XX–XXI centuries. Volga scientific journal. December, 2017, no. 4, pp. 36–43.
- 3. Vityuk E.Yu. In search of the perfect city. Ekaterinburg: Architecton, 2015, 156 p.
- 4. Healthy home: a space that contributes to health and well-being [Electronic source].

- Ekonet.ru. URL: http://econet.ru/articles/142191-zdorovyy-dom-prostranstvo-kotoroe-sposobstvuet-zdorovyu-i-blagopoluchiyu
- 5. Scientists have developed liquid solar cells [Electronic source]. Word Sci-ence. URL: http://wordscience.org/
- 6. Solar balloons generate 400 times more energy than traditional panels [Electronic source] // Robovid.ru. URL: http://rodovid.me/solar power/solnechnye-vozdushnye-shary.html
- 7. Vinogradova T.P., Avdeev S.N., Shukhov Code, Nizhny Novgorod: Pokrovka, 7, 2013. 144 p.
- 8. Energy-efficient building "Commerzbank", Frankfurt am Main, Germany [source:

https://www.abok.ru/for\_spec/articles.php?nid=2856]

- 9. Family house project ZEB Pilot House, Norway (developers: Sne-hetta bureau) [Electronic source]. URL: http://shkolaremonta.info/topics/samye-energoeffektivnye-doma-v-mire/
- 10. "Smart Home" by Bill Gates in Washington [Electronic source] URL: http://compuzilla.ru/umnye-doma/
- 11. Guangzhou, "The Pearl River Tower" [Electronic source]. URL: http://ecofriendly.ru/bashnyazhemchuzhnaya-reka-nulevoi-neboskreb-v-kitae
- 12. House pollennitsy (technology cordwood-masonry or earthwood): A) Office of the recording studio Hans Liberg (Hans Liberg) [Electronic source]. URL: http://tehne.com/event/koncepty/ofis-polennica
- 13. Houses of Jack Henstrange (Henstridge House) [Electronic source]. URL: http://www.mensh.ru/henstridge house
- 14. City gate of Dusseldorf [Electronic source]. URL: http://img-fotki.yan-dex.ru/get/3406/264922533.1/0\_135a5c\_41ce8199\_XL.jpg
- 15. Multi-storey low-power residential building in Berlin, architects Assmann, Solomon and Scheidt [Electronic source]. URL: https://www.abok.ru/for\_spec/articles.php?nid=3189
- 16. Building of the Chinese-Italian Research and Development Center for Energy Efficiency on the territory of Qing-Hua University in Beijing, China [Electronic source]. URL: https://hvoya.word-press.com/2013/06/17/sieeb/
- 17. Building of the Chinese-Italian Energy Efficiency Research Center on the territory of Qing-hua University in Beijing, China [[Electronic source]. URL: https://hvoya.wordpress.com/2013/06/17/sieeb/
- 18. Water (wave) power generator [Electronic source]. URL: https://www.theengineer.co.uk/issues/sept-2012-online/engineering-opportunities-in-the-marine-renewables-sector /

- 19. Tile-integrated solar panels, Techtile [Electronic source]. URL: http://rodovid.me/eco\_friendly\_product\_design/techtile-cherepica-kotoraya-mozhet-generirovat-energiyu-iz-vozobnovlyaemyh-istochnikov.html
- 20. Energy generators of submerged underwater flows [Electronic source]. URL: http://futuristic-news.com/underwater-turbine-tested-successfully-in-scotland/
- 21. Wind power generators [Electronic source]. URL: http://www.mnn.com/green-tech/research-innovations/blogs/japanese-breakthrough-will-make-wind-power-cheaper-than
- 22. Masdar, a future eco-city project in Abu Dhabi; [Electronic source] URL: https://you-journal.ru/life/interesting/10-gorodov-budushhego-ko-torye-budut-postroeny-v-blizhajshie-15-let
- 23. Drain tower; [Electronic source]. URL: http://animalworld.com.ua/news/Water-Scraper
- 24. Paris landscaping project [Electronic source]. URL: http://prohitech.ru/futuristicheskij-parizh-smart-city-so-svoej-novoj-kontseptsiej-umnogo-goroda-2050
- 25. Floating settlement France [Electronic source]. URL: https://you-journal.ru/life/interesting/10-gorodov-budushhego-kotorye-budut-postro-eny-v-blizhajshie-15-let
- 26. Liquid solar nano batteries [Electronic source]. URL: http://www.sheltonproductions.com/doublet2/images/solar/grids/curved%20roof%20grid.jpg
- 27. Solar balloons [Electronic source] URL: http://rodovid.me/solar\_power/solnechnye-vozdushnye-shary.html
- 28. Anthill. URL: http://archinews.ru/termitnik-mnogofunktsionalnyiy-kompleks/
- 29. Hyperboloid Shukhov. URL: http://russos.livejournal.com/1102231.html
- 30. Residential building in the Bahamas [Electronic source]. URL: http://astid.ru/honeycomb/

Information about the authors

**Umorina, Zhanna E.** Postgraduate student. E-mail: umorina87@yandex.ru. Ural state architectural-art University. Russia, 620075, Ekaterinburg, Karla Libknekhta, 23.

Received in November 2018

### Для цитирования:

Уморина Ж.Э. Технологические особенности бионической архитектуры // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 69–77. DOI: 10.34031/article\_5ca1f632425466.42246350

### For citation:

Umorina J.E. Technological features of the bionic architecture. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 69–77. DOI: 10.34031/article\_5ca1f632425466.42246350

DOI: 10.34031/article\_5ca1f632ae2477.55675663

1,\*Пермякова А.А., <sup>1</sup>Авилова И.П., <sup>1</sup>Даниленко Е.П., <sup>1</sup>Стрекозова Л.В. <sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46 \*E-mail: permakova.aa@bstu.ru

### АНАЛИЗ КОМПЛЕКСНОГО ИНВЕСТИЦИОННОГО ПЛАНА МОДЕРНИЗАЦИИ МОНОГОРОДОВ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ТОЛЬЯТТИ

Аннотация. Исследование обусловлено остротой и масштабностью проблем монопрофильных муниципальных образований. Моногорода являются «слабым местом» России. В таких муниципальных образованиях явно выражена зависимость населенного пункта от градообразующего предприятия, что вызывает обоснованные опасения в условиях экономического кризиса, в котором уже долгое время пребывает Российская Федерация. Население моногородов может остаться без рабочих мест и заработных плат, городской бюджет потеряет денежную составляющую от налогов градообразующего предприятия. В такой ситуации может начаться отток населения, город теряет свою социальную привлекательность и может в конечном итоге перестать существовать как муниципальное образование. Комплексный инвестиционный план – это основной инструмент государственной финансовой поддержи комплексного развития моногородов, который направлен на устранение зависимости монопрофильного образования от градообразующего предприятия, улучшение социальноэкономического состояния города, благоустройство и обретение инвестиционной привлекательности муниципального образования. В статье рассматриваются проблемы пространственного развития территории монопрофильного города Тольятти с учётом социально-экономической направленности. Производится поиск решения градостроительного использования территории города на основе комплексного инвестиционного плана модернизации. Приводится оценка предшествующего состояния территориальной единицы, процесс реализации комплексного инвестиционного плана модернизации и прогноз постреализационного состояния города.

**Ключевые слова:** моногород, общественное пространство, территориальное планирование, градообразующее предприятие, «умный город».

Введение. Моногород — это город (посёлок), где существует очень тесная связь между функционированием крупного предприятия и экономико-социальной сферами жизни самого поселения. Рыночные перспективы предприятия существенно влияют на судьбу этого поселения как такового. В научной практике существуют две трактовки понятия «моногород». В советской геоурбанистике был применим общий термин «монофункциональные города». Они выполняли только одну функцию – производственную, научную, образовательную, административную, селитебную (жилую).

В настоящее время под моногородами, как правило, подразумеваются «монопрофильные города», в которых один вид деятельности преобладает над другими. Главным элементом будет выступать градообразующее предприятие – крупнейший производитель промышленной продукции, основной работодатель и бюджетообразующий субъект. Далее на примере моногорода Тольятти будут рассмотрены основные проблемы социально-экономической направленности, потенциальные риски городов, имеющих данный статус, а также пути решения, позволяющие городу освободиться от монозависимости [1, 2].

Актуальность данной работы представлена тем, что в России, согласно последним данным списков Правительства Российской Федерации, насчитывается порядка 319 моногородов, каждый из которых в силу причин ускоренного развития какой-либо отрасли и одновременного освоения пространства путём строительства не способны справиться с проблемами, присущими моногородам: ухудшение ситуации на рынке труда, сокращение доходов населения, снижение доходной части бюджета, маргинализацию населения из-за ухудшения социальной ситуации в городе. Кроме того, существенным является факт того, что моногорода имеют важное территориальное положение: в Западной Сибири расположен нефтегазовый сектор, на юге Западной Сибири – добыча угля, на юге Восточной Сибири - горнодобывающая промышленность, цветная металлургия, на Урале – чёрная и цветная металлургия, машиностроение, в Поволжье – нефтехимия, химия, машиностроение, добыча нефти, на севере Европейской части России занимаются лесопереработкой и цветной металлургией. Из вышесказанного следует, что развитие моногородов для государства является не последней задачей, в виду расположения на важных богатыми ресурсами территориях [3].

Методология. В рамках данной работы был использован теоретический метод исследования, а именно, метод анализа, посредством материалов, взятых из разных источников информации. Полный список использованной литературы представлен в библиографических ссылках.

Основная часть. Город Тольятти – город России в Самарской области областного назначения. По состоянию на 2018 год населенный пункт имеет статус моногорода, являясь крупнейшей территориальной единицей, имеющий вышеуказанный статус в стране [4].

Свой статус город получил в связи со сложной социально-экономической ситуацией, в которой он оказался из-за кризиса в российском автомобилестроении в 2000—2010-х годах и масштабных сокращений на АвтоВАЗе. Как следствием стало увеличение числа безработных в городе в 3 раза (за 2014—2015 годы), миграционный отток населения составил 7,2 тысячи человек только за 2015 год, и ещё 31 % жителей выразило желание уехать из города [5]. Для решения возникшей проблемы было принято решение, что для выхода из сложившейся социально-экономической ситуации необходимо принять ряд мер, направленных на выход города из монозависимости:

- создание особой экономической зоны промышленно-производственного типа «Тольятти»
- инфраструктурной площадки для реализации крупных инвестиционных проектов в области промышленного производства;
- образование индустриального парка «Тольяттисинтез» специализированной ин-

фраструктурной площадки для реализации инвестиционных проектов в области химического и прочих производств;

- разработка технопарка в сфере высоких технологий «Жигулёвская долина» – инфраструктурной площадки для реализации проектов в сфере инноваций и высоких технологий, призванной обеспечить условия для быстрого роста и коммерциализации проектов с высокой интеллектуальной составляющей;
- формирование территории опережающего развития экономической зоны с льготными налоговыми условиями, упрощёнными административными процедурами и другими привилегиями, созданной для привлечения инвестиций, ускоренного развития экономики и улучшения жизни населения города, направленной на развитие среднего бизнеса [6].

Данные меры направлены на решение ряда важных задач:

- снижение естественного оттока населения из города (рис. 1);
  - снижение уровня безработицы;
  - развитие комфортной городской среды;
  - создание «Умного города».

В 2016 году на пресс-конференции инициативной группой под руководством мэра города был презентован проект «Четвертое рождение Тольятти» (далее – Проект), которому был дан старт в инновационном центре Сколково. Настоящий Проект предлагает ряд решений для выхода моногорода из «градообразующей зависимости»: строительство/реновация особых экономических зон на территории города, в том числе, на бывшей территории таких крупных предприятий как, ОАО.

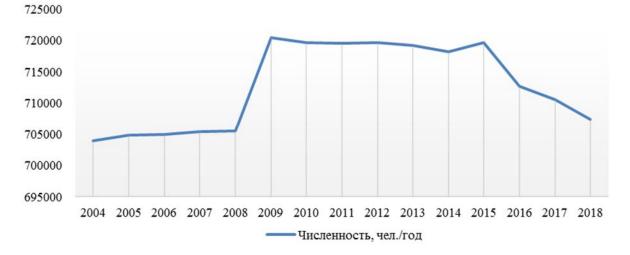


Рис. 1. Численность населения г. Тольятти (2004 – 2018 гг.) [4]

Причиной положительной прогрессии выручки от реализации инвестиционного плана яв-

ляется рост занятости населения. Так за счет новых направлений деятельности рост количества

рабочих мест равен в среднем 17 % (по состоянию на 2016 год), а к 2030 году планируется увеличение данного показателя на 5 %. Из вышесказанного можно сделать вывод, что Проект, представленный и реализованный инициатив-

ной группой, при поддержке государства (Постановление Правительства РФ № 974-п от 28.09.2016 «О создании территории опережающего социально-экономического развития «Тольятти»), дают свои положительные результаты, которые можно увидеть на рисунке 2.

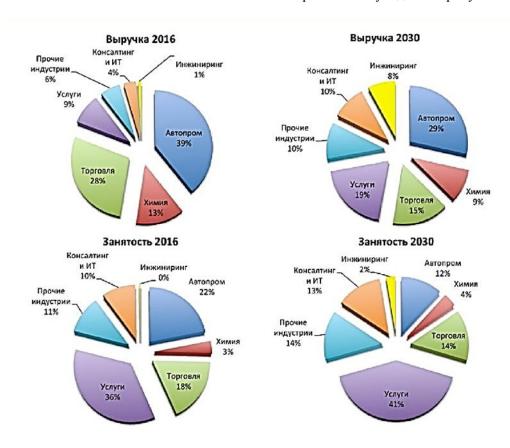


Рис. 2. Планируемые результаты реализации Проекта [7]

Как уже было сказано выше, предприятия, заявленные Проектом для выхода из монозависимости города Тольятти, в настоящий момент функционируют. Ниже представлена таблица 1, в которой можно проследить, какое предприятие было нововозведенным, а какое разместилось на территории бывшего градообразующего предприятия.

Как можно увидеть из таблицы 1, предприятия ОАО «АВТОВАЗ», ОАО «Волгоцемнаш» и ООО «Тольяттикаучук», АО «КУЙБЫШЕВАЗОТ» были перепрофилированы из крупных градообразующих предприятий в инновационные площадки, общественные пространства, каждое из которых дало городу одно из средств выхода из монозависимости – новые рабочие места [8]. Что касается предприятий новообразованных: ОЭЗ ППТ «ТОЛЬЯТТИ», Технопарк «ЖИГУЛЕВСКАЯ ДОЛИНА», они также функционируют, и собирают на своей территории крупных отечественных и зарубежных резидентов, таких как: «Nobel Automotive» (Турция), ООО «Праксайр

Самара» (США, Россия), «СІЕ Automotive» (Испания), «Edscha» (Германия), ООО «Мабскел» (Россия) и другие [9].

Финансирование Проекта «Четвертое рождение Тольятти» осуществляется из денежных средств:

- федерального бюджета (согласно Постановлению Правительства РФ № 974-п от 28.09.2016 «О создании территории опережающего социально-экономического развития «Тольятти», минимальный объем капитальных вложений в рамках реализации резидентом территории опережающего развития инвестиционного проекта в осуществление соответствующих видов экономической деятельности составляет 20 млн. руб.);
  - областного и городского бюджетов;
- внебюджетных источников (денежные средства инвесторов).

В таблице 2 более наглядно отражено перераспределение средств между инвестиционными площадками согласно Проекту.

Расшифровка аббревиатур источников финансирования:

- МОН Министерство высшего образования и науки РФ;
- МЭР Министерство экономического развития РФ;
  - НТИ национальная технологическая

инициатива;

- МПТ Министерство промышленности и торговли;
  - МЭ Министерство энергетики РФ;
- НИЦ научно-испытательный центр электротехнического оборудования;
  - ФРМ фонд развития моногородов. *Таблица 1*

### Инвестиционные площадки: до и после реализации комплексного инвестиционного плана модернизации, г. Тольятти [7]

No	Наименование	До реализации КИП	После реализации КИП
п/п	инвестиционной площадки		
1	Волжский индустриальный парк «АВТОВАЗ» (1966 г.)	OAO «ABTOBA3»	Пространство для реализации деятельности резидентов, используя инфраструктурные и технологические возможности АВТОВАЗа
2	ОЭЗ ППТ	Особая экономическая зо	на промышленно-производственного типа
	«ТОЛЬЯТТИ» (2011 г.)	Резиденты – 9 (по состоянию на 2016 г.)	Резиденты – 21 (по состоянию на 2018 г.)
3	Технопарк «ЖИГУЛЕВСКАЯ ДОЛИНА» (2011 г.)	Резиденты – 23 (по состоянию на 2011 г.)	Резиденты – 188 (по состоянию на 2018 г.)
4	Индустриальный парк «ВЦМ» (1959 г.)	ОАО «Волгоцеммаш»	Пространство для реализации деятельности резидентов, используя инфраструктурные и технологические возможности ВЦМ
5	Индустриальный парк «ТОЛЬЯТТИСИНТЕЗ» (1950 г.)	ООО «Тольяттикаучук»	Пространство для реализации деятельности резидентов, используя инфраструктурные и технологические возможности ТОЛЬЯТ-ТИСИНТЕЗ
6	АО «КУЙБЫШЕВАЗОТ» (1966 г.)	Объем реализации – 4473 млн. руб. (по состоянию на 2000 г.)	Объем реализации – 43013 млн. руб. (по состоянию на 2017 г.)

Выводы. Согласно данным, взятым с информационных источников, в декабре в Тольятти пройдет международный Форум «Город будущего». Это масштабное мероприятие по обсуждению долгосрочных проектов, направленных на развитие и обустройство города. Основным организатором форума выступила городская администрация при поддержке Правительства Самарской области. Главной темой Форума утверждена стратегия социально-экономического развития города Тольятти на период до 2030 года (Проект «Четвертое рождение Тольятти»). Немаловажной темой обсуждения на форуме станут достигнутые результаты работы по Проекту: активное благоустройство города, ремонт внутридомового и реновация общегородского пространства, появление велопешеходной дорожки на улице Патрульной в Автозаводском районе, сквера «Маяк»

и сквера Крылова в Комсомольском, Аллеи Славы в Центральном. На форуме будет продолжена тема «Умного города», начатая на прошлых встречах. Сегодня и эта, некогда новаторская идея. тоже начала успешно воплошаться в жизнь. В апреле 2018 года Тольятти был включен Минстроем РФ в перечень из 20 городов - пилотов для реализации проекта «Умный город». Наличие в Тольятти ОЭЗ, ТОСР, технопарка «Жигулевская Долина», статуса «моногорода», а также опорного вуза страны ТГУ стали хорошими предпосылками для успешной его реализации [10]. То, что Тольятти выступает сейчас как инновационный, «умный» город, является положительным результатом работы Проекта, а также ярким и наглядным примером «второй жизни» моногорода.

Таблица 2

### Распределение денежных средств в комплексном инвестиционном плане модернизации г. Тольятти [7]

Программы	Федеральный бюджет, млрд. руб.	Областной и городской бюджеты, млрд. руб.	Внебюджетные источники, млрд руб.	Итого, млрд. руб.
Городская среда	4,5*	3,0*	1,0 (частные инвесторы)	8,5
Университет 3.0	<ul><li>7,5</li><li>(программа по опорным университетам, МОН)</li></ul>	1,5	4,0 (собственные доходы Университета)	13,0
	– 5,0 (конкурсы по программам МОН, МПТ)	-	2,5 (индустриальные партнеры)	7,5
	- 1,0 (строительство нового кампуса, МОН)	1,0	-	2,0
Инжиниринговый центр	<ul><li>10,0 (создание НИЦ по э/о, МЭ+МПТ)</li></ul>	1,5	1,5 (НАМИ)	11,5
	- 0,9 (программа МСП, МЭР)	_	1,0 (инфрафонд РВК, ФИОП РОСНАНО)	1,9
	– 2,0 (программа НТИ)	-	10,0 (корпорации)	12,0
Инвестиции	- 2,0 ФРМ	0,5	150,0 (резиденты)	152,5
в создание новых рабочих мест	– Налоговые льготы (статус ТОСЭР)	-	-	_

<sup>\*</sup>Утвержденная программа 50-летия выпуска первого автомобиля ВАЗ.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Авилова И.П., Постникова Л.В., Байдина О.В. О новом направлении в реконструкции промышленных территорий в центре городов // Наука, образование, общество: проблемы и перспективы развития: сборник научных трудов по материалам Международной научно- практической конференции. 2014. С. 8–10.
- 2. Аридова С.В., Фролов Н.В., Стрекозова Л.В., Тюремских М.А. Теоретические и методологические аспекты разработки методики экономического обоснования реконструкции на основе комплексного анализа городских территорий на примере города Белгорода // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 8. С. 222–230.
- 3. Моногорода. РФ [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://моногорода.рф.
- 4. Официальный портал Администрации городского округа Тольятти. Режим доступа: http://www.tgl.ru.
- 5. Сергей А. Тольятти перевели в первую категорию моногородов [Электронный ресурс] // Волжская коммуна. 2015. № 41. URL:

http://tlt.vkonline.ru/newspaper/1.11.2015.

- 6. Смирнова И. Мэрия показала будущее Тольятти [Электронный ресурс] // Панорама Тольятти. 2016. № 35. URL: http://www.tgl.ru/news/item/6637-meriya-pokazala-buduschee-
- 7. Четвертое рождение Тольятти [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.tgl.ru.
- 8. Деева А., Даниленко Е. Трансформация городского пространства с помощью преобразования промышленных зон // Интеграция современных научных исследований в развитие общества сборник материалов ІІ Международной научно-практической конференции. Западно-Сибирский научный центр. 2017. С. 29–31.
- 9. Ветрова О. Большие возможности ТОР // Понедельник: газета. Тольятти: ООО «Деловая газета». 2016. № 41 (682). С. 5.
- 10.Официальная страница V Международного форума «Тольятти город будущего». Режим доступа: http://future-tgl.ru.

Информация об авторах

**Пермякова Анна Андреевна**, магистрант. E-mail: permakova.aa@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Авилова Ирина Павловна**, кандидат экономических наук, профессор кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: naumov.ae@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Даниленко Елена Петровна**, доцент кафедры городского кадастра и инженерных изысканий. E-mail: danilenko.ep@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Стрекозова Людмила Васильевна**, доцент кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: strekozova\_lv@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в декабре 2018 г.

© Пермякова А.А., Авилова И.П., Даниленко Е.П., Стрекозова Л.В., 2019

<sup>1</sup>,\*Permiakova A.A., <sup>1</sup>Avilova I.P., <sup>1</sup>Danilenko E.P., <sup>1</sup>Strekozova L.V.

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46 \* E-mail: permakova.aa@bstu.ru

### ANALYSIS OF THE COMPLEX INVESTMENT PLAN FOR THE MODERNIZATION OF MONOGIANCES ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF TOGLIATTI

Abstract. The study is due to the severity and magnitude of the problems of single-industry municipalities. Single-industry towns are the "weak spot" of Russia. In such municipalities, the dependence of the settlement on the city-forming enterprise is clearly expressed, which causes well-founded concerns in the conditions of the economic crisis in which the Russian Federation has been staying for a long time. The population of single-industry towns may be left without jobs and wages, the city budget will lose the monetary component of the taxes of the city-forming enterprise. In such situation population outflows may begin, the city will lose its social attractiveness and may eventually cease to exist as a municipality. The comprehensive investment plan is the main instrument of state financial support for the integrated development of single-industry towns, which is aimed at eliminating the dependence of a single-industry entity on the city-forming enterprise, improving the socio-economic condition of the city, improving and finding the investment attractiveness of the municipality. The article deals with the problems of the spatial development of the territory of the single-industry city of Tolyatti, taking into account the socio-economic orientation. A search is being made for a solution to the town-planning use of the city's territory on the basis of a comprehensive investment modernization plan. The assessment of the previous state of the territorial unit, the process of implementing a comprehensive investment modernization plan and the forecast of the post-sales condition of the city are given.

**Keywords**: one-industry town, public space, spatial planning, urban development enterprise, "smart city."

### REFERENCES

- 1. Avilova I.P., Postnikova L.V., Baidina O.V. about the new direction in reconstruction of industrial territories in the center of cities. Science, education, society: problems and prospects of development collection of scientific works on materials of the International scientific and practical conference, 2014, pp. 8–10.
- 2. Aridova S.V., Frolov N.In., Strekozova L.V., Jailskikh M.A. Theoretical and methodological aspects of the development of methods of economic justification of the reconstruction on the basis of a
- comprehensive analysis of urban areas on the example of the city of Belgorod. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2016, no. 8, pp. 222–230.
- 3. Single-industry towns.of the Russian Federation [Electronic resource]. Access mode: https://моногорода.РФ.
- 4. The official portal Of the administration of the city district of Togliatti. Access mode: http://www.tgl.ru.
- 5. Sergey A. Togliatti was transferred to the first category of single-industry towns [Electronic resource]. Volzhskaya Kommuna, 2015, no. 41, URL: http://tlt.vkonline.ru/newspaper/1.11.2015.

- 6. Smirnova I. City hall showed the future of Togliatti [Electronic resource]. Panorama Togliatti, 2016, No. 35. URL: http://www.tgl.ru.
- 7. The fourth birth of Togliatti [Electronic resource]. Access mode: http://www.tgl.ru.
- 8. The Transformation of urban space through the transformation of industrial zones. Integration of modern scientific research in the development of so-

ciety, the collection of materials of the II International scientific-practical conference. West-Siberian scientific center, 2017, pp. 29–31.

9. Vetrova O. Great opportunities TOR. Monday: newspaper. Togliatti: LLC «Business newspaper», 2016, no. 41 (682), p. 5.

10.Official page of the V international forum "Togliatti-the city of the future". Access mode: http://future-tgl.ru.

#### Information about the authors

**Permiakova**, **Anna A.** Master student. E-mail: permakova.aa@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Avilova, Irina P.** PhD, Professor. E-mail: naumov.ae@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st.Kostyukova, 46.

**Danilenko, Elena P.** Assistant professor. E-mail: danilenko.ep@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Strekozova, Lydmila V.** Assistant professor. E-mail: strekozova\_lv@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in November 2018

### Для цитирования:

Пермякова А.А., Авилова И.П., Даниленко Е.П., Стрекозова Л.В. Анализ комплексного инвестиционного плана модернизации моногородов на примере города Тольятти // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №3. С. 78–84. DOI: 10.34031/article 5ca1f632ae2477.55675663

### For citation:

Permiakova A.A., Avilova I.P., Danilenko E.P., Strekozova L.V. Analysis of the complex investment plan for the modernization of monogiances on the example of the city of Togliatti. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 78–84. DOI: 10.34031/article 5ca1f632ae2477.55675663

### ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI:  $10.34031/article\_5ca1f6331ec888.51255959$  <sup>1,\*</sup>Бессмертный В.С.,<sup>2</sup>Соколова О.Н., <sup>3</sup>Бондаренко Н.И., <sup>3</sup>Бондаренко Д.О., <sup>4</sup>Брагина Л.Л., <sup>1</sup>Макаров А.В., <sup>2</sup>Кочурин Д.В.

<sup>1</sup>Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национальный исследовательский технологическийуниверситет «МИСиС» Россия, 309516, г. Старый Оскол, Белгородская обл., микрорайон Макаренко, 42 
<sup>2</sup>Белгородский университет кооперации, экономики и права Россия, 308023, Белгород, ул. Садовая, д. 116а 
<sup>3</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46 
<sup>4</sup>Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» Украина, 61002, Харьков, ул. Кирпичева, д.2 
\*E-mail: vbessmertnyi@mail.ru

# ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ БЛОЧНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ДЕКОРАТИВНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Аннотация. Исследовано воздействие плазмы электродугового плазмотрона на плазмохимическую модификацию двухслойного термостойкого декоративного покрытия на ограждающих блоках пеностекла. Определены оптимальные технологические параметры плазменной обработки ограждающих блоков пеностекла с предварительнона основе тонкоизмельченной стеклотары и боя сортовых стекол. Показана, что на фактуру и качество двухслойного термостойкого декоративного покрытия существенно влияют скоростные характеристики факела плазмы. Экспериментально установлено, что при скорости оплавления электродуговой плазмой — 5 мм/с на поверхности блока пеностекла образуется сплошное волнистое покрытие, а при 10 мм/с — сплошное покрытие с ровным разливом.

Разработаны промежуточные термостойкие и основные составы декоративного поверхностного двухслойного покрытия для плазмохимического модифицирования ограждающих блоков тепло-изоляционных материалов. Промежуточный термостойкий состав включал следующие ингредиенты: термостойкий глиноземистый цемент, измельченный и фракционированный высокоглиноземистый огнеупор и жидкое стекло. Основной состав включал смесь тонкомолотого стеклопорошка из тарных и сортовых стекол с измельченным фракционированным высокоглиноземистым огнеупором.

Исследованы такие эксплуатационные показатели блоков пеностекла с двухслойным термостойким декоративным покрытием как прочность сцепления покрытия с матрицей: морозостойкость, микротвердость, кислотостойкость, водостойкость, истираемость, влагостойкость и стойкость к соляному нейтральному туману.

**Ключевые слова:** блочное пеностекло, декоративное термостойкое декоративное покрытие, плазмохимическое модифицирование.

Введение. В настоящее время различные блочные теплоизоляционные изделия в современном гражданском и промышленном строительстве приобретают всё большее значение [1–3]. Это связано прежде всего с тем, что проблема по экономии и сбережению энергоресурсов, необходимых для поддержания оптимального температурного режима в помещениях, приобретает особую остроту [4–6].

Одним из наиболее эффективных теплоизоляционных материалов является блочное пеностекло, которое по своим теплоизоляционным показателям не уступает природным и искусственным материалам, а по ряду таких важнейших свойств, как пожаробезопасность и огнестойкость, экологическая безопасность и высокая коррозионная биостойкость превосходит

практически все органические теплоизоляционные материалы [7–9].

Утепление ограждающих конструкций теплоизоляционными материалами в процессе строительства требует в дальнейшем использование различных отделочных и облицовочных материалов (стеклокристаллических, стеклоэмалевых), которые существенно удорожают себестоимость 1 м² жилья. С этой целью были разработаны опытно-промышленные одностадийные и двухстадийные технологии глазурования блочного пеностекла с использованием традиционных теплотехнических агрегатов [10–12].

Наиболее энергосберегающей в настоящее время технологией является получение стекловидных покрытий на различных стеновых материалах с использованием плазменных струй

электродуговых или индукционных плазменных установок [13–15].

Плазменное оплавление или плазмохимическое модифицирование лицевой поверхности легких и тяжёлых бетонов, стеновых керамических материалов, стеновых материалов автоклавного твердения, многослойных композиционных: органических и силикатных материалов с наполнителями из полых стеклянных микросфер приводили к значительному повышению как эстетических, так и физико-химических свойств [16–20]. В связи с вышеизложенным разработка эффективной технологии плазмохимического модифицирования блочного пеностекла является актуальным направлением исследований.

Методология. Для получения блочного пеностекла в лабораторных муфельных печах использовали бой тарных стёкол, который мололи в шаровой фарфоровой мельнице в течение 5 часов. Тонкодисперсный порошок усредняли с пенообразователем. В качестве пенообразователя использовали сажу в количестве 1,2 %. Смесь на одну треть укладывали в металлические формы. Подъем температуры до 840 °C производили со скоростью 5 град/мин. Выдержка при максимальной температуре составляла 2 часа. Охлаждение до температуры 600 °C на стадии стабилизации производили со скоростью 2,5 град/мин. Замедленное охлаждение с 600 °C до 400 °C производили в течение 6 часов. В дальнейшем производили быстрое охлаждение. Извлекали из форм блочное пеностекло и обрабатывали алмазным кругом с получением ровной горизонтальной лицевой поверхности. На лицевую поверхность наносили промежуточный слой на основе смеси глиноземистого цемента, измельченного фракционированного высокоглиноземистого огнеупора жидкого стекла. Затем на незатвердевшую поверхность промежуточного слоя наносили декоративный слой на основе смеси стеклопорошков цветных тарных и сортовых стёкол. После твердения декоративный слой подвергали плазмохимическому модифицированию с использованием электродугового плазмотрона «Горыныч» со среднемассовой температурой плазменной струи 5500 °C. После плазмохимического модифицирования определяли прочность сцепления стекловидного покрытия с матрицей блочного пеностекла с использованием разрывной машины М-

Химический состав цветных тарных стёкол и сортовых стёкол, а также оплавленного стекловидного слоя определяли рентгенофлуорисцентным методом с использованием спектрометра APL9900 «Thermoscientific».

Распределение температур по толщине декоративного слоёв определяли платино-платинородиевыми термопарами, которые запрессовывали на глубину 2000мкм и 4000 мкм при формировании покрытий. Температуру образовавшегося на лицевой поверхности силикатного расплава определяли оптическим параметром «Проминь». Микротвердость покрытий определяли с использованием твердомера «NEXUS 4504-IMP» по методу Виккерса. Морозостойкость блочного пеностекла со стекловидным покрытием определяли в соответствием требований нормативного документа ГОСТ 7025-91. Кислотостойкость стекловидного покрытия определяли по ГОСТ 54179-2010 на наличие цветных пятен и разводов. Испытания декоративного покрытия на влагостойкость проводили в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54179-2010. Устойчивость на истирание проводили на аттестованном приборе ГОСТ Р 54179-2010. Водостойкость декоративного покрытия исследовали по ГОСТ 101134.1-

Стойкость к воздействию нейтрального соляного тумана проводили в специальной распылительной камере по ГОСТ 54179-2010.

Основная часть. Высокие температуры плазменных струи при их воздействии на лицевой слой различных силикатных материалов, в том числе и теплоизоляционных, вызывают значительный термоудар. Плавление поверхностных слоёв и их разогрев до температур порядка 2000 °С, вызывает значительный температурный градиент, который проводил к образованию напряжений в материале, способных привести не только к снижению прочности сцепления покрытия с основой, но и его самоотслоению.

Для снижения последствий термоудара были разработаны составы промежуточного термостойкого слоя на основе термически-устойчивого глиноземистого цемента и измельченного фракционированного высокоглиноземистого огнеупора.

Были разработаны следующие составы промежуточного слоя (табл. 1):

- глиноземистый цемент: измельченный фракционированный высокоглиноземистый огнеупор при массовом соотношении 1:3 и фракционным составом высокоглиноземистого огнеупора 0,25–0,63 мм; 0,63–0,80 мм; 0,80–1,25 мм;
- глиноземистый цемент: бой высокоглиноземистого огнеупора при массовом соотношении 1:3 и жидким натриевым стеклом, вводимом с водой затвердения в качестве 5 %;
- глинозёмистый цемент: бой высокоглиноземистого огнеупора при массовом соотношении 1:3 и жидким натриевым стеклом, вводимом с водой затворена в количестве 10 % (табл. 1).

Таблица 1

### Составы промежуточного слоя защитно-декоративного покрытия

№ состава	Массовое содержание, %							
	Глиноземистый цемент ВГЦ-1	Измельченный фракцио- нированный высокогли- ноземистый огнеупор, мм	Содержание жидкого стекла					
1	25	75 (0,25–0,63)	_					
2	25	75 (0,25–0,63)	5					
3	25	75 (0,25–0,63)	10					
4	25	75 (0,63–0,80)	_					
5	25	75 (0,63–0,80)	5					
6	25	75 (0,63–0,80)	10					
7	25	75 (0,80–1,25)	_					
8	25	75 (0,80–1,25)	5					
9	25	75 (0,80–1,25)	10					

Разработаны декоративные составы смесей (табл. 2):

- цветные тарные и сортовые стекла и бой глиноземистого огнеупора фракционного состава 0,25-0,63 мм при массовом соотношении 7:3;
- цветные тарные и сортовые стёкла и бой высокоглиноземистого огнеупора фракционного состава 0,25–0,63 мм при массовом соотношении 4:1;
- цветные тарные и сортовые стекла и бой высокоглиноземистого огнеупора фракционного состава 0,63–0,80 мм.

Таблица 2

### Составы основного слоя защитно-декоративного покрытия

№	Массовое содержание, %						
состава	Тонкомолотый слой цветных тарных и	Измельченный фракциони-	Увлажняющий 10 %				
	сортовых стёкол	рованный высокоглинозе-	водный раствор жидкого				
		мистый огнеупор, мм	стекла				
10	70	30 (0,25–0,63)	-				
11	70	30 (0,25–0,63)	+				
12	70	30 (0,63–0,80)	+				
13	80	20 (0,25–0,63)	-				
14	80	20 (0,25–0,63)	+				
15	80	20 (0,63–0,80)	+				

Химический состав цветных и сортовых стёкол представлен в таблице 3 и 4.

Таблица 3

### Химический состав сортовых стёкол

№	Наименование		Содержание компонентов, мас.,%								
п/п		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	F	$B_2O_3$	Cd	S
1.	Кадмиевый рубин	67,0	1,0	_	3,5	13,0	6,0	_	3,5	0,5	0,5
2.	Сортовое синее стекло*	68,6	6,3	9,3	-	14,8	1,0	_	_	-	_
3.	Сортовое зелёное стекло**	72,7	_	6,8	2,0	15,0	2,0	_	1,0	ı	_
4.	Сортовое молочное стекло	66,6	6,3	6,3	-	14,8	1,0	5,0	_	_	_

<sup>\* –</sup> содержание оксида кобальта составляло 0,15 %

<sup>\*\* –</sup> содержание оксида хрома составляла 0,2 %

Таблица 4

### Химический состав тарных стёкол

Наименование	Содержание компонентов, масс %									
	$SiO_2$	$Al_2O_3$	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K2O	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	TiO <sub>2</sub>	$SO_3$
Тарное зелёное стекло	70,5	3,3	10,0	2,0	0,2	13,0	0,3	-	0,4	0,3
Тарное коричневое стекло	71,7	1,9	8,0	4,0	0,3	13,2	0,7	-	-	0,2
Тарное синее стекло	67,5	5,2	4,7	2,2	0,9	17,2	2,0	0,062	0,031	0,115

Перед оплавлением на блоки пеностекла наносили термостойкий и декоративный слой, а затем обрабатывали блоки плазмой со скоростью 2,5,10 и 15 мм/с. В процессе оплавления плазмой

блоков фиксировали температуру расплава и максимальную температуру на глубине 2000 мкм и 4000 мкм.

Таблица 5

### Распределение температур в декоративном слое при различных скоростях плазменной обработки

No	Скорость	Температура	Температура	Температура на	Состояние поверхности
	плазменной	расплава	на глубине	глубине 4000 мкм	органолептическая
	обработки,	на поверхности	2000 мкм		оценка
	мм/с				
1	2	2050	1508	453	Вспененная поверхность
2	5	2000	1395	367	Волнистая поверхность
3	10	1960	1181	284	Поверхность с ровным
					разливом
4	15	1820	964	120	Бугристая не
					равномерная
					поверхность

Состояния поверхности оценивали органолептическим методом.

После оплавления исследовали физико-химические и физико-механические показатели качества двухслойного термостойкого декоративного покрытия (табл. 6).

Таблица 6

# Показатели качества блочного пеностекла с защитно-декоративным покрытием (скорость обработки 10 мм/с, толщина 4000 мкм)

$N_{\underline{0}}$	Показатели качества	Размерность	Значения показателей качества
1	Прочность сцепления	МПа	0,74
2	Морозостойкость	Циклы	0,50
3	Микротвердость	HV	740±20
4	Кислотостойкость	-	Пятна и разводы отсутствуют
5	Водостойкость	Гидролитический класс	III
6	Истираемость	-	Соответствует ГОСТ 54179-2010
7	Влагостойкость	-	Пятна и разводы отсутствуют
8	Стойкость к соляному	-	Пятна и разводы отсутствуют, помут-
	нейтральному туману		нение отсутствует

Результаты исследований эксплуатационных показателей свидетельствует о высоком качестве стекловидного двухслойного термостой-кого декоративного покрытия с широкой цветовой гаммой.

Выводы: разработана инновационная технология плазмохимического модифицирования блоков пеностекла с двухслойным термостойким декоративным покрытием. Исследованы эксплуатационные свойства блоков пеностекла с двухслойным термостойким декоративным покрытием на основе цветных тарных и сортовых стёкол и измельченного фракционированного огнеупора.

**Источник финансирования**. Грант Президента для научных школ НШ-2724.2018.8.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Ryabova A.V., Yatsenko E.A., Klimova L.V., Goltsman B.M., FandaA.Yu. Protection of steel pipelines with glass-enamel coatings based on silica-containing raw materials of the far east of Russia // International Journal of Mechanical Engineering and Technology 2018. Volume 9. Issue 10. pp. 769–774.
- 2. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Smoliy V.A., Yatsenko L.A. Perspective and Experience of Use of

- Glass Fraction of Solid Municipal Waste in the Production of Silicate Heat-Insulating Materials // Proceedings of the 2018 IEEE International Conference "Management of Municipal Waste as an Important Factor of Sustainable Urban Development", WASTE 2018. 2018. P. 46–48
- 3. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Anna V. Ryabova A.V., Smoliy V.A. Peculiarities of the use of siliceous raw materials of the Russian Far East in the integrated pipeline protection // MATEC Web of Conferences. 2018. Volume 242. № 01016.
- 4. Yatsenko E.A., Smolii V.A., Gol'tsman B.M., Ryabova A.V., Klimova L.V., Gol'tsman N. S. Optimal Fractional Composition of Batch for Synthesis of Foam-Glass Materials Based on Diatomite from the Chernoyarskoe Deposit // Glass and Ceramics. В данный момент доступно только online https://link.springer.com/article/10.1007/s10717-019-00092-8.
- 5. Пучка О.В., Сергеев С.В., Калашников Н.В. Высокоэффективные теплоизоляционные стеклокомпозиты на основе техногенного сырья. Плазмохимические методы нанесения покрытий на поверхность пеностекла: монография. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. 186 с.
- 6. Минько Н.И., Пучка О.В., Степанова М.Н., Вайсера С.С. Неорганические теплоизоляционные материалы Научные основы и технология: монография. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. 263 с.
- 7. Рябова А.В., Яценко Е.А., Керимова В.В., Климова Л.В. Перспективы использования кремнеземсодержащего сырья дальневосточного региона в производстве стекломатериалов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2018. № 4. С. 104–109.
- 8. Минько Н.И., Пучка О.В. Основные направления развития технология производства и применения пеностекла // Строительные материалы. № 5. (Строительные материалы. № 9. Тесhnology). 2007. С.17–20.
- 9. Пучка О.В., Наумова Я.Г., Степанова М.Н. Оценка качества и стоимости теплоизоляционных материалов для ограждающих конструкций зданий и сооружений // Строительные материалы. 2008. №12. С. 42–44.
- 10. Яценко Е.А., Рябова А.В., Климова Л.В., Фанда А.Ю., Керимова В.В., Яценко Л.А., Чумаков А.А. Исследование химических процессов, обеспечивающих прочность сцепления стеклоэ-

- малевого покрытия со стальными трубопроводами // Бутлеровские сообщения. 2018. N 11. Том 56. С. 122–127.
- 11. Минько Н.И., Пучка О.В., Бессмертный В.С., Семененко С.В., Крахт В.Б., Мелконян Р.Г. Пеностекло. Научные основы и технология: монография. Воронеж: Научная книга, 2008. 168 с.
- 12. Пучка О.В., Степанова М.Н., Кузьменко А.А. Новый композиционный теплоизоляционный материал на основе пеностекла с покрытием на лицевой поверхности // Известия ВУЗов. Строительство. №9. 2007. С. 16–19.
- 13. Пучка О.В. Вайсера С.С., Сергеев С.В. Плазмохимические методы получения покрытий на поверхности пеностекла // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №3. С. 147–150.
- 14. Минько Н.И., Пучка О.В., Степанова М.Н. Композиционный теплоизоляционный материал с защитно-декоративным покрытием по лицевой поверхности // Стекло и керамика. №2. 2009. С. 3–5.
- 15. Пучка О.В., Кузьменко А.А., Степанова М.Н. Новый композиционный теплоизоляционный материал на основе пеностекла с покрытием на лицевой поверхности // Известия вузов. Строительство. 2007. №11. С. 53–55.
- 16. Бессмертный В.С., Пучка О.В., Крахт В.Б., Бахмутская О.Н., Выскребенец Л.Н., Зимовина Н.Н. Пеностекло с защитно-декоративным покрытием // Фундаментальные исследования. 2009. №1. Т.1. С. 21–23
- 17. Пучка О.В., Степанова М.Н. Композиционный теплоизоляционный материал с защитнодекоративным покрытием // Композиционные строительные материалы. Теория и практика: сб. статей международной научно-технической конференции. Пенза, 2008 г. С. 146–149.
- 18. Минько Н.И., Пучка О.В., Кузьменко А.А., Степанова М.Н. Перспективы развития технологии производства и применения пеностекла // Стекло Мира. 2006. №4. С. 91–92.
- 19. Бессмертный В.С., Кочурин Д.В., Бондаренко Д.О., Брагина Л.Л., Яловенко Т.А. Стекловидные защитно-декоративные покрытия на древесно-стружечных плитах // Строительные материалы и изделия. 2018. Т. 1. № 4. С. 4–12.
- 20. Здоренко Н.М., Бессмертный В.С., Дюмина П.С., Бондаренко Д.О., Кочурин Д.В. Плазмохимическое модифицирование блочных теплоизоляционных материалов // Фундаментальные исследования. 2018. № 6. С. 9–14.

### Информация об авторах

**Бессмертный Василий Степанович**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии оборудования машиностроения и металлургии. E-mail: vbessmertnyi@mail.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиала) Национального исследовательского технологического университета "МИСиС". Россия, 309516, г. Старый Оскол, Белгородская обл., микрорайон Макаренко, 42.

**Соколова Оксана Николаевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры товароведения непродовольственных товаров и таможенной экспертизы. E-mail: sokolovakseny@rambler.ru. Белгородский университет кооперации, экономики и права. Россия, 308023, Белгород, ул. Садовая, д. 116а.

**Бондаренко Надежда Ивановна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: bondarenko-71@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Бондаренко Диана Олеговна**, кандидат технических наук, кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: di\_bondarenko@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Брагина Людмила Лазаревна**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии керамики, огнеупоров, стекла и эмалей. E-mail: bragina\_l@ukr.net. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». Украина, 61002, Харьков, ул. Кирпичева, д.2.

Макаров Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии оборудования машиностроения и металлургии. E-mail: makarov.av@mail.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиала) Национального исследовательского технологического университета "МИСиС". Россия, 309516, г. Старый Оскол, Белгородская обл., микрорайон Макаренко, 42.

**Кочурин Дмитрий Владимирович**, магистрант. E-mail: dmitrii.kochurin@mail.ru. Белгородский университет кооперации, экономики и права. Адрес: Россия, 308023, Белгород, ул. Садовая, д. 116а.

Поступила в январе 2019 г.

© Бессмертный В.С., Соколова О.Н., Бондаренко Н.И., Бондаренко Д.О., Брагина Л.Л., Макаров А.В., Кочурин Д.В., 2019

# <sup>1</sup>,\*Bessmertnyy V.S., <sup>2</sup>Sokolova O.N., <sup>3</sup>Bondarenko N.I., <sup>3</sup>Bondarenko D.O., <sup>4</sup>Bragina L.L., <sup>1</sup>Makarov A.V., <sup>2</sup>Kochurin D.V.

<sup>1</sup>Stary Oskol Institute of Technology of A.A. Ugarov (branch) of National University of Science and Technology "MISIS"

Russia, 309516, Stary Oskol, Belgorod Region, Residential district of Makarenko, 42

<sup>2</sup>Belgorod university of cooperation, economy and right Russia, 308023, Belgorod, Sadovaya St., 116a

<sup>3</sup>Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov Russia, 308012, Belgorod, Kostyukov St., 46

<sup>4</sup>National technical university "Kharkiv Polytechnical Institute"

Ukraine, 61002, Kharkiv, Kirpichev St., 2

\*E-mail: vbessmertnyi@mail.ru

### PLASMACHEMICAL MODIFICATION OF THERMAL INSULATED BLOCKS WITH DECORATIVE COATING

Abstract. The impact of plasma of an arc plasmatron on plasmochemical modification of a two-layer heat-resistant decorative covering on the protecting foam glass blocks is investigated. The optimum technological parameters of plasma processing of such blocks with a preliminary basis of finely divided glass containers and high-quality glass breakage are determined. It is shown that the texture and quality of a two-layer heat-resistant decorative covering are affected by speed characteristics of the plasma torch. It is established experimentally that when the arc-plasma reflow rate is 5 mm/s, a continuous wavy coating is formed on the surface of the foam glass block, and at 10 mm/s – a continuous coating with even spill.

Intermediate heat-resistant and basic compositions of decorative two-layer coating for plasma-chemical modification of enclosing blocks of heat-insulating materials have been developed. The intermediate heat-resistant structure includes the following ingredients: heat-resistant aluminous cement, crushed and fractioned high-aluminous refractory material, liquid glass. The basic structure includes mixture of fine ground glass powder of tare and high-quality glasses with the crushed high-aluminous refractory material.

The following performance indicators are investigated: adhesion strength of the coating with the matrix, frost resistance, microhardness, acid resistance, water resistance, abrasion resistance, moisture resistance and resistance to neutral salt spray test.

Keywords: block foamglass, decorative heat-resistant covering, plasmochemical modifying.

#### REFERENCES

- 1. Ryabova A.V., Yatsenko E.A., Klimova L.V., Goltsman B.M., Fanda A.Yu. Protection of steel pipelines with glass-enamel coatings based on silica-containing raw materials of the far east of Russia. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2018, vol. 9, issue 10, pp. 769–774
- 2. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Smoliy V.A.; Yatsenko L.A. Perspective and Experience of Use of Glass Fraction of Solid Municipal Waste in the Production of Silicate Heat-Insulating Materials. Proceedings of the 2018 IEEE International Conference "Management of Municipal Waste as an Important Factor of Sustainable Urban Development", WASTE 2018, 2018, pp. 46–48.
- 3. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Ryabova A.V., Smoliy V.A. Peculiarities of the use of siliceous raw materials of the Russian Far East in the integrated pipeline protection. MATEC Web of Conferences, 2018, vol. 242, pp. 01016.
- 4. Yatsenko E.A., Smolii V.A., Gol'tsman B.M., Ryabova A.V., Klimova L.V., Gol'tsman N.S. Optimal Fractional Composition of Batch for Synthesis of Foam-Glass Materials Based on Diatomite from the Chernoyarskoe Deposit. Glass and Ceramics. https://link.springer.com/article/10.1007/s10717-019-00092-8
- 5. Puchka O.V., Sergeyev S.V., Kalashnikov N.V. Highly effective heat-insulating steklokompozita on the basis of technogenic raw materials. Plasmochemical methods of drawing coverings on the surface of foamglass: monograph. Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhov, 2013, 186 p.
- 6. Minko N.I., Puchka O.V., Stepanov M.N., Waisera S.S. Inorganic heat-insulating materials Scientific bases and technology: monograph. Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhov, 2014, 263 p.
- 7. Ryabov A.V., Yatsenko E.A., Kerimov V.V., Klimov L.V. The prospects of use of kremnezem-soderzhashchy raw materials of the Far East region in production of steklomaterial. News of higher educational institutions. North Caucasus region. Series: Technical science, 2018, no. 4, pp. 104–109.
- 8. Minko N.I., Puchka O.V. Main directions of development production technology and use of foamglass. Construction materials, no. 5, (Construction materials No. 9, Technology), 2007, pp. 17–20.
- 9. Puchka O.V., Naumova Ya.G, Stepanova M.N. Evaluation of the quality and cost of thermal insulation materials for enclosing structures of buildings and structures. Construction materials, 2008, no. 12, pp. 42–44.

- 10. Yatsenko E.A., Ryabova A.V., Klimova L.V., Fanda A.Yu., Kerimov V.V., Yatsenko L.A., Chumakov A.A. A research of the chemical processes providing durability of coupling of a stekloemalevy covering with steel pipelines. Butlerovsky messages, 2018, no. 11, vol. 56, pp. 122–127.
- 11. Minko N.I., Puchka O.V., Bessmertny V.S., Semenenko S.V., Krakht V.B., Melkonyan R.G. Foamglass. Scientific bases and technology: monograph. Voronezh: Scientific book, 2008, 168 p.
- 12. Puchka O.V., Stepanova M.N., Kuzmenko A.A. New composite heat-insulating material on the basis of a penokstekl with a covering on a front surface. News of higher education institutions. Construction, 2007, no. 9, pp. 16–19.
- 13. Puchka O.V., Waisea S.S., Sergeyev S.V. Plasmochemical methods of receiving coverings on the surface of foamglass Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2013, no. 3, pp. 147–150.
- 14. Minko N.I., Puchka O.V., Stepanova M.N. Composite heat-insulating material with a protective and decorative covering on a front surface. Glass and ceramics, 2009, no. 2, pp. 3–5
- 15. Puchka O.V., Kuzmenko A.A., Stepanova M.N. New composite heat-insulating material on the basis of a foamglass with a covering on a front surface. News of higher education institutions. Construction, 2007, no. 11, pp. 53–55.
- 16. Bessmertny V.S., Puchka O.V., Krakht V.B., Bakhmutskaya O.N., Vyskrebenets L.N., Zimovina N.N. Foamglass with a protective and decorative covering. Basic researches, 2009, no. 1, pp. 21–23
- 17. Puchka O.V., Stepanova M.N. Composite heat-insulating material with a protective and decorative covering. Composite construction materials. Theory and practice: collection of articles of the international scientific and technical conference, Penza, 2008, pp. 146–149.
- 18. Minko N.I., Puchka O.V., Kuzmenko A.A., Stepanova M.N. Prospects of development of the production technology and use of foamglass. World Glass, 2006, no.4, pp. 91–92.
- 19. Bessmertny S.V., Kochurin D.V., Bondarenko D.O., Bragina L.L., Yalovenko T.A. Vitreous protective and decorative coverings on wood-shaving plates. Construction materials and products, 2018, vol. 1, no. 4, pp. 4–12.
- 20. Zdorenko N.M., Bessmertny S.V., Dyumina P.S., Bondarenko D.O., Kochurin D.V. Plasmochemical modifying of block heat-insulating materials. Basic researches, 2018, no. 6, pp. 9–14.

Information about the authors

**Bessmertny, Vasily S.** DSc, Professor. E-mail: vbessmertnyi@mail.ru. Stary Oskol Institute of Technology of A.A. Ugarov (branch) National University of Science and Technology "MISIS". Russia, 309516, Stary Oskol, Belgorod Region, Residential district of Makarenko, 42.

**Sokolova, Oksana N.** PhD, Associate professor. E-mail: sokolovakseny@rambler.ru. Belgorod university of cooperation, economy and right. Russia, 308023, Belgorod, Sadovaya St., 116a.

**Bondarenko, Nadezhda I.** Candidate of Technical Sciences, associate professor of technology of glass and ceramics. E-mail: bondarenko-71@mail.ru. Belgorod state technological university of V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukov St., 46.

**Bondarenko**, **Diana O.** PhD. E-mail: di\_bondarenko@mail.ru. Belgorod state technological university of V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukov St., 46.

**Bragina, Lyudmila L.** DSc, Professor. E-mail: bragina\_l@ukr.net. National technical Address university "Kharkiv Polytechnical Institute": Ukraine, 61002, Kharkiv, Kirpichev St., 2.

**Makarov, Alexey V.** PhD, Associate professor. E-mail: makarov.av@mail.ru. Stary Oskol Institute of Technology of A.A. Ugarov (branch) of National University of Science and Technology "MISIS". Russia, 309516, Stary Oskol, Belgorod Region, Residential district of Makarenko, 42.

**Kochurin, Dmitry V.** Undergraduate. E-mail: dmitrii.kochurin@mail.ru. Belgorod university of cooperation, economy and right. Address: Russia, 308023, Belgorod, Sadovaya St., 116a.

Received in January 2019

### Для цитирования:

Бессмертный В.С., Соколова О.Н., Бондаренко Н.И., Бондаренко Д.О., Брагина Л.Л., Макаров А.В., Кочурин Д.В. Плазмохимическое модифицирование блочных теплоизоляционных материалов с декоративным покрытием // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 85–92. DOI: 10.34031/article 5ca1f6331ec888.51255959

#### For citation:

Bessmertnyy V.S., Sokolova O.N., Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Bragina L.L., Makarov A.V., Kochurin D.V. Plasmachemical modification of thermal insulated blocks with decorative coating. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 85–92. DOI: 10.34031/article 5ca1f6331ec888.51255959

DOI: 10.34031/article\_5ca1f6338c33a9.58050025
<sup>1,\*</sup>Виноградова Л.А., <sup>1</sup>Русакова Ю.П.

<sup>1</sup>Ивановский государственный химико-технологический университет Россия, 153000, г. Иваново, пр-т Шереметевский, 7 \*E-mail: lavinogradova@ya.ru

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА СП-2ВУ НА СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЕТОНА

Аннотация. Эффективными модификаторами структуры и свойств бетонной смеси являются химические добавки, в первую очередь, пластификаторы и суперпластификаторы. В ходе работы изучено влияние введения суперпластификатора «Полипласт СП-2ВУ» в бетонную смесь, что позволяет модифицировать строительно-технологические показатели бетона. Анализ данных, полученных при определении скорости схватывания системы на основе цемента и различных концентраций регулятора, показал, что введение СП-2ВУ в цементный раствор приводит к существенному замедлению процесса схватывания вяжущей композиции по сравнению с бездобавочным цементом, отодвигая его начало схватывания с  $\sim 2$  ч до  $\sim 12,5$  ч. Вместе с тем также наблюдается постепенное замедление продолжительности схватывания системы в  $\sim 2$  раза по сравнению с обычным бетоном. В присутствии СП-2ВУ (до концентрации 0,7%) повышается прочность модифицированных бетонов по сравнению с обычным. Кроме того, установлена оптимальная концентрация добавки (0,5%), способствующая набору необходимой скорости структурообразования системы, формированию плотного и прочного конгломерата с более упорядоченной и стабильной затвердевшей структурой, и определенными эксплуатационными характеристиками. При этом прочность образцов с содержанием 0,5% модификатора в бетонной смеси повышается на 40%.

**Ключевые слова:** суперпластификаторы, добавка СП-2ВУ, цементные растворы, добавки в бетоны, модифицирование бетонов, технология бетона, свойства бетонов.

Введение. В качестве основного строительного материала в третьем тысячелетии широкое применение находит модифицированный бетон. В таком искусственном композите в качестве регуляторов его свойств выступают различные химические добавки. Их введение в состав оказывается достаточно простым и легким решением в прогнозировании свойств бетона и повышении качества выпускаемой продукции. Правильный подбор модификаторов может приводить к некоторой экономии на производстве изделий [1–7].

Сегодня таким технологическим приемом пользуются на всех технологиях производства. Они способствуют появлению и развитию новых технологий, таких как производство высокопрочных, самоуплотняющихся бетонов и т.п. Более того, химические добавки позволяют значительно уменьшить количество расходов на выпуск одного изделия, улучшить его качественные характеристики и рентабельность некоторого ассортимента железобетонных конструкций, повысить их долговечность. Концентрация модификаторов в бетонном композите достаточно мало это всего десятые доли процента от массового содержания портландцемента в смеси и все же этого достаточно для регулирования в различных направлениях свойств и скорости затвердевания бетона, меняя его некоторые эксплуатационнотехнические характеристики [8-13].

Вместе с тем, необходимость подбора класса и концентрации добавок зависит от многих факторов. Одним из таких является, например, вид химического реагента в составе модификатора, который и задает характер влияния на свойства бетонной смеси и бетона: ускоряя или замедляя скорость схватывания системы, изменяя прочностные и др. характеристики готовых изделий. Так, ранее [14] нами изучено воздействие универсального регулятора БЕСТ на эксплуатационно-технические показатели бетонного композита с помощью регулирования процесса схватывания системы, а также изменение пределов прочности на сжатие бетона в различные сроки твердения. Анализ данных показал, что концентрация 0,3 % регулятора в бетонной смеси способствует ее продолжительному периоду схватывания (до 4 ч) благодаря образованию адсорбционного слоя добавки на поверхности зерен цемента, непроницаемого для воды. С повышением содержания (0,5-1,0 %) БЕСТ в системе установлено ускорение скорости схватывания вяжущей системы благодаря дефлокулирующему действию модификатора. Нами выявлено повышение прочностных показателей модифицированного бетона (на 41 %) относительно без добавочного. Более того, ввод универсальной добавки БЕСТ позволяет регулировать морозостойкость конечного композита в ~2 раза возможно за счет ускоренного формирования гелей гидроксидов кальция.

В настоящей работе представлены результаты изучения поведения бетонных композиций, включающих суперпластификатор «ПОЛИПЛАСТ СП-2ВУ» с водоудерживающим эффектом с разной массовой концентрацией в теле затвердевшего цементного раствора (0,1–0,9 %). Количественным показателем выбраны сроки схватывания бетонной смеси и предел прочности на сжатие бетонной композиции в результате гидротермальной обработки образцов.

**Методология.** Вяжущим компонентом в бетонной системе является портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Б ОАО «Мордовцемент», отвечающий требованиям ГОСТ 31108–2003. Цементы общестроительные. Технические условия. Химический состав его клинкера (массовое содержание, %): CaO – 60,38; SiO<sub>2</sub> – 23,37; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4,98; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4,03; SO<sub>3</sub> – 2,83; MgO – 1,13; K<sub>2</sub>O – 1,08; Na<sub>2</sub>O – 0,396; TiO<sub>2</sub> – 0,234; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,227; SrO – 0,129; MnO – 0,046; ZnO – 0,027; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,011. Минералогический состав его клинкера (массовое содержание, %): 3CaO·SiO<sub>2</sub> (C<sub>3</sub>S) – 61,56; β-2CaO·SiO<sub>2</sub> – (β-C<sub>2</sub>S) – 16,07; 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C<sub>3</sub>A) – 6,20; 4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C<sub>4</sub>AF) – 12,68.

В качестве мелкого заполнителя применяли обогащенный кварцевый песок Хромцовского месторождения с модулем крупности 2,4, соответствующий ГОСТ 8736—2014. Песок для строительных работ. Технические условия. Крупным

заполнителем является гранитный щебень Орского месторождения фракции 5 – 20 мм с водопоглощением 0,2 %, отвечающий требованиям ГОСТ 8267–93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. В качестве регулятора использовали суперпластификатор со стабилизирующим эффектом «Полипласт СП–2ВУ» (СП–2ВУ), который выпускает ООО "Полипласт Новомосковск", г. Новомосковск в форме водного раствора коричневого цвета по ТУ 5745–015–58042865 –2006 Суперпластификатор «Полипласт СП–2ВУ». Технические условия.

Анализа инфракрасной спектроскопии (ИКС) материала осуществляли с помощью прибора — Avatar 360—FT—IP (фирмы «Nicolet») в области 500-4000 см  $^{-1}$ .

Регулирование свойств цементных композиций в результате добавления к ним с разной концентрацией СП–2ВУ проводили на основе исследования сроков схватывания вяжущей системы на основе теста нормальной консистенции. Прочностные показатели бетона, твердевшего в течение 3-, 7- и 28 суток, изменяли по ГОСТ 310.3–76 Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема (с Изменением № 1). Изучение прочности модифицированного бетона осуществляли на бетонных смесях марки М300, составы которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Состав бетонной смеси	Массовое содержание, %							
Состав остопной смеси	без добавки	без добавки с добавкой						
Цемент	13,83	12,79	12,83	12,84	12,89	12,93		
Песок	32,31	34,10	34,18	34,22	34,35	34,47		
Гравий	46,95	46,47	46,58	46,64	46,80	46,98		
Вода	6,91	6,64	6,41	6,30	5,96	5,62		
Добавка СП–2ВУ	_	0,10	0,30	0,50	0,70	0,90		

Ввод пластифицирующего агента СП–2ВУ осуществляли с помощью приготовления водного раствора с концентрацией 0,1–0,9 % СП–2ВУ, взятого от массы цемента. Регулятор вводится всегда сверх 100 % всех компонентов бетонной системы.

Твердение бетонных композиций осуществлялось в условиях тепловлажностной обработке (ТВО) образцов в пропарочной камере при температурах до 80 °C и давлении 0,3 МПа.

Основная часть. Модифицирующим эффектом в структурообразовании и прогнозировании свойств бетона обладают химические реагенты, особенно пластификаторы и суперпластификаторы. Последние оказывают влияние на по-

верхностные слои твердых частиц и микроструктурные механизмы схватывания и твердения бетонной системы, что дает возможность управлять некоторыми свойствами композиции и позволяет получать бетоны с улучшенными характеристиками. Данные реагенты на основе ПАВ изменяют в основном реологические свойства цементобетонных систем, приводя к существенному разжижающему эффекту, который не способствует снижению показателей по прочности затвердевшего конгломерата. Ярким представителем таких модификаторов может быть суперпластификатор «ПОЛИПЛАСТ СП-3», проведенные ранее исследования [15] с которым показали, что нахождение его в составе цементобетонной смеси поз-

воляет регулировать технологические характеристики в разных направлениях. Так, содержание 0,5-1,0 % регулятора в составе композиции способствует замедлению процесса структурообразования системы благодаря пептизирующему влиянию СП-3. Нами также выявлена приемлемая концентрация модификатора, способствующая набору необходимой скорости схватывания бетонной смеси с последующим формированием прочного конгломерата с определенными эксплуатационными характеристиками. При концентрации 0,5 % регулятора СП-3 в бетонной смеси наблюдается прирост прочностных показателей на 22 %. В связи с этим, было интересно проанализировать влияние еще одного суперпластификатора «ПОЛИПЛАСТ СП-2ВУ» с водоудерживающим эффектом на строительно-технологические свойства бетонных композиций.

В ходе работы был сначала изучен химический состав суперпластификатора с помощью ИК-спектроскопии. Полученные ИК-спектры СП-2ВУ представлены на рис. 1. Так как добавка взята в виде водного раствора, для нее характерна очень широкая полоса в области 3100–3650 см<sup>-1</sup>, в которой поглощают ОН-группы, соединенные водородными связями. Присутствует также полоса ~1600 см<sup>-1</sup>, свойственная свободной воде. При 2927 см<sup>-1</sup> поглощают метиленовые группы — СН<sub>2</sub>—СН<sub>2</sub>—. Умеренно интенсивные колебания метиленовых мостиков наблюдаются и в области 680-900 см<sup>-1</sup>. Заметные полосы соответствуют группам —С—ОН (1512, 1452 см<sup>-1</sup>), —С=О (перегиб при 1785 см<sup>-1</sup>), —С—О—С— (1188, 1038 см<sup>-1</sup>).

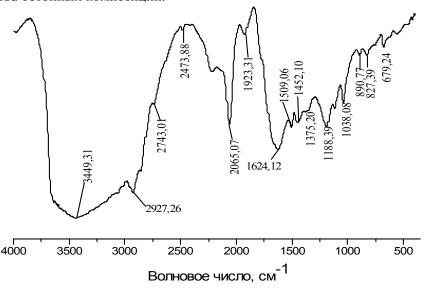


Рис. 1. ИК-спектр водного раствора Полипласт СП-2ВУ

При 2230 см<sup>-1</sup> обнаруживается полоса, предположительно отвечающая колебаниям акрилонитрильной группы  $-C\equiv N$ , и компонент сложной полосы (1667 см<sup>-1</sup>) – для амидной группы. Можно также отметить полосы  $\sim 1300$  и  $\sim 1100$  см<sup>-1</sup>, свойственные валентным колебаниям сульфогруппы. Достоверность полученных данных подтверждается идентификацией основных пиков.

К пластическим свойствам, позволяющим изменять в достаточно широких пределах процессы структурообразования бетонной смеси и зависящим от многих параметров, относят сроки схватывания. Схватывание цементного теста — это момент, при котором относительно подвижная смесь цемента с водой постепенно густеет с потерями цементной пастой подвижности и приобретает такую начальную прочность, при которой ее дальнейшее механическое изменение (формование) становится практически затруднительным и даже невозможным (в конце схватывания). Поэтому нами проведены исследования

процесса схватывания обычного цемента и с введением различных концентраций пластифицирующего реагента в смесь.

Так, проанализировав кинетику набора скорости схватывания различных композиций (табл. 2), получили, что в результате присутствия в цементном растворе СП–2ВУ наблюдается существенное замедление процесса структурообразования системы в отличии от без добавочного цемента. Концентрации 0,3 и 0,5 % реагента в цементном тесте позволяет замедлить процесс его схватывания на 9,5 ч, что является важным и очень удобным при транспортировании бетонной смеси на большие расстояния.

Увеличение содержания СП–2ВУ в бетонной смеси отодвигает начало ее схватывания до ~ 11,5 ч, что в последствии может повлечь организацию предварительного твердения и сказаться на увеличении времени гидротермальной обработки при пропаривании железобетонных

изделий. Вместе с тем также наблюдается постепенное замедление продолжительности схватывания системы в  $\sim$ 2 раза по сравнению с обычным бетоном.

Таблица 2 Сроки схватывания бетонной смести, ч-мин

Концентрация добавки СП–2ВУ	Начало схватывания	Конец схватыва- ния
0	1–39	5–55
0,1	2-50	7–48
0,3	6–05	11–24
0,5	9–30	17–11
0,7	10–28	18–49
0,9	11–18	18–37

Полученный эффект от введения пластифицирующего реагента в бетонную смесь заключается в адсорбции коллоидных молекул ПАВ, входящих в состав добавки, на всех частицах твердой фазы цемента и заполнителя, тем самым покрывая поверхность зерен плотной пленкой со существенным отрицательным ζ-потенциалом (рис. 2) и затрудняя доступ воды к активным центрам.

Важнейшей характеристикой при строительстве является механическая прочность бетонного камня. Она определяется пределом прочности на сжатии, изгиб, растяжение и скалывание образцов разной конфигурации. С повышением и ускорением скорости набора прочностных показателей затвердевшего конгломерата улучшается качество цемента или другого вяжущего вещества.

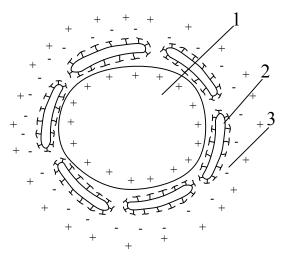


Рис. 2. Механизм воздействия пластифицирующей добавки: 1 — зерна цемента или заполнителя; 2 — коллоидная молекула модификатора с отрицательными зарядами на поверхности (анионные группы); 3 — водная оболочка [1, 2].

В нашем случае выявлено, что модифицирование бетонных систем способствует изменению кинетики набора прочности. Так, наибольший

набор прочностных показателей бетона, твердеющего в условиях ТВО, установлен в основном для 0,3–0,5 % концентраций регулятора в затвердевших композитах (рис. 3, кривые 2–4). Такой эффект происходит благодаря тому, что в период равномерного схватывания происходит разрушение флокуляционной оболочки и молекулы пластифицирующего реагента адсорбируют игольчатые кристаллы эттрингита и таким образом освобождают часть иммобилизованной гидросульфоалюминатом кальция воды. В результате облегчается доступ воды к непрореагировавшим частицам цемента с последующим появлением новообразований и формированием прочного конгломерата.

В следствие последующего повышения концентрации СП–2ВУ (до 0,9 %) в цементобетонном композите отмечается постепенный спад прочностных показателей бетона (рис. 3, кривые 5, 6), что предположительно связано с уменьшением плотности за счет воздухововлечения, характерного для высоких концентраций пластифицирующего регулятора, в результате обязательного длительного перемешивания смеси.

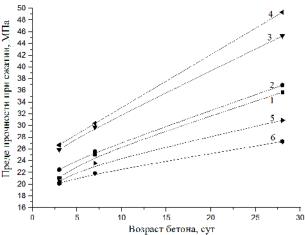


Рис. 3. Зависимость прочностных характеристик от возраста бетонных композиций, твердеющих в условиях ТВО и содержащих различное количество СП–2ВУ. Концентрация регулятора в бетоне, %: 1-0; 2-0,1; 3-0,3; 4-0,5; 5-0,7; 6-0,9

Именно такая система способствует набору На основании полученных сроков схватывания и прочностных характеристик нами установлена оптимальная концентрации суперпластификатора СП–2ВУ, которая составляет 0,5 % необходимой скорости и прочности структурообразования. Более того, ИК–спектры подтверждают формирование более упорядоченной и стабильной структуры при введении регулятора в количестве 0,5 % (рис. 4), объясняя повышенную прочность цементного камня. Так, спектры цементного раствора с добавкой содержат в основном полосы

поглощения, характерные для гидратированных клинкерных минералов. Это полосы валентных колебаний –Si–O–связей, присутствующих как в изолированных (900–950 см<sup>-1</sup>), так и в связанных

 $(1100-1200, 833 \text{ см}^{-1})$  кремний-кислородных тетраэдрах, алюмокислородных октаэдров (707–718, 592 см $^{-1}$ ).

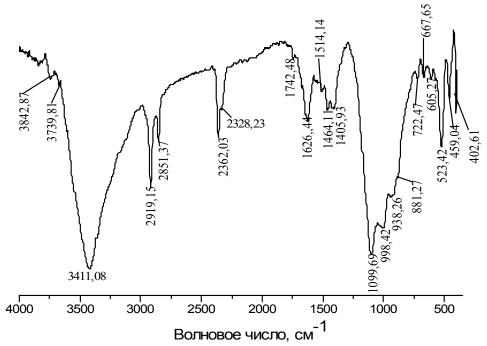


Рис. 4. ИК-спектр цементных растворов с 0,5 % концентрацией добавки СП-2ВУ

Первая полоса в спектре (рис. 4) отвечает главным образом колебаниям полимерных гидроксилов, а также хорошо выражено поглощение при 2850 и 2920 см<sup>-1</sup>. Полосы для комбинации деформационных и крутильных колебаний  $H_2O$  (2100-2300 см<sup>-1</sup>) в спектре четко прослеживаются. Полоса 1621-1626 см<sup>-1</sup> для межслоевой воды также более дифференцирована.

**Выводы.** Таким образом, нами было достигнуто улучшение строительно-технологических характеристик модифицированного СП–2ВУ бетона. Ввод различных концентраций реагента в цементное тесто позволяет замедлить процесс его схватывания до 11,5 ч, что дополнительно сопровождается постепенным увеличением периода между началом и концом схватывания системы в  $\sim 2$  раза по сравнению с обычным бетоном.

В присутствии СП–2ВУ в системе наблюдается изменение кинетики набора прочности модифицированных бетонов. Наибольший набор прочностных показателей бетона, твердеющего в условиях гидротермальной обработки, установлен в основном для 0,3–0,5 % концентраций регулятора в затвердевших композитах. Нами установлена оптимальная концентрация добавки (0,5 %), способствующая набору необходимой скорости структурообразования системы и формированию плотных и прочных структур тверде-

ния с высокими эксплуатационными характеристиками. Заметный прирост прочности образцов с содержанием 0,5 % модификатора в бетонной смеси составляет 40 %. При этом ИК-спектры подтверждают формирование более упорядоченной и стабильной структуры при введении СП–2ВУ в количестве 0,5 %, объясняя повышенную (в этом случае) прочность цементного камня.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Баженов Ю.М. Технология бетона: учебник. М.: Изд-во ACB, 2002. 500 с.
- 2. Виноградова Л.А., Катаргина В.К., Копосов И.А. Основы технологии железобетонных изделий: учеб. пособие. Ивановск. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново, 2016. 227 с.
- 3. Bazhenov Y., Alimov L., Voronin V. Concrete composites of double structure formation. В сборнике: MATEC Web of Conferences 26. Cep. "RSP 2017 26th R-S-P Seminar 2017 Theoretical Foundation of Civil Engineering". 2017. C. 00015.
- 4. Ущеров-Марщак А., Кабусь А. Современный бетон. Информационное обозрение. Харков, Госпром. 2010. 42 с.
- 5. Баженов Ю.М. Пути развития строительного материаловедения: новые бетоны // Технологии бетонов. 2012. № 3-4 (68-69). С. 39–42.
- 6. Jing Z. et al. Influence of tobermorite formation on mechanical properties of hydrothermally

solidified blast furnace slag // Journal of Materials Science. 2008. T. 43. №. 7. C. 2356–2361.

- 7. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. 2 е изд., перераб. и доп. М., 1998. 768 с.
- 8. Ahmedzade P., Yilmaz M. Effect of polyester resin additive on the properties of asphalt binders and mixtures // Construction and building materials. 2008. T. 22. № 4. C. 481–486.
- 9. Изотов В.С., Соколова Ю.А. Химические добавки для модификации бетона. М.: Палеотип, 2006. 244 с.
- 10.Ikotun B.D., Ekolu S. Strength and durability effect of modified zeolite additive on concrete properties // Construction and Building Materials. 2010. T. 24. №. 5. C. 749–757.
- 11. Касторных Л.И. Добавки в бетоны и строительные растворы: учеб.-справ. Пособие. 2 е изд. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 221 с.

- 12.3откин А.Г. Бетоны с эффективными добавками. М.: Инфра-Инженерия, 2014. 160 с.
- 13. Sanchez-Alonso E. et al. Evaluation of compactability and mechanical properties of bituminous mixes with warm additives // Construction and Building Materials. 2011. T. 25. №. 5. C. 2304-2311.
- 14.Виноградова Л.А., Грачева Ю.Н. Влияние универсальной добавки БЕСТ на свойства бетона // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 4. С. 301–307. doi:10.20914/2310-1202-2018-4-301-307.
- 15. Vinogradova L.A. Effect of introducing poliplast sp-3 superplasticizer on the properties of concrete // GLASS AND CERAMICS, Издательство: Springer New York Consultants Bureau. 2018. Т. 75. № 3–4. Р. 160–162.

### Информация об авторах

**Виноградова Любовь Алексеевна**, кандидат химических наук, доцент кафедры технологии керамики и наноматериалов. E-mail: lavinogradova@ya.ru. Ивановский государственный химико-технологический университет. Россия, 153000, г. Иваново, просп. Шереметевский, д. 7.

**Русакова Юлия Павловна**, бакалавр кафедры технологии керамики и наноматериалов. E-mail: lafigleam@ya.ru. Ивановский государственный химико-технологический университет. Россия, 153000, г. Иваново, просп. Шереметевский, д. 7.

Постина с писата 2010 г

Поступила в январе 2019 г.

© Виноградова Л.А., Русакова Ю.П., 2019

### <sup>1,\*</sup>Vinogradova L.A., <sup>1</sup>Rusakova, Yu.P.

<sup>1</sup>Ivanovo State University of Chemistry and Technology Russia, 153000, Ivanovo, Sheremetievskiy ave., 7 \*E-mail: lavinogradova@ya.ru

### THE EFFECT OF SUPERPLASTICIZER SP-2VU ON CONSTRUCTION AND ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE

Abstract. Chemical additives, namely, plasticizers and superplasticizers are effective modifiers of the concrete mix properties and structures. The additives allow to control properties of the concrete mix and to obtain its optimal structure, acting on the surface phenomena and microstructure of the cement paste. In the course of the study, the effect of introducing the superplasticizer SP-2VU into the concrete mix is studied. This allows to modify the construction and engineering properties of concrete. Analysis of the data obtained in determining the setting speed of the system based on cement and various concentrations of the regulator shows that the introduction of SP-2VU into the cement mortar leads to a significant slowdown in the process of setting the binder composition in comparison with additive-free cement, slowing the cement setting from  $\sim$  2 hours to  $\sim$  12.5 hours. In addition, the superplasticizer in an amount of up to 0.5 % contributes to some preservation of the cement mixture mobility to  $\sim$ 5 h, while in the absence of an additional composition - up to  $\sim$ 2.5 h. The SP-2VU (to a concentration of 0.7 %) increases the strength of modified concrete compared to conventional. Moreover, the optimal concentration of the additive (0.5 %) is established, which contributes to the set of the required speed of structure formation of the system and the formation of strong hardening structures with a more ordered, stable solidified structure and certain performance characteristics. At the same time, the strength of samples containing 0.5 % of the modifier in the concrete mixture increases by 40 %.

**Keywords:** superplasticizers, additive SP-2VU; cement mortars, concrete additives, concrete manufacturing technology, concrete modification, concrete properties.

#### REFERENCES

- 1. Bazhenov Yu.M. Tekhnologiya betona: uchebnik. M.: Izd-vo ASV, 2002, 500 p.
- 2. Vinogradova L.A., Katargina V.K., Koposov I.A. Osnovy tekhnologii zhelezobetonnyh izdelij: ucheb. Posobie. Ivanovsk. gos. him.-tekhnol. un-t. Ivanovo, 2016, 227 p.
- 3. Bazhenov Y., Alimov L., Voronin V. Concrete composites of double structure formation. MATEC Web of Conferences 26. Ser. "RSP 2017 26th R-S-P Seminar 2017 Theoretical Foundation of Civil Engineering". 2017, p. 00015.
- 4. Ushherov-Marshhak A., Kabus A. Sovremennyj beton [Modern concrete. News Review]. Informacionnoe obozrenie [Infomation Review], 2010, p.42.
- 5. Sun L., Yu W. Y., Ge Q. Experimental research on the self-healing performance of microcracks in concrete bridge. Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, 2011, vol. 250, pp. 28–32.
- 6. Jing Z. et al. Influence of tobermorite formation on mechanical properties of hydrothermally solidified blast furnace slag. Journal of Materials Science, 2008, vol. 43, no. 7, pp. 2356–2361.
- 7. Batrakov V.G. Modificirovannye betony. Teoriya i praktika. 2 e izd., pererab. i dop. M., 1998. 768 p.

- 8. Ahmedzade P., Yilmaz M. Effect of polyester resin additive on the properties of asphalt binders and mixtures. Construction and building materials, 2008, vol. 22, no. 4, pp. 481–486.
- 9. Izotov V.S., Sokolova Yu.A. Himicheskie dobavki dlya modifikacii betona. M.: Paleotip, 2006. 244 p.
- 10.Ikotun B.D., Ekolu S. Strength and durability effect of modified zeolite additive on concrete properties. Construction and Building Materials, 2010, vol. 24, no. 5, pp. 749–757.
- 11.Kastornyh L.I. Dobavki v betony i stroitel'nye rastvory: ucheb.-sprav. Posobie. 2 e izd. Rostov n/D: Feniks, 2007. 221 p.
- 12.Zotkin A.G. Betony s ehffektivnymi dobavkami. M.: Infra-Inzheneriya, 2014, 160 p.
- 13. Sanchez-Alonso E. et al. Evaluation of compactability and mechanical properties of bituminous mixes with warm additives. Construction and Building Materials, 2011, vol. 25, no. 5, pp. 2304–2311.
- 14. Vinogradova L.A., Gracheva Yu.N. The influence of universal additive BEST on the concrete properties. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET], 2018, vol. 80, no. 4, pp. 301–307. doi:10.20914/2310-1202-2018-4-301-307.
- 15.Vinogradova L.A. Effect of introducing poliplast SP-3 superplasticizer on the properties of concrete. glass and ceramics, publishing house Springer New York Consultants Bureau, 2018, vol. 75, no. 3–4, pp. 160–162.

Information about the authors

**Vinogradova, Lyubov A.** PhD, Assistant professor. E-mail: lavinogradova@ya.ru. Ivanovo State University of Chemistry and Technology. Russia, 153000, Ivanovo, Sheremetievskiy ave., 7.

**Rusakova, Yuliya P.** Bachelor student. E-mail: lafigleam@ya.ru. Ivanovo State University of Chemistry and Technology. Russia, 153000, Ivanovo, Sheremetievskiy ave., 7.

Received in January 2019

### Для цитирования:

Виноградова Л.А., Русакова Ю.П. Исследование влияния суперпластификатора СП-2ВУ на строительно-технологические показатели бетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №3. С. 93–99. DOI: 10.34031/article 5ca1f6338c33a9.58050025

#### For citation:

Vinogradova L.A., Rusakova Yu.P. The effect of superplasticizer SP-2VU on construction and engineering properties of concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 93–99. DOI: 10.34031/article 5ca1f6338c33a9.58050025

DOI: 10.34031/article 5ca1f6340f3497.49776836

### 1, \*Вендин С.В.

 $^{1}$ Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина Россия, Белгородская область, п. Майский \*E-mail: elapk@mail.ru

### К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ДИФФУЗИИ В СЛОИСТЫХ СРЕДАХ

Аннотация. Рассмотрены вопросы нестационарной диффузии в слоистых структурах. При разработке конструкций аппаратов для реализации массообменных процессов необходимо учитывать, свойства вещества и характер протекаемых процессов. Сроки проектирования значительно сокращаются, а КПД аппаратов получается выше, если удается построить хорошую физическую модель и применить математический анализ с учетом кинетики процессов. Трудности теоретического анализа и расчета массопереноса определяются сложностью механизма переноса к границе раздела фаз и от нее. Поэтому применяют упрощенные модели процессов массопереноса в которых механизм массоотдачи характеризуется сочетанием молекулярного и конвективного массопереноса. Многие важные практические задачи предполагают расчет нестационарной диффузии (второго закона Фика) для определенного объема вещества (веществ). Для качественной оценки процессов, в случае симметрии, объемные задачи можно рассматривать как одномерные задачи, т.е. зависящие от одной координаты. Предложено общее решение уравнения нестационарной диффузии для слоистых сред. При этом рассматривался случай нестационарных граничных условий третьего рода на внешней поверхности и граничных условий сопряжения четвертого рода для соприкасающихся слоев. Решение получено методом разделения переменных Фурье по собственным функциям задачи сприменением интеграла Дюамеля. Предложенная форма решения имеет явный вид и благодаря рекуррентной форме записи основных соотношений может быть полезной при численных расчетах.

Ключевые слова: нестационарная диффузия, закон Фика, слоистые структуры, нестационарные граничные условия третьего рода, граничные условия сопряжения четвертого рода.

Введение. Известно, что массообменные (диффузионные) процессы характеризуются переносом одного или нескольких веществ исходной смеси из одной фазы в другую через поверхность раздела фаз. В группу процессов, которые рассматриваются, как массообменные входит молекулярная диффузия распределяемого вещества. Молекулярная диффузия определяет процессы абсорбции, перегонки (ректификации), экстракции из растворов, растворение и экстракцию из пористых тел, кристаллизацию, адсорбцию и сушку. Химические (реакционные) процессы протекают со скоростью, определяемой законами химической кинетики. В тоже время химическим реакциям сопутствует перенос массы и энергии. Поэтому скорость реакций подчиняется законам макрокинетики и определяется наиболее медленным из последовательно протекающих химического взаимодействия и диффузии [1–4].

При разработке конструкций аппаратов для реализации указанных процессов необходимо учитывать, свойства вещества и характер протекаемых процессов. Сроки проектирования значительно сокращаются, а КПД аппаратов получается значительно выше, если удается построить хорошую физическую модель и применить математический анализ с учетом кинетики процессов.

Трудности теоретического анализа и расчета массопереноса определяются сложностью механизма переноса к границе раздела фаз и от нее.

Поэтому применяют упрощенные модели процессов массопереноса в которых механизм массоотдачи характеризуется сочетанием молекулярного и конвективного массопереноса. Среди моделей массопереноса следует выделить пленочную модель, модель диффузионного пограничного слоя, модель обновления поверхности фазового контакта и модифицированные модели обновленной поверхности. В любом случае основу всех моделей составляет основное уравнение массообмена, связывающее изменение концентрации вещества во времени с координатой точки в объеме вещества, а также условиями массобмена (диффузии) на свободных поверхностях и на границе соприкасающихся поверхностей с различной концентрацией вещества. Приходится идеализировать и упрощать рассматриваемую задачу, делая определенные допущения относительно начального распределения концентрации вещества и коэффициентов диффузии.

Аппараты реализующие массообменные процессы представляют собой объемные тела различной конфигурации, для которых требуется правильно подобрать геометрические размеры и технические параметры с учетом скорости протекания процессов и производительности оборудования.

Методология. Многие важные практические задачи предполагают расчет нестационарной диффузии (второго закона Фика) [1] для определенного объема вещества (веществ). Заметим, что для качественной оценки процессов, в случае симметрии, многие объемные задачи можно рассматривать как одномерные задачи, т.е. зависящие от одной координаты. В более ранних работах автора были рассмотрены аналитические решения однородной задачи нестационарной теплопроводности в слоистых структурах [5—13]. С учетом методического подхода, изложенного в этих работах, методом разделения переменных Фурье можно получить решение уравнения нестационарной диффузии для слоистых сред.

Основная часть. Ниже приведено общее решение уравнения нестационарной диффузии для слоистых сред. При этом рассматривался случай нестационарных граничных условий третьего рода на внешней поверхности и граничных условий сопряжения четвертого рода для соприкасающихся слоев.

$$\left[C_1(r,t) + h_1 \frac{\partial C_1(r,t)}{\partial r}\right]_{r=x_0} = \varphi_1(t)$$

Граничные условия сопряжения четвертого рода концентрационных полей и концентрационных потоков для соприкасающихся слоевв общем виде определяются следующим образом:

Одномерная задача нестационарной диффузии для слоистых сред в математической постановке должна определяться следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\frac{\partial C_i(r,t)}{\partial t} = D_i \nabla^2 C_i(r,t),$$

$$\mathbf{x}_{i-1} \le \mathbf{r} \le \mathbf{x}_i, \quad i = 1, 2, \dots n,$$
(1)

где  $C_i(r,t)$ , — концентрация вещества в і-м слое;  $D_i$ , — коэффициенты диффузии в і-м слое;  $x_0$ , — координаты нижней геометрической (свободной) поверхности объекта;  $x_n$  — верхней геометрической (свободной) поверхности объекта.

На внешних (свободных) поверхностях  $r = x_o$ ,  $r = x_n$  граничные условия определим как нестационарные граничные условия третьего рода:

$$\int_{r=x_n} \left[ C_n(r,t) + h_2 \frac{\partial C_n(r,t)}{\partial r} \right]_{r=x_n} = \varphi_2(t)$$
 (2)

$$\left|K_{i}C_{i}(r,t) = K_{i+1}C_{i+1}(r,t)\right|_{r=x_{i}}, \left|D_{i}\frac{\partial C_{i}(r,t)}{\partial r} = D_{i+1}\frac{\partial C_{i+1}(r,t)}{\partial r}\right|_{r=x_{i}} i = 12,\dots n-1,$$
(3)

где  $K_{i}$  – константа растворимости i- го слоя,

Распределение концентрационных полей в начальный момент времени в каждом слое  $C_i(r,0)$ имеет вид:

$$C_i(r,0) = f_i(r), i = 1, 2,...n,$$
 (4)

где  $f_{i}(r)$  – функция начального распределения концентрационных полей.

Искомое решение задачи (1) представим в виде суммы

$$C_i(r,t) = f_i(r) + v_i(r,t), \tag{5}$$

где  $v_i(r,t)$  — функции, которые являются решением задачи с нулевыми начальными условиями  $v_i(r,0)=0$ и удовлетворяют уравнениям (1)-(3).

Функции  $v_i(r,t)$  можно определить интегралом Дюамеля [14, 15]:

$$v_i(r,t) = \int_0^t \frac{\partial}{\partial t} \dot{v}_i(r,\tau,t-\tau) d\tau$$
, при t>0 (6)

где  $\dot{v}_i(r,\tau,t)$  — решение задачи при условии, что auявляется параметром.

После преобразования функции  $V_i(r,t)$  окончательно приобретают вид:

$$v_{i}(r,t) = \sum_{m=0}^{\infty} \left[ -\mu_{i,m}^{2} D_{i} \int_{0}^{t} A_{m}(\tau) \exp(\mu_{i,m}^{2} D_{i}\tau) d\tau \right] \dot{F}_{i,m}(\mu_{i,m}r) \exp(-\mu_{i,m}^{2} D_{i}t) , \qquad (7)$$

где  $\dot{F}_{i.m}(\mu_{i.m}r)$  – собственные функции задачи;

$$\dot{F}_{i,m}(\mu_{i,m}r) = \left[\prod_{k=1}^{i} Z_k\right] \times \left[Y_1(\mu_{i,m}r) + B_{i,m}Y_2(\mu_{i,m}r)\right], i = 1, 2, \dots n,$$
(8)

$$B_{1,m} = -\frac{Y_1(\mu_{1,m}x_0) + h_1 Y_1'(\mu_{1,m}x_0)}{Y_2(\mu_{1,m}x_0) + h_1 Y_2'(\mu_{1,m}x_0)},$$
(9)

$$B_{i,m} = -\frac{\frac{D_{i}}{K_{i}} \times \frac{Y_{1}'(\mu_{i,m}x_{i-1})}{Y_{1}(\mu_{i,m}x_{i-1})} - \frac{D_{i-1}}{K_{i-1}} \times \frac{Y_{1}'(\mu_{i-1,m}x_{i-1}) + B_{i-1}Y_{2}'(\mu_{i-1,m}x_{i-1})}{Y_{1}(\mu_{i-1,m}x_{i-1}) + B_{i-1}Y_{2}(\mu_{i-1,m}x_{i-1})} \times \frac{Y_{1}'(\mu_{i,m}x_{i-1})}{Y_{2}(\mu_{i,m}x_{i-1})} \times \frac{Y_{1}'(\mu_{i-1,m}x_{i-1}) + B_{i-1}Y_{2}'(\mu_{i-1,m}x_{i-1})}{Y_{1}(\mu_{i-1,m}x_{i-1}) + B_{i-1}Y_{2}(\mu_{i-1,m}x_{i-1})} \times \frac{Y_{1}'(\mu_{i,m}x_{i-1})}{Y_{2}(\mu_{i,m}x_{i-1})}, (10)$$

$$Z_{1} = I_{1} Z_{i} = \frac{K_{i-1}}{K_{i}} \times \frac{Y_{1}(\mu_{i-1,m} x_{i-1}) + B_{i-1} Y_{2}(\mu_{i-1,m} x_{i-1})}{Y_{1}(\mu_{i,m} x_{i-1}) + B_{i} Y_{2}(\mu_{i,m} x_{i-1})}, i = 2,3,...n.$$
(11)

Собственные функции задачи  $\mu_{i,m} = \mu_{n,m} \sqrt{D_n/D_i}$  и  $\mu_{n,m}$  определяются как корни трансцендентного уравнения:

$$Y_1(\mu_{n,m}x_n) + h_2Y_1'(\mu_{n,m}x_n) + B_{n,m}[Y_2(\mu_{n,m}x_n) + h_2Y_2'(\mu_{n,m}x_n)] = 0, m = 0,1,2,... (12)$$

Коэффициенты  $A_m(\tau)$  при собственных функциях задачи определяются условиями ортогональности функций, которые выполняются следующим образом:

$$A_{m}(\tau) = -\left[\sum_{i=1}^{n} K_{i} \int_{x_{i-1}}^{x_{i}} \psi_{i}(r,\tau)G(r)\dot{F}_{i,m}(\mu_{i,m}r)dr\right] / \sum_{i=1}^{n} \dot{J}_{i}^{2},$$
(13)

$$\psi_i(r,\tau) = \varphi_1(\tau) + \dot{\alpha}_i(\tau) [\varphi_2(\tau) - \varphi_1(\tau)] \times [\xi(r) + \dot{\beta}_i(\tau)], \tag{14}$$

$$\dot{\beta}_{1}(\tau) = -\left[\xi(x_{0}) + h_{1}\xi'(x_{0})\right], \dot{\beta}_{i}(\tau) = \frac{D_{i}K_{i-1}}{D_{i-1}K_{i}} \times \left[\xi(x_{i-1}) + \dot{\beta}_{i-1}\right] - \xi(x_{i-1}), i = 2,3,...n \quad (15)$$

$$\dot{\alpha}_{i} = \frac{D_{n}}{D_{i}} \times \frac{1}{\xi(x_{n}) + \dot{\beta}_{n}(\tau) + h_{2}\xi'(x_{n})} \qquad i = 1, 2, ... n.$$
(16)

$$\dot{J}_{i}^{2} = K_{i} \int_{x_{i-1}}^{x_{i}} G(r) \dot{F}_{i,m}^{2}(\mu_{i,m}r) dr.$$
(17)

Конкретный вид функций  $\xi(r)$  и  $\dot{F}_i(\mu_i r)$  а). Декартова (прямоугольная) система координат: динат: стемах координат определяются выражениями:

$$G(r) = 1, \xi(r) = r, Y_1(\mu_i r) = \sin(\mu_i r), Y_2(\mu_i r) = \cos(\mu_i r).$$
(18)

б). Сферическая система координат:

$$G(r) = r^2, \xi(r) = \frac{1}{r}, Y_1(\mu_i r) = \frac{1}{r}\sin(\mu_i r), Y_2(\mu_i r) = \frac{1}{r}\cos(\mu_i r).$$
(19)

в). Цилиндрическая система координат:

$$G(r) = r, \xi(r) = \ln r, Y_1(\mu_i r) = J_0(\mu_i r), Y_2(\mu_i r) = N_0(\mu_i r).$$
 (20)

Следует заметить, что при решении задач для шара или цилиндра полученное решение требует ограниченности в центре шара или на оси

цилиндра. Тогда для граничных условий на свободных поверхностях необходимо вместо (2) использовать другую форму записи:

$$\left[\frac{\partial C_1(r,t)}{\partial r}\right]_{r=x_0} = 0 \quad \left[C_n(r,t) + h_2 \frac{\partial C_n(r,t)}{\partial r}\right]_{r=x_n} = \varphi_2(t)$$
 (21)

Кроме того, в общем решении вместо (9) и (14) также следует полагать:

$$B_{1,m} = 0, \psi_i(r,\tau) = \varphi_2(\tau), i=1,2...n$$
 (22)

Остальные расчеты проводятся в соответствии с основным решением.

**Выводы.** В заключение отметим, что представленные выше выражения определяют общее решение уравнения нестационарной диффузии для слоистых сред при нестационарных граничных условиях третьего рода на внешней поверхности и граничных условиях сопряжения четвертого рода для соприкасающихся слоев.

На практике могут встречаться различные случаи физической и математической постановки задачи нестационарной диффузии для слоистых сред. Однако для одномерного случая различные частные решения могут быть сразу же определены с учетом условий (2), а также выражений (4), (5), (7) и (21) – (22).

Предложенная форма решения имеет явный вид и благодаря рекуррентной форме записи основных соотношений может быть полезной при численных расчетах и анализе кинетики нестационарнойдиффузии в многослойных средах.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. М.: КолосС, 2010. 478 с.
- 2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. 753 с.
- 3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов аппаратов химической технологии. СПб.: Химиздат, 2009. 544 с.
- 4. Романков П.Г., Фролов В.Ф. Массообменные прцессы химической технологии. Системы с дисперсной твердой фазой. Л.: Химия, 1990. 388 с.
- 5. Вендин С.В. К расчету нестационарной теплопроводности в многослойных объектах при граничных условиях третьего рода // ИФЖ, 1993. Т.65. №2. С. 249–251.

- 6. Vendin S.V. Calculation of nonstationary heat conduction in multilayer objects with boundary conditions of the third kind // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 1993. T. 65. № 2. C. 823.
- 7. Вендин С.В., Щербинин И.А. К решению задач нестационарной теплопроводности в слоистых средах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 3. С. 96–99.
- 8. Vendin S. On the Solution of Problems of Transient Heat Conduction in Layered Media // International Journal of Environmental and Science Education. 2016. V. 11. № 18. Pp. 12253–12258.
- 9. Вендин С.В., Мамонтов А.Ю. Расчет мощности дополнительных источников теплоты для подогрева биомассы в биогазовом реакторе // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 7. С. 97–99.
- 10. Вендин С.В. К решению некоторых краевых задач нестационарной теплопроводности в слоистых средах методом разделения переменных // В сборнике: Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений, посвящённых 105-летию академика А.В. Лыкова. Москва, 2015. С. 78—80.
- 11. Вендин С.В. Решение задачи нестационарного нагрева слоистых материалов // В сборнике:Проблемы и перспективы инновационного развития агротехнологий. Материалы XX Международной научно-производственной конференции. Майский: Белгородский ГАУ, 2016. С. 15–16.
- 12. Вендин С.В. Теория и математические методы анализа тепловых процессов при СВЧ обработке семян. М.: ОАО «Центральный коллектор библиотек «БИБКОМ», ООО «ТРАНСЛОГ», 2016. 143 с.
- 13. Vendin S.V. On Solving the Problems of Nonstationary Diffusion in Layered Environments // International Journal of Applied Engineering Research. ISSN 0973-4562. Volume 12. Number 22 (2017). Pp. 12272–12274.
  - 14. Карташов Э.М. Аналитические методы в

теории теплопроводности твердых тел: Учеб. Пособие. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2001. 550 с. ISBN 5-06-004091-7.

15. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 835 с.

Информация об авторах

**Вендин Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электрооборудования и электротехнологий в АПК. E-mail: elapk@mail.ru. Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина. Россия, 308503, Белгородская обл., Белгородский р-н, п. Майский, ул. Вавилова, д. 1.

Поступила в декабре 2018 г. © Вендин С.В., 2019

### 1,\*Vendin S.V.

<sup>1</sup>Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin Russia, 308503, Belgorod Region, Belgorod District, Maysky Settlement, ul. Vavilova, d. 1 \*E-mail: elapk@mail.ru

### TO THE SOLUTION OF ISSUES OF NONSTATIONARY DIFFUSION IN LAYERED ENVIRONMENTS

Abstract. The issues of nonstationary diffusion in layered structures are considered. When designing the devices for implementing mass transfer processes, it is necessary to take into account the properties of the substance and the nature of the processes. Design time reduces significantly and the efficiency of the devices is higher if a good physical model is built and a mathematical analysis with kinetics of the processes is applied. The difficulties of theoretical analysis and calculation of mass transfer are determined by the complexity of the transfer mechanism to and from the phase boundary. Therefore, simplified models of mass transfer processes are used in which the mass transfer mechanism is characterized by a combination of molecular and convective mass transfer. Many important practical problems involve the calculation of nonstationary diffusion (Fick's second law of diffusion) for a certain volume of substance (substances). For qualitative evaluation of processes, in the case of symmetry, volumetric issues can be considered as one-dimensional tasks, i.e. dependent on one coordinate. The general solution of the non-stationary diffusion equation for layered environments is proposed. The case of non-stationary boundary conditions of the third kind on the external surface and boundary conditions of the fourth kind conjugation for contiguous layers has been considered. The solution is obtained by separating the Fourier variables by the eigenfunctions of the problem using the Duhamel integral. The proposed solution is explicit and due to the recurrent form of the basic relations can be useful in numerical calculations

**Keywords:** nonstationary diffusion, Fick's law, layered structures, nonstationary boundary conditions of the third kind, boundary conditions of conjugation of the fourth kind.

### **REFERENCES**

- 1. Rudobashta S.P., Kartashov E.M. Diffusion in chemical-technological processes. M.: KolossS, 2010, 478 p.
- 2. Kasatkin A.G. The main processes and apparatuses of chemical technology. M.: OOO TID "Alliance", 2004, 753 p.
- 3. Romankov P.G., Frolov V.F., Flisyuk OM Methods for calculating the processes of chemical technology apparatuses. SPb.: Himizdat, 2009, 544 p.
- 4. Romankov P.G., Frolov V.F. Mass transfer processes of chemical technology. Systems with a dispersed solid phase. L.: Chemistry, 1990. 388 p.
- 5. Vendin S.V. To the calculation of non-stationary heat conduction in multilayer objects with boundary conditions of the third kind. IFZH, 1993, vol. 65, no. 2, pp. 249–251.

- 6. Vendin S.V. There are also a number of problems in the field of thermal engineering and thermophysics, 1993, vol. 65, no. 2, pp. 823.
- 7. Vendin S.V., Scherbinin I.A. To solving problems of non-stationary heat conduction in layered media. Bulletin of Belgorod State Technological University V.G. Shukhov, 2016, № 3, pp. 96-99.
- 8. Vendin S. Conduction in Layered Media. International Journal of Environmental and Science Education, 2016, vol. 11, no. 18, pp. 12253–12258.
- 9. Vendin S.V., MamontovA.Yu. Calculation of the power of additional heat sources for heating biomass in a biogas reactor. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2017, no. 7, pp. 97–99.
- 10. Vendin S.V. Towards solving some boundary problems of unsteady heat conduction in layered media by separating variables. In collection: Actual problems of drying and thermo-moisture treatment

of materials in various industries and the agro-industrial complex; Lykov. Moscow, 2015, pp. 78–80.

- 11. Vendin S.V. Solution of the problem of nonstationary heating of layered materials. In the collection: Problems and prospects of innovative development of agricultural technologies. Proceedings of the XX International Scientific and Production Conference. Maysky: Belgorod State Agrarian University, 2016, pp. 15–16.
- 12. Vendin, S.V. Theory and mathematical methods for the analysis of thermal processes in the microwave treatment of seeds. M..: OJSC Central Library Collector BIBKOM, TRANSLOG LLC, 2016, 143 p.
- 13. Vendin S.V. International Journal of Applied Engineering Research On Solving the International. Journal of Applied Engineering Research, 2017, vol. 12, no. 22, pp. 12272–12274
- 14. Kartashov E.M. Analytical methods in the theory of thermal conductivity of solids: Proc. Benefit. Ed. 3rd, Pererab. and add. M.: Higher School, 2001, 550 p.
- 15. Korn G., Korn T. Mathematics Handbook for Scientists and Engineers. M.: Nauka, 1984, 835 p.

Information about the authors

**Vendin, Sergey V.** DSc, Professor. E-mail: elapk@mail.ru. Belgorod State Agrarian University. V.Ya. Gorina. Russia, 308503, Belgorod Region, Belgorod District, Maysky Settlement, ul. Vavilova, d. 1.

Received in Desember 2018

### Для цитирования:

Вендин С.В. К решению задач нестационарной диффузии в слоистых средах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 100–105. DOI: 10.34031/article 5ca1f6340f3497.49776836

#### For citation:

Vendin S.V. To the solution of issues of nonstationary diffusion in layered environments. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no 3, pp. 100–105. DOI: 10.34031/article 5ca1f6340f3497.49776836

# **МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

DOI: 10.34031/article\_5ca1f6347299b0.43047357
<sup>1,\*</sup>Круглова Т.Н.

<sup>1</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова Россия, 346421, г. Новочеркасск, ул. Просвещения 132

\*E-mail:tatyana.kruglova.02@mail.ru

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ

Аннотация. Основными элементами технологического оборудования, в значительной степени определяющими его надёжность и эффективность функционирования, являются электродвигатели постоянного и переменного тока. Поэтому постоянный контроль их технического состояния с помощью методов технического диагностирования позволит существенного продлить ресурс оборудования и сократить финансовые издержки. Для реализации данного подхода необходимы специализированные методы, позволяющие с высокой степенью достоверности определять техническое состояние электродвигателей постоянного и переменного тока, отличая их неисправное состояние от изменения режима работы. Диагностика должна выполняться в режиме функционирования оборудования, поэтому применение сложных измерительных устройств не допустимо. В данной статье приведены результаты поисковых исследований метода диагностирования, удовлетворяющих вышеперечисленным требованиям. В качестве диагностических параметров выбраны ток, напряжение и вибрация анализ которых предлагается осуществлять с помощью вейвлет преобразования. В результате многочисленных экспериментов установлена зависимость между изменениями коэффициентов вейвлет преобразования на характерных масштабах, позволяющая однозначно определить техническое состояние электродвигателя и режим его нагрузки, на основе которой разработан метод диагностирования с применением нейронной сетей.

**Ключевые слова:** диагностика электропривода, нейросетевой метод, вейвлет преобразование, режим работы привода.

Введение. Длительная эксплуатация электродвигателей приводит к их износу и появлению различного рода дефектов, которые могут стать причиной длительных простоев и финансовых издержек. Одним из способов решения данной проблемы является контроль их текущего состояния с помощью методов диагностирования, позволяющих отнести текущее состояние объекта к одному из заранее определенных классов диагнозов и определить места возникших дефектов. Для реализации данных методов целесообразно выбрать функциональный подход, позволяющий выявлять состояние объекта без вывода его из режима эксплуатации. Выбранные диагностические параметры должны выявлять все возникшие неисправности электродвигателя, быть просты для измерения и анализа. При этом диагностирование целесообразно производить в режиме on-line, поэтому применение сложного дорогостоящего оборудования, оказывающего влияние на технологический процесс не допустимо. Данным требованиям полностью отвечает ток, потребляемый двигателем, так как позволяет без применения датчиков найти все основные неисправности двигателя и сопряженного с ним оборудования

[1–3]. Традиционным методом анализа токового сигналаявляется преобразование Фурье [4], имеющее ряд существенных недостатков [5], не позволяющих его применение для автоматического диагностирования электроприводов, функционирующих при динамических нагрузках. Поэтому задача синтеза метода диагностирования, позволяющего с высокой степенью точности определить текущее состояние объекта, отличив изменение нагрузки от неисправности и найти все возникшие дефекты, весьма актуальна.

**Методика.** Целью данного исследования является синтез метода диагностирования, позволяющего с высокой степенью достоверности найти неисправность и отличить ее от изменения режима работы привода.

В настоящее время накоплен значительный объем знаний по поиску неисправностей электродвигателей с применением Фурье – преобразований, рассчитаны характерные частоты для всех основных неисправностей.

Наиболее применимыми типами двигателей в промышленности являются асинхронные двигатели средней мощности и двигатели постоянного тока. Такие двигатели часто работают в

кратковременном режиме и должны иметь высокую перегрузочную способность, а также быть пыле- и водонепроницаемыми. Имеющаяся ста-

тистика (табл. 1) [6, 7] показывает, что все неисправности двигателей вышеупомянутых типов имеют механическое или электрическое происхождение.

Таблица 1

### Статистика повреждаемости электродвигателей

Тип двигателя	Основные неисправности электродвигателей	Статистика
		повреждаемости, %
Двигатель пере-	Разряд и искрение в токоопроводе	40
менного тока	Разряд и искрение в изоляторе. Нагрев клеммной коробки	20
	Повреждение изоляции в обмотке статора	15
	Искрение в магнитном сердечнике. Нагрев зоны дефекта	10
	Повреждение подшипников	9
	Повреждение изоляции кабеля	4
	Искрение в обмотке ротора	2
Двигатель посто-	Дефекты коммутиции	15
янного тока	Дефекты ротора	48
	Пульсация напряжения питания выпрямителя	12
	Дефекты статора	25

Анализ гармоник питающего тока заключается в разложении сигнала с использованием преобразования Фурье и амплитудного анализа на характеристических частотах (табл. 2). Каждый де-

фект имеет свои собственные характерные частоты, включая субгармоники питающей ( $^{f_s}$ ) и оборотной ( $^{f_{rot}}$ ) частот.

Таблица 2

### Характерные частоты токового сигнала

Тип двигателя	Неисправности двигателей	Частотасигналатока
Двигатель	Дефекты коммутации	$2 \cdot k \cdot p \cdot f_{rot}$
постоянного тока	Дефекты ротора	$2 \cdot p \cdot f_{rot} (\mathbf{k} \pm) \cdot p \cdot f_{rot}$
	Пульсация напряжения питания	$k \cdot f_s$
	Дефекты статора	$k\!\cdot\! f_{rot}$
Асинхронный	Дефекты статора	$k \cdot f_{rot}$
электродвигатель	Дефекты подшипников	$\frac{1}{4} \cdot f_{rot}; \frac{1}{2} \cdot f_{rot}; f_{rot}; 1, 5 \cdot f_{rot}$
	Несоосность или отсутствие параллельности	$f_{rot}$ ; $3 \cdot f_{rot}$ ; $5 \cdot f_{rot}$
	валов двигателя и механизма	

где k = 1,2,3 — номер гармоники тока; p — число полюсов.

Для решения поставленной задачи предполагается применять вейвлет анализ сигналов, который рассматривает анализируемые временные функции в терминах колебаний, локализованных по времени и частоте, обеспечивая двухмерную развертку одномерных сигналов. При этом частота и координата рассматриваются как независимые переменные, что дает возможность анализа сигналов сразу в двух пространствах. Вейвлет функции базиса позволяют сконцентрировать внимание на тех или иных локальных особенностях анализируемых процессов, которые не

могут быть выявлены с помощью традиционных преобразований Фурье и Лапласа.

Вейвлет преобразование сигнала — это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций [8—10]

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi(\frac{t-b}{a}), \tag{1}$$

сконструированных из материнского (исходного) вейвлета $\psi(t)$ , обладающего определенными свойствами, за счет операций сдвига во времени b и изменения временного масштаба a. Множитель  $1/\sqrt{a}$ обеспечивает независимость нормы этих

функций от масштабирующего числа a. Малые значения, a соответствуют мелкому масштабу  $\psi_{ab}(t)$ или высоким частотам ( $\omega \sim 1/a$ ), большие параметры a— крупному масштабу  $\psi_{ab}(t)$ , т.е. растяжению материнского вейвлета  $\psi(t)$  и сжатию его спектра. Таким образом, масштаб вейвлета, как единица шкалы частотно-временного представления сигналов, обратно пропорционален частоте.

Предполагается, что применение вейвлет преобразования позволят произвести более точную идентификацию состояния электропривода, отличив неисправное состояние от изменения нагрузки, и выявить все его неисправности. Перерасчет ча-

стот Фурье спектра в масштаб вейвлета [11] позволит перевести анализ сигналов в вейвлет пространство и найти новые характеристики сигнала, которые невозможно выявить с помощью Фурье-анализа. Для синтеза метода анализа токового сигнала с помощью вейвлет преобразования необходимо произвести ряд экспериментальных исследований, по результатам анализа которых планируется разработать модель диагностирования технического состояния, позволяющую отличить неисправное состояние объекта от изменения режима его работы.

**Основная часть.** Для проведения экспериментальных исследований использован стенд, показанный на рис 1.

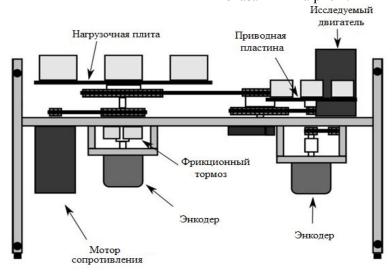


Рис. 1. Лабораторный стенд

Система включает два одинаковых бесщеточных двигателя постоянного тока PITTMAN 5413 (напряжением 38,2В), соединенных ременной передачей. Один двигатель является ведущим, второй нагрузочным. Для создания сопротивления вращению ведущего мотора, включается нагрузочный двигатель, который вращается в противоположную сторону. Регулирование силы сопротивления возможно с помощью изменения скорости вращения нагрузочного мотора, а также с помощью установки дополнительных грузов на нагрузочную пластину, жестко соединенную с валом двигателя сопротивления через зубчатую шестерню.

Спектральный анализ потребляемого тока позволяет осуществлять диагностику электродвигателя и связанных с ним механических устройств, при котором в течение заданного интервала времени производят запись значений токов, потребляемых электродвигателем. Полученный сигнал, с помощью быстрых преобразований Фурье, переводится в частотную форму, выделяются частоты, характерные для неисправностей

привода и осуществляется спектральный анализ полученного сигнала.

Для анализа состояния привода снимается токовый сигнал нового, заведомо исправного привода, который принимается за эталон. Поиск неисправностей осуществляется на характерных частотах [12] (табл. 2) путем интеллектуального сопоставления текущего спектра с эталонным спектром. Из данной таблицы видно, что все характерные частоты являются составляющими частоты вращения двигателя или частоты сети, питающей выпрямитель (50 Гц). Разложение временного токового сигнала в ряд Фурье и анализ амплитуд на данных характерных частотах позволит выявить неисправности объекта. Однако процесс анализа весьма трудоемок и не позволит отличить неисправное состояние двигателя от изменения режима его работы. Поэтому, для дальнейшего анализа, необходимо произвести перерасчет характерных частот Фурье анализа в масштаб вейвлета. В качестве материнской функции может быть выбрана любая, соответствующая требованиям к вейвлету. В табл. 3 представлен результат пересчитав масштаб вейвлета Морле.

Таблица 4

Из приведенной таблицы видно, что диапазон характерных масштабов вейвлета находится в диапазоне до 400, поэтому все вычисления целесообразно вести в диапазоне масштабов от 1 до 400.

Условия проведения экспериментальных исследований приведены в табл. 4.

Таблица 3 Соотношение характерных частот Фурье преобразования и масштаба вейвлета

Неисправность	Частота Фурье спектра	Масштаб вейвлетаМорле
Дефекты коммутации	24	48
	48	24
	72	16
Дефекты ротора	24	48
	27	43
	30	39
	33	35
Пульсации напряжения питания	50	23
	100	12
	150	8
Дефекты статора	3	386
	6	193
	9	129

Условия проведения экспериментальных исследований

Номер	Скорость вращения диагности-	Состояние диагностируемого	Скорость вращения
опыта	руемого привода	руемого привода привода	
1	3 Гц	Исправен	Отключен
2	3 Гц	Исправен	1 Гц
3	3 Гц	Сопротивление 2 Ом	Отключен
		в фазе обмотки статора	
4	3 Гц	Сопротивление 2Ом	1 Гц
		в фазе обмотки статора	

Полученные временные сигналы тока и напряжения двух фаз двигателя были разложены с помо-

щью вейвлета Морле в выбранном диапазоне масштабов и произведен сравнительный анализ полученных результатов (рис. 2).

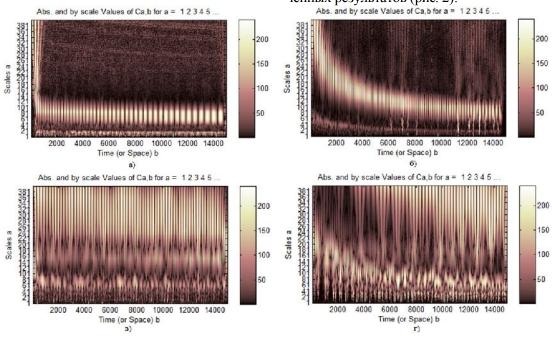


Рис. 2. Скейлограммы двигателей: (a) исправный без нагрузки,(б) исправный с нагрузкой, (в) неисправный без нагрузки, (г) неисправной с нагрузкой

Из приведенных скейлограмм видно, что анализируемый сигнал имеет пик при пуске двигателя, а далее идет ровной синусоидой в диапазоне масштабов до 120. Коэффициенты на более высоких масштабах, характерных низким частотам двигателя значительно ниже, чем в данном диапазоне (рис. 2, а). При появлении нагрузки происходит растягивание скейлограммы, и активная область имеет вид гиперболы, при этом активны более высокие масштабы в первые секунды работы двигателя (рис. 2, б). Скейлограмма неисправного ненагруженного двигателя (рис. 2, в) имеет значительно более высокие значения вейвлет коэффициентов на всем диапазоне масштабов, при этом увеличение масштабов, характерных основному сигналу с 120 до 220, а значение коэффициентов на этих частотах ниже, чем

на более высоких масштабах, следовательно, сигнал неисправного двигателя имеет более низкую частоту, чем исправного. Скейлограмма неисправного нагруженного двигателя (рис. 2, г) имеет высокие вейвлет коэффициенты на всем диапазоне анализа, однако, рисунок основного сигнала также имеет вид гиперболы, которая более растянута по масштабу вейвлета, чем у исправного нагруженного двигателя (рис. 2, б). Вейвлет коэффициенты, показывающие локализацию основного сигнала ниже, чем на нехарактерных масштабах.

Для определения состояния двигателя проводится анализ вейвлет коэффициентов на характерных масштабах (табл. 3). Анализ показал, что временная зависимость вейвлет коэффициентов, характерных неисправностям статора существенного отличаются от прочих масштабов (рис. 3).

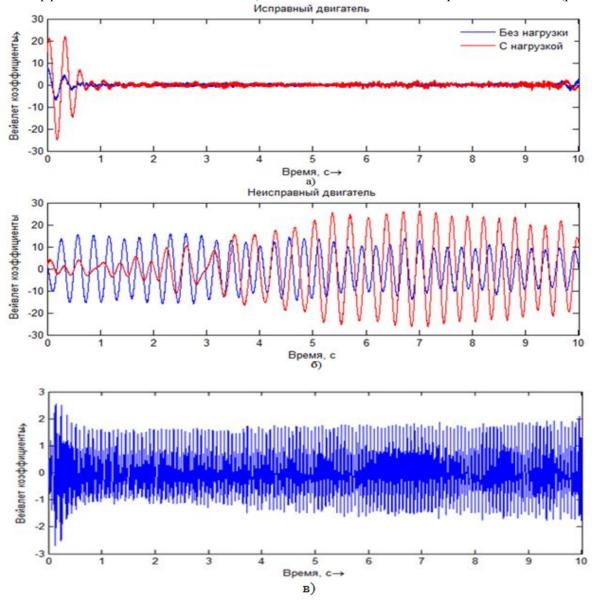


Рис. 3. Вейвлет коэффициенты питающего тока: (a) характерный масштаб исправный двигатель, (б) характерный масштаб неисправный двигатель, (в) нехарактерный масштаб

Из данных графиков видно, что коэффициенты вейвлетов на характерных масштабах исправных и неисправных двигателей значительно отличаются друг от друга. С исправным ненагруженным двигателем они имеют незначительные колебания при запуске, затем процесс практически линеаризуется. Когда возникает нагрузка, колебательный процесс при запуске двигателя более выражен, но затем уменьшается с повторением с определенной периодичностью. Несмотря на то, что процесс стабилен, не происходит значительного увеличения амплитуды колебаний во времени (рис. 3, а). Коэффициенты вейвлет преобразования неисправного двигателя значительно ниже исправных и имеют постоянные колебания. Это явление усиливается при появлении нагрузки (рис. 3, б). График вейвлет коэффициентов на нехарактерном масштабе для неисправного и неисправного двигателя идентичен (рис. 3, в). Сигнал имеет высокую плотность и малые значения вейвлет-коэффициентов, в то время как сигнал является регулярным и полностью повторяется с определенной частотой следования. Эта закономерность сохраняется для тока, напряжения и вибрации для приводов постоянного тока, работающих на различной частоте при различной нагрузке. Следовательно, полученные пять характерных сигналов могут быть использованы для разработки системы диагностирования электродвигателей, например, на основе подхода искусственного интеллекта. Для это необходимо разработать метод автоматического анализа сигналов без привлечения эксперта. Одним из подходов к решению этой проблемы является разработка нейронной сети классификации сигналов [13]. В качестве исходных данных значения вейвлет-коэффициентов используются по характерной шкале, нехарактерной для отказа (рис. 3). В качестве входных данных приводится матрица, содержащая пять строк характеристических сигналов. Выход сети является классом диагностики: «1» – нормальный, «2» – неисправный.

Для автоматического определения технического состояния электропривода без привлечения специалиста-эксперта целесообразно разработай нейронную сеть классификации [13–15]. В качестве исходных данных используются значения вейвлет коэффициентов на характерном и нехарактерный сигнал (рис. 3). В качестве входа задается матрица, содержащая пять строк характерных сигналов. Выходом сети является класс диагноза: «1» – объект исправен, «2» – объект неисправен.

Для классификации технического состояния объекта, моделируется нейронная сеть прямой передачи сигнала, имеющая структуру, приведенную на рис. 4.

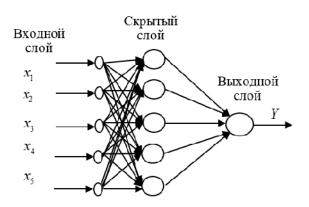


Рис. 4. Структура нейронной сети классификации технического состояния электропривода

Сеть содержит два слоя: скрытый и выходной. Скрытый слой имеет пять нейронов с тангенциальной функцией активации, выходной один линейный нейрон.

Для обучения нейронной сети использован алгоритм Левенберга-Марквардта [16], предназначенный для оптимизации параметров нелинейных регрессионных моделей. Этот алгоритм заключается в последовательном приближении заданных начальных значений параметров к требуемому локальному оптимуму. Установлен обучающий выбор, состоящий из множества пар свободной переменной  $x \in X^M$  (входные данные сети) и зависимой переменной  $y \in Y^M$  (целевой вектор).

Установлена функциональная зависимость, представляющая регрессию  $u = f(\omega x)_n$ , непрерывно дифференцируемую в области W × X. Параметр  $\omega$  является вектором весовых коэффициентов.

Требуется найти такое значение вектора  $\omega$ , которое поставило бы локальный минимум функции ошибки:

$$E_{D} = \sum_{n=1}^{N} ((y_{n} - ))^{n} \omega x_{n}^{2}$$
 (2)

Перед началом работы алгоритма задается начальный вектор весовых коэффициентов ω.

На каждом шаге итерации этот вектор заменяется вектором  $\omega + \Delta \omega$ . Для оценки приращения  $\Delta \omega$  используется линейная функция:

$$f(\omega + \Delta \omega)x_n \approx f(\omega, x) + J\Delta\omega$$
 (3)

где J – Якобиан функции $f(\omega, x_n)$ в точке  $\mathcal{O}$ , который может быть представлен наглядно в виде:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(\omega x)(x, y)}{\partial \omega_{R}} & \frac{\partial f(\omega x_{1})}{\partial \omega_{R}} \\ \dots & \dots \\ \frac{\partial f(\omega x)(x, y)}{\partial \omega_{R}} & \frac{\partial f(\omega x_{N})}{\partial \omega_{R}} \end{bmatrix}$$
(4)

где  $\omega = [\omega_1, ...\omega_R]^T$  – вектор весов сети.

Приращение  $\Delta \omega$  в точке  $\omega$ , поставляющий минимум  $E_{\!D}$ , равно нулю, поэтому для нахождения последующего значения приращения  $\Delta \omega$ 

 $|y-f(\phi(+)\phi(-))\rangle = y+f \omega + \Delta \omega^T y - f \omega + \Delta \omega$  получим:

$$\frac{\partial E_D}{\partial \omega} = (\mathbf{y}(\bar{t})\mathbf{y}0\Delta\omega - \mathbf{J}^T \quad \mathbf{y} - f \quad \omega \quad = \quad (8)$$

Таким образом, чтобы найти значение  $\Delta \omega$ , необходимо решить систему линейных уравнений

$$\Delta\omega = (\mathcal{J}(\mathcal{J}))^{1} \mathcal{J}^{T} y - f \omega \tag{9}$$

Поскольку число условий матрицы  $J^T J$  является квадратом числа условий матрицы J, то матрица  $J^T J$  может быть вырожденной, следовательно, параметр регуляризации Маркварда  $\lambda \geq 0$ 

$$\Delta\omega = (J(I))^{1}J^{T} y - f \omega , \qquad (10)$$

где I — единичная матрица.

Этот параметр задается на каждой итерации алгоритма. Если значение ошибки  $E_{\!D}$  уменьшается быстро, малое значение  $\lambda$  сводит этот алгоритм к алгоритму Гаусса-Ньютона.

Алгоритм останавливается в том случае, если приращение  $\Delta \omega$  на последующей итерации меньше существующего значения или если вектор весовых коэффициентов  $E_D$  дает ошибку меньше заданной или если количество циклов обучения нейронной сети исчерпано. Значение вектора  $\omega$  на последней итерации считается обязательным.

Результаты обучения нейронной сети (рис. 4) для полученных экспериментальных данных представлены на рис. 5.

Для тестирования обученной сети, на вход поочередно были поданы образцы обучающей выборки, и сеть безошибочно отнесла их к заданному классу. Далее, на вход нейросети были поданы значения вейвлет коэффициентов на всех характерных масштабах (табл. 2) исправного не-

приравниваться к нулю вектор частных производных  $E_{\!\!D}$  по весу  $\omega$  . Для этого представим (2) в виде

$$E_D = \left| y - f(\mathbf{w} + \Delta \omega) \right|^2 \tag{5}$$

где 
$$y = [y_1, \dots, y_N]^T$$
 и

$$f(\phi, + \Delta\omega + (f)\omega + \Delta\omega x_1 \quad f \quad \omega + \Delta\omega x_N]^T$$

Преобразование и дифференцирование этого уравнения:

$$|y - f(\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{\theta}))\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{\theta})|^2 = y + (y + \Delta \omega)^T y - f(\omega + \Delta \omega) = f^T(\omega + \Delta \omega) f(\omega) - y^T f(\omega + \Delta \omega) + y^T y$$
 (7)

нагруженного двигателя и сеть отнесла все масштабы к классу «1» - исправен. Затем аналогичным образом на вход сети подавались значения для исправного нагруженного привода (частота вращения мотора сопротивления 1Гц) и сеть отнесла его к первому классу.

Анализ неисправного ненагруженного и неисправного нагруженного (частота вращения мотора сопротивления 1Гц) показал, что масштабы 386, 193 и 129 вейвлет разложения относятся к классу «2» — неисправен, а все остальные, к классу «1» — исправен, что свидетельствует о наличии неисправности статора. Аналогичные испытания были выполнены на исправном и неисправном двигателе при частоте вращения мотора сопротивления 0,2 Гц,0,4 Гц, 0,6 Гц и 0.8 Гц. Во всех случаях нейронная сеть правильно определила состояние объекта.

Далее аналогичный эксперимент был произведен для вейвлетов Добеши 10 порядка, Харра, Мексиканская шляпа и Гаусса. Выполнен перерасчет частот Фурье преобразования в масштабы этих вейвлетов. Подстановка вейвлет коэффициентов на данных характерных масштабов в обученную нейронную сеть позволил безошибочно идентифицировать неисправность объекта. Это свидетельствует о правильности теоретических выкладок и адекватности разработанной нейросетевой модели диагностирования.

Следующая часть экспериментов проводилось на основе данных асинхронного двигателя (рис. 6).

Эксперимент также проводился для исправного и неисправного двигателей в нагруженном и ненагруженном режимах. В качестве неисправности, в фазу обмотки статора введено сопротивление 15 Ом которое эквивалентно замыканию витков обмотки статора. Эта неисправность может быть определена по первым трем гармоникам оборотной частоты (табл. 2). Вейвлет-коэффициенты тока и напряжения на этих частотах

подавались в обученную нейронную сеть (рис. 4), которая безошибочно классифицировала исправный двигатель – к классу «2». Анализ других характерных масштабов обоих двигателей показал, что состояние двигателя относится к классу «1». Та-

ким образом, полученная нейронная сеть позволяет определить техническое состояние и причину отказа. Полученный результат показывает, что предложенная нейронная сеть может быть применена для диагностирования двигателей постоянного и переменного тока.

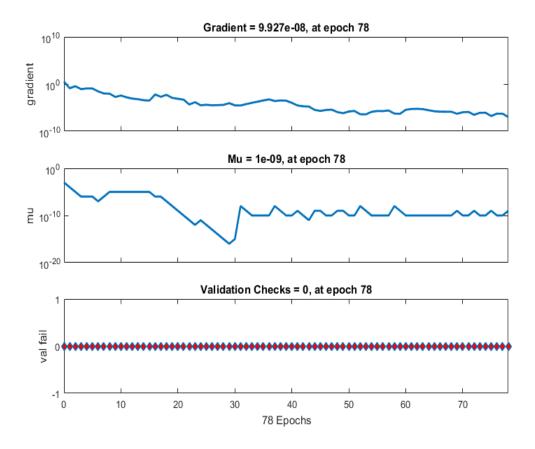


Рис. 5. Результаты обучения нейронной сети для определения технического состояния и режима работы

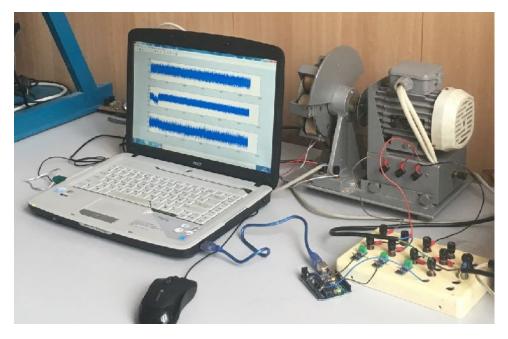


Рис. 6. Лабораторный стенд диагностирования асинхронного двигателя

Выводы. Задачей проведенных исследований являлся синтез метода диагностирования двигателей постоянного и переменного тока, позволяющего с высокой степенью точности, найти неисправность объекта, отличив ее от изменения нагрузки. Для этого произведен ряд экспериментальных исследований, позволивших выявить закономерность между изменением технического состояния и нагрузки электродвигателей и значениями вейвлет коэффициентов на характерных масштабах электродвигателей. На основе выявленной закономерности была разработанная нейронная сеть, которая позволяет определять текущее техническое состояние электродвигателя и режим его работы. Установлено, что для реализации данного метода может быть использован любой материнский вейвлет. Справедливость теоретических выкладок и адекватность модели подтверждены большим объемом экспериментальных исследований.

**Источник финансирования.** Государственное задание Минобрнауки России №8.13428.2019/13.2

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Круглова Т.Н. Интеллектуальная диагностика технического состояния электрооборудования // Технологическая инженерия. 2015. № 129. С. 219—224. DOI: 10.1016 / j.proeng.2015.12.036
- 2. Шакухи М., Мохамадян М., Афджей Э. Отказоустойчивое управление бесщеточными двигателями постоянного тока при статической эксцентричности ротора // Транзакции IEEE по промышленной электронике. 2015. № 3. С. 62 (3). С. 1400–1409. DOI: 10.1109 / TIE.2014.2365439
- 3. Круглова Т., Шайхутдинов Д., Шурыгин Д., Январев С., Леухин Р., Литвин Д., Тарковалин С. и Зинин А. Интеллектуальная безсенсорная диагностика неисправностей мехатронного модуля на основе вейвлет преобразования // Азиатский журнал информационных технологий. 2016. №2. 15 (22). С. 4694–4697. DOI: 10.3923 / ajit.2016.4694.4697
- 4. Кёрнер Т.В. Фурье анализ, из-во Пресса Кембриджского университета, 1988, 550 с.
- 5. Чилукури М.В., Тире П.К. Система нечеткого распознавания на основе S-преобразования с множественным разрешением для событий качества электроэнергии // IEEE Сделки по доставке электроэнергии. 2004. №. 19 том 1. С. 323—330. DOI: 10.1109 / TPWRD.2003.820180
- 6. Круглова Т., Булгаков А., Власов А., Шмелев И. Метод искусственного интеллекта для определения режима работы и технического со-

- стояния электроприводов / Динамика технических систем (DTS-2017): XIII Международная научно-техническая конференция // Ростов- на Дону, 2017. DOI: 10.1051 / matecconf / 201713204012
- 7. Круглова Т.Н., Глебов Н.А., Шошиашвили М.Е. Интеллектуальное бессмысленное прогнозирование диагностики электроприводов / ІОР Серия конференций: наука о Земле и окружающей среде 2017, по. 87: Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электротехники, 2017 // Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация. DOI: 10.1088 / 1755-1315 / 87/3/032019
- 8. Пиннегар Ч.Р., Мансинья Л. Локальновременной анализ Фурье с масштабируемой фазово-модулированной аналитической функцией: S-преобразование со сложным окном // Обработка сигналов. 2004. № 84 (7). С. 1167–1176. DOI: 10.1016 / j.sigpro.2004.03.015
- 9. Абри П., Вейч Д. Вейвлет-анализ потока, зависящего от дальнего радиуса действия // Труды IEEE по теории информации. 1998. № 3. С. 44 (1). С. 2–15. DOI: 10.1109 / 18.650984
- 10. Добеши И. Вейвлет-преобразование: частотно-временная локализация и анализ сигналов // IEEE Труды по теории информации. 1990. №. 36 (5). С. 961–1005. DOI: 10.1109 / 18.57199.
- 11. Круглова Т.Н. Вейвлет-анализ для диагностики неисправностей электрических машин с использованием сигналов тока / 2-я Международная конференция по промышленному проектированию, применению и изготовлению (ICIEAM) // 2016, Челябинск, Россия Челябинск DOI: 10.1109 / ICIEAM.2016.7911652
- 12. Ле Мань Ха Свёрточная нейронная сеть для решения задач классификации // ТРУДЫ МФТИ. 2016. № 3. Том 8. С. 91–97.
- 13. Парк Д.С., Эль-Шаркави М.А., Метки R.J., Atlas L.E., Damborg M.J. Прогнозирование электрической нагрузки с использованием искусственной нейронной сети // IEEE Операции в силовой энергосистемами. 1991. № 6. Том 2. С. 442—449. DOI: 10.1080 / 00908319708908889
- 14. Амари С., Чичоки А. Адаптивная слепая обработка сигналов подходы нейронной сети // Обработка IEEE 1998. № 86 (10). С. 2026–2048 гг.. DOI: 10,1109 / 5,720251
- 15. Рафия Ж., Арвания Ф., Харифиб А., Садегик М.Х. Интеллектуальный мониторинг состояния редуктора с использованием искусственной нейронной сети // Механические системы и обработка сигналов. 2007. № 21 (4). С. 1746–1754. DOI: 10.1016 / j.ymssp.2006.08.005

Информация об авторах

**Круглова Татьяна Николаевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры мехатроники и гидропневмоавтоматики. Е-mail: tatyana.kruglova.02@mail.ru. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. Россия, 346428 Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения д. 132.

*Поступила в январе* 2019 г. © Круглова Т.Н., 2019

## 1,\*Kruglova T.N.

<sup>1</sup>Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) Russia, 346428, Rostov Region, Novocherkassk, Prosveshcheniya, 132 \*E-mail: tatyana.kruglova.02@mail.ru

# STUDY OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRIC DRIVE UNDER DIFFERENT LOADING CONDITIONS

Abstract. The main elements of the process equipment are DC and AC motors that largely determine its reliability and efficiency of operation. The constant monitoring of technical condition by methods of technical diagnostics allows a significant extension of equipment life and reduces financial costs. To implement this approach, specialized methods are required. They allow to determine the technical condition of DC and AC motors with a high degree of reliability, distinguishing their faulty state from changing the operating mode. Diagnostics should be performed in the mode of equipment operation; therefore, the use of complex measuring devices is not permissible. This article presents the results of search studies of diagnosis method that meets the above-mentioned requirements. Current, voltage and vibration are selected as diagnostic parameters. It is proposed to analyze them by the wavelet transform. As a result of numerous experiments, the relationship between changes in the wavelet transform coefficients on characteristic scales has been established. This allows to determine the technical condition of the electric motor and the mode of its load, on the basis of which a diagnostic method has been developed using neural networks.

**Keywords:** electric drive diagnostics, neural network method, wavelet transform, drive operation mode.

#### REFERENCES

- 1. Kruglova T.N. Intelligent Diagnosis of the Electrical Equipment Technical Condition. Procedia Engineering, 2015, no 129, pp. 219–224. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.036
- 2. Shakouhi M., Mohamadian M., Afjei E. Fault-Tolerant Control of Brushless DC Motors Under Static Rotor Eccentricity. IEEE transactions on industrial electronics, 2015, no. 62 (3), pp. 1400-1409. DOI: 10.1109/TIE.2014.2365439
- 3. T. Kruglova, D. Shaykhutdinov, D. Shurygin, S. Yanvarev, R. Leukhin, D. Litvin, S. Tarkovalin and A. Zinin. Intelligent Sensorless Fault Diagnosis of Mechatronics Module Wavelet Transformation. Asian Journal of Information Technology, 2016, no. 15 (22), pp. 4694–4697. DOI: 10.3923/ajit.2016.4694.4697
- 4. Körner T.W. Fourier Analysis, Cambridge University Press, 1988, 550 p.
- 5. Chilukuri M.V., Dash P.K. Multiresolution S-transform-based fuzzy recognition system for power quality events. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, no. 19 (1), pp. 323–330. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.820180
- 6. Kruglova T., Bulgakov A., Vlasov A., Shmelev I. Artificial Intelligence Method for Electric Drives Mode Operating and Technical Condition Determination. Dynamic of Technical Systems

- (DTS-2017): XIII International Scientific-Technical Conference. Rostov-on-Don, 2017, DOI: 10.1051/matecconf/ 201713204012
- 7. Kruglova T.N., Glebov N.A., Shoshiashvili M.E. Smart sensorless prediction diagnosis of electric drives. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2017, no. 87: Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering, 2017. Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation. DOI:10.1088/1755-1315/87/3/032019
- 8. Pinnegar C.R., Mansinha L.Time-local Fourier analysis with a scalable, phase-modulated analyzing function: the *S*-transform with a complex window. Signal Processing, 2004, no. 84 (7), pp. 1167–1176 DOI: 10.1016/j.sigpro.2004.03.015
- 9. Abry P., Veitch D. Wavelet analysis of long-range-dependent traffic. IEEE Transactions on Information Theory, 1998, no. 44(1), pp. 2–15, DOI: 10.1109/18.650984
- 10.Daubechies I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. IEEE Transactions on Information Theory, 1990, no. 36(5), pp. 961–1005, DOI: 10.1109/18.57199
- 11.Kruglova T.N. Wavelet analysis for fault diagnosis of electrical machines using current signals. 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).

- 2016, Chelyabinsk, Russia Chelyabinsk DOI:10.1109/ICIEAM.2016.7911652
- 12.Le Manh Ha The convolutional neural network for solving the problem of classification. WORKS OF MFTI, 2016, no. 3 (8), pp. 91–97.
- 13. Park D.C., El-Sharkawi M.A., Marks R.J.; Atlas L.E., Damborg M.J. Electric load forecasting using an artificial neural network. IEEE Transactions on Power Systems 1991, no. 6 (2), pp. 442–449, DOI: 10.1080/00908319708908889
- 14. Amari S., Cichocki A. Adaptive blind signal processing-neural network approaches. Processing of the IEEE, 1998, no.86(10), pp. 2026–2048 DOI: 10.1109/5.720251
- 15. Rafieea J., Arvania F., Harifib A., Sadeghic M.H. Intelligent condition monitoring of a gearbox using artificial neural network. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, no. 21(4), pp. 1746–1754 DOI: 10.1016/j.ymssp.2006.08.005.

#### Information about the authors

**Kruglova, Tatiana N.** PhD, Assistant professor. Department of Mechatronics, Hydraulic and Pneumatic Automation. E-mail: tatyana.kruglova.02@mail.ru. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI). Russia, 346428, Rostov Region, Novocherkassk, Prosveshcheniya, 132.

Received in January 2019

#### Для цитирования:

Круглова Т.Н. Исследование технического состояния электропривода при различных условиях нагружения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 106–116. DOI: 10.34031/article 5ca1f6347299b0.43047357

#### For citation:

Kruglova T.N. Study of the technical condition of electric drive under different loading conditions. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 106–116. DOI: 10.34031/article 5ca1f6347299b0.43047357

# DOI: 10.34031/article\_5ca1f634ef76c8.31770383 <sup>1</sup>Поляков А.Н., <sup>1</sup>Гончаров А.Н., <sup>1,\*</sup>Парфёнов И.В.

<sup>1</sup>Оренбургский государственный университет Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13. \*E-mail: ivparfenov@mail.ru

## МЕТОДИКА КОРРЕКЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ СТАНКА С ЧПУ

Аннотация. Работа посвящена вопросу обеспечения точности обработки на станках с числовым программным управлением за счет коррекции возникающей в них температурной погрешности. Рассмотрено построение системы коррекции температурной погрешности станка, основанной на применении устройства автоматического измерения детали, установленного на нем. Анализа различных источников показал, что методика коррекции погрешностей обработки, вызванных статическими и динамическими факторами, построенная на технологии автоматического измерения детали на станке, в литературе в определенной степени рассмотрена. Однако вопросы коррекции температурной погрешности станка с использованием технологии автоматического измерения детали на станке в открытой печати представлены в объеме, недостаточном для ее практической реализации. Поэтому в данной работе приведена разработанная методика практической реализации алгоритмов управления рабочими органами станка, компенсирующими его температурную погрешность с использованием технологии автоматического измерения детали на станке. Методика содержит семь основных этапов, охватывающих четыре области работ: экспериментальную; программно-математическую; измерительную и подготовку управляющих программ для станков с числовым программным управлением. Доказано, что представленная методика позволяет разработать для любого станка индивидуальную автоматизированную систему коррекции возникающей температурной погрешности. Показано, что важнейшими направлениями повышения эффективности такой системы являются обеспечение полноты экспериментальной базы и точность настройки алгоритмов коррекции температурной погрешности станка.

**Ключевые слова:** методика, температурная погрешность станка, тепловые характеристики, измерительный щуп, ОММ-технологии, управляющая программа.

Введение. Одним из важнейших фактором обеспечения точности станков с числовым программным управлением (ЧПУ), работающих при максимальных значениях коэффициента загрузки оборудования, являются температурные деформации элементов несущей системы [1-4]. Несмотря на то, что в последние три десятилетия изготовителями станков уделяется очень большое внимание влиянию тепловых процессов на точность обработки, по-прежнему температурная погрешность станков остается важнейшей составляющей в общей погрешности обработки. Например, последние исследования тепловых деформаций профилешлифовального станка для зубчатых колес показали их существенное влияние на точность образования профиля колес по осям Х и Ү [5]. При относительно небольших избыточных температурах, менее 12 °C, максимальные температурные перемещения шпинделя по оси У составили около 42 мкм. Опрос 55 производителей станочного оборудования восьми стран мира, включая Японию, Германию и Китай, а также 20 потребителей станков из Германии позволил сделать следующий вывод: несмотря на накопленный опыт промышленности в отношении теплового поведения станков, результаты решения проблемы минимизации температурной погрешности станков не в полной мере

отвечают требованиям производства [6]. При этом в опросе принимали участие малые, средние, крупные и очень крупные предприятия. Их опыт показал, что тепловая погрешность в станках существенно превышает геометрическую, статическую и динамическую погрешность. Даже в условиях современного высокотехнологичного производства тепловые погрешности обработки являются определяющими почти для 50 % бракованных изделий. Было установлено, что в равной степени на температурную погрешность влияет: производственный процесс, внутренние источники тепла и окружающая среда. Также было установлено, что, несмотря на то, что применение систем термостабилизации станков противоречит вопросам энергоэффективности, предпочтением потребителей является термостабильность - почти 75 % всех компаний отдают приоритет термостабильности процесса обработки и минимизации температурной погрешно-

Современные станки с ЧПУ оснащаются различными измерительными системами, которые могут использоваться для повышения точности обработки [7, 8]. Наиболее распространенной системой, устанавливаемой на станках с ЧПУ, является система измерения детали [9–13]. Интел-

лектуальное использование таких систем в технологическом процессе изготовления каждой детали позволяет существенно поднять точность обработки на станке с ЧПУ без дооснащения станка дополнительными системами коррекции погрешностей, что позволяет существенно снизить себестоимость выпускаемой продукции. Так в работе [14] рассмотрен ультрапрецизионный шлифовальный станок с точностью позиционирования равной 100 нм (0,1 мкм). Использование системы измерения детали на станке позволило выполнить трехкратную коррекцию профилирования асферической обрабатываемой поверхности. Это привело к сокращению погрешности обработки профиля от 1867 нм до 177 нм. В работе [15] представлена методика обеспечения точности контурного фрезерования тонкостенных деталей на примере лопаток турбин на 5-ти осевом станке вертикальной компоновки с двухосевым столом VMC-C30. Результаты натурных экспериментов с использованием системы измерений обрабатываемой детали на станке показали возможность снижения погрешности обработки на 70 %.

В общем случае, под интеллектуальным использованием систем коррекции погрешностей станка можно понимать реализацию специальных алгоритмов управления точностью обработки на станках с ЧПУ путем внесения изменений в код управляющих программ, использующих данные системы измерения геометрических параметров обрабатываемой детали, установленной на станке. Обзор проводимых в механообработке исследований показал, что методика коррекции погрешностей обработки, вызванных динамическими и статическими факторами, построенная на ОММ-технологии (ОММ – On Machine Measurement) [7–15], находит отражение в литературе. Вопросы коррекции температурной

погрешности станка с использованием ОММ—технологии мало представлены в открытой печати. Поэтому данная работа актуальна и посвящена разработке методики реализации алгоритмов управления рабочими органами станка, компенсирующими его температурную погрешность с использованием ОММ—технологии.

Описание методики. Условия реализации методики. Для реализации ОММ-технологии в алгоритмах управления рабочими органами станка, направленными на коррекцию его температурной погрешности, станок должен быть оснащён измерительным щупом. Если измерительный щуп не предусмотрен комплектацией станка, то для подавляющего большинства станков с ЧПУ это является доступным опциональным дооснащением. Необходимым условием реализации этого дооснащения является наличие незадействованной управляемой координаты системы ЧПУ. После установки щупа необходимо осуществить его калибровку. Методика включает семь этапов.

Содержание основных этапов методики.

Первый этап — формирование исходных данных в виде совокупности экспериментальных тепловых характеристик. На этом этапе проводится анализ технологического процесса изготовления детали и формируется базовая циклограмма работы оборудования.

На втором этапе осуществляется построение прогнозируемых температурных смещений рабочих органов станка, работающего по циклограмме, позволяющих определить корректирующие управляющие воздействия на рабочие органы станка.

Теоретические корректирующие воздействия задаются в виде аппроксимирующих функций [16]

$$\hat{\delta}_n(t_j) = \sum_{k=1,5,\dots,4m-3} x_{k,n} (1 - e^{-(t_j - x_{k+3})/x_{k+1,n}}) + \sum_{k=1,5,\dots,4m-3} x_{k+2,n} e^{-(t_j - x_{k+3})/x_{k+1,n}}, (1)$$

где  $\mathcal{X}_{k,n}$ ,  $\mathcal{X}_{k+1,n}$ ,  $\mathcal{X}_{k+2,n}$ ,  $\mathcal{X}_{k+3,n}$  — модальные параметры тепловых процессов в станке; k — индексация модальных параметров; m — число температурных мод;  $t_j$  — фиксированный момент вре-

мени, в который проводились измерения;  $\hat{\delta}_n(t_j)$  - значение температурного перемещения по n-ой координате, принимающей значения в соответствии с осями  $n \to X, Y, Z$  в j-й момент времени.

Числовые значение модальных параметров, получаются с применением автоматизированной системы расчета корректирующих воздействий (АСРКВ). АСРКВ реализована в системе MATLAB.

Рассчитанные значения перемещений (1) определяют необходимость внесения изменений в циклограмму работу станка для выполнения текущих измерений измерительным щупом и выполнения последующих корректирующих воздействий. Как правило, это приводит к увеличению числа технологических переходов и изменению длительности каждого технологического перехода.

Третий этап — адаптация управляющих программ (УП) для станка с ЧПУ к введению коррекции температурной погрешности. Адаптация УП заключается в изменении кода программы за счет включения двух блоков: блока текущей координатной коррекции по соответствующей оси и

блока учета промежуточного измерения базовой плоскости системы координат детали (workpiece coordinat system WCS). Внесение изменений в код управляющих программ для станка с ЧПУ, в нашем случае, осуществлялся вручную, несмотря на то, что управляющая программа может быть написана с использованием САМ—системы.

Четвертый этап — первое измерение базовой поверхности в ходе обработки заготовки, положение которой по соответствующей оси принимается в качестве «нуля». Относительно этого уровня будут осуществляться все последующие измерения, расчет и выполнение корректирующих смещений рабочих органов станка. На основании результатов этого измерения будет уточнено предварительно заданное положение базовой поверхности, так как положение этой поверхности может изменяться дополнительно при изменении температуры окружающей среды в помещении с установленным станком.

При осуществлении измерений измерительным щупом в качестве результирующего значения по соответствующей оси в систему ЧПУ передается относительное положение наконечника измерительного щупа — относительно некоторого нулевого уровня, используемого при измерении. Если в качестве нулевого уровня принят ноль станка, то в этом случае возвращаемым значением при измерении является относительное положение измеряемой поверхности.

Пятый этап — эксплуатационный или этап отработки УП. При проведении резания строгое соблюдение (rigid adherence) температурного режима — температуры окружающей среды, является условием обеспечения точности обработки. При отработке управляющей программы обработки детали, с внесенными в её код корректирующими воздействиями, в помещении с установленным станком должен быть реализован температурный режим, при котором формировались исходные данные для определения корректирующих воздействий.

Шестой этап — контрольная операция, выполняемая на стационарной координатно-измерительной машине, в ходе которой формируется вектор измеренных размеров P и осуществляется сравнивание с заданным вектором размеров деталей T. При превышении возможной погрешности обработки, установленной чертежом детали, выполняется переход к следующему блоку решения R. В этом блоке оценивается возможность продолжения изготовления детали или принимается решение о завершении её обработки из-за непоправимых погрешностей.

Седьмой этап – модификация УП.

Результаты. Натурные испытания осуществлялись на станке 400V (ООО «НПО Станкостроение», г. Стерлитамак, Россия). Измерительная система, установленная на станке, построена на основе измерительного щупа ТС50 фирмы Blum Novotest (Германия). Традиционно, тепловые характеристики станка в виде зависимости «температурные перемещения - время»  $\delta(t)$  строятся по результатам текущих измерений фланца шпиндельной головки по соответствующему координатному направлению X, Y или Z. Однако в современном высокотехнологичном производстве тепловые характеристики  $\delta(t)$ строятся по данным измерений непосредственно на станке с использованием измерительного щупа.

Так как результатом применения методики коррекции температурной погрешности станка является коррекция перемещений подвижных исполнительных рабочих органов конкретного станка, то результатами реализации первого этапа методики являются результаты натурных испытаний этого станка. Однако так как существуют, по крайней мере, две методики проведения натурных испытания (с использованием измерительного щупа и без него), то в данной работе дополнительно был выполнен сравнительный эксперимент. Для оценки идентичности двух реализуемых подходов для формирования исходных данных была проведена серия экспериментов для различных частот вращения шпинделя. Согласно общей концепции методики экспериментальные значения перемещений должны фиксироваться для всего диапазона частот вращения шпинделя с шагом 1000 об/мин. Значения перемещений для промежуточных значений частот вращения должны находиться из аппроксимации текущих дискретных значений. В данном исследовании эксперименты проводились для пяти частот вращения шпинделя: 1000, 2000, 3000, 4000 и 5000 об/мин. Сначала строились тепловые характеристики по значениям перемещений торца фланца шпиндельной головки станка по оси Z. Измерения осуществлялись в течение 240 минут с интервалом времени от 5 до 20 минут. Меньшие значения интервала времени использовались для первого часа измерений.

На рис. 1 представлены результаты серии экспериментов, проведенной на холостом ходу для указанных выше пяти частот вращения шпинделя. Семейства экспериментальных характеристик  $\delta(t)$ , пронумерованных с 1 (1') по 10 (10'), организованы для разных моментов времени работы станка: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 120, 180 и 240 минут и двух различных начальных

температурах проведения экспериментов (в пределах 3 °C), так как станок не находился в термоконстантном помещении. Анализ экспериментальных характеристик показал, что при различных начальных температурах фиксировался разброс экспериментальных данных в пределах 8 мкм.

Представление о сходимости результатов измерений, полученных двумя способами (без использования измерительного щупа и с его применением) дает рис.2.

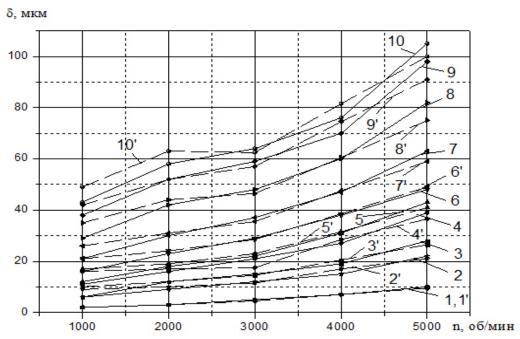


Рис. 1. Семейства экспериментальных характеристик  $\delta(n)$ 

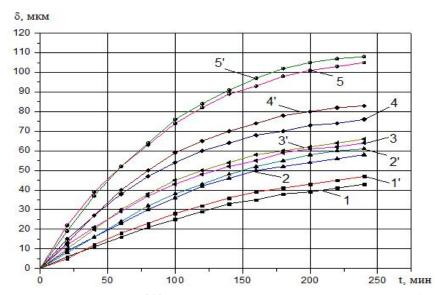


Рис. 2. Тепловые характеристики  $\delta(t)$ , полученные с использованием двух способов измерений

Характеристики  $\delta(t)$  с 1 по 5 представляют измеренные перемещения торца фланца шпиндельной головки, зафиксированные для пяти частот вращения шпинделя. Соответственно характеристики  $\delta(t)$  с 1' по 5' получены по результатам измерений базовой поверхности детали с использованием измерительного щупа TC50.

Предельное расхождение корреспондирующихся данных были зафиксированы в пределах

8 мкм, что не превысило 10 % от максимальных зафиксированных перемещений на соответствующей частоте вращения шпинделя. Это означает, что исходные данные в виде совокупности экспериментальных значений перемещений могут быть сформированы любым из рассмотренных выше способов, так как их достоверность доказана и значения сопоставимы.

Для подтверждения эффективности разработанной методики и алгоритмов коррекции температурной погрешности станка с ЧПУ был проведен натурный эксперимент на предварительно обработанной детали со ступенчатой поверхностью. Относительная высота ступеньки составляла 0,5 мм, ширина ступени – 5 мм. Ступенчатая поверхность позволяет наиболее точно и удобно произвести концевое фрезерование в отдельные моменты времени с фиксированным интервалом. Ранее проведенные эксперименты для данного

станка показали, что временной интервал, равный 20 минут, обеспечивает заметное изменение температурной погрешности станка, превышающее погрешность измерений.

Для оценки температурной погрешности станка, проявляющейся во времени были отфрезерованы поперек ступенчатой поверхности шесть поверхностей (рис. 3). Базовая глубина фрезерования, задаваемая в УП на каждой ступеньке, также составляла 0,5 мм (без учета коррекции и температурной погрешности).

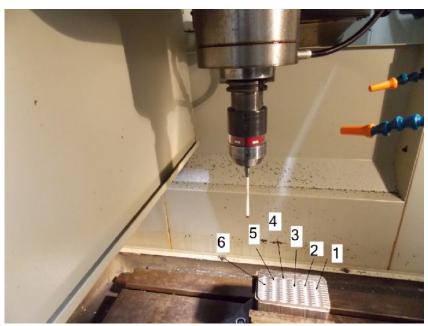


Рис. 3. Контрольная деталь на станке 400V и измерительный щуп TC50

Первая поперечная ступенчатая поверхность принималась за эталон. Вся обработка занимала 20 секунд. За это время температурная погрешность сформироваться не успевала. Вторая поперечная ступенчатая поверхность формировалась уже с учетом образования температурной погрешности. При формировании этой поверхности использовалась временная задержка перед фрезерованием каждой ступени равная 20 мин. Временная задержка позволяла сформировать величину температурных перемещений рабочих органов станка. Все последующие ступенчатые поверхности были сформированы с учетом коррекции температурной погрешности станка. Они формировалась аналогично второй поверхности, но для различных температурных условий проведения эксперимента.

Особенностью формирования шестой поверхностью являлось то, что до обработки шестой поверхности с помощью измерительного щупа была выполнена коррекция положения базовой плоскости. Эксперимент проводился в разные дни с несущественно различающимися начальными температурными условиями, поэтому расхождение экспериментальных данных

для ступеней с третьей по шестую не превысили 5 мкм. Контрольные измерения обработанных поверхностей, проведенных на координатно-измерительной машине Wenzel XOrbit 55, показали, что расхождение экспериментальных данных не превысили 3 мкм. Для иллюстрации эффективности предложенной методики и разработанных алгоритмов коррекции температурной погрешности станка на рис. 4 представлены результаты измерений погрешности обработки по оси Z, выполненных на трех поверхностях вдоль оси Y . Представленные на рисунке 4 кривые образованы соединением отдельных точек отрезками. Первая кривая 1 сформирована на эталонной поверхности. Кривая 2 сформирована на второй поверхности в последний интервал времени проведения натурного эксперимента с максимальной температурной погрешностью. Кривая 3 сформирована на третьей поверхности, полученной при реализации алгоритмов коррекции температурной погрешности станка.

Обсуждение. Для исключения возможных ошибок измерения, вызываемых некорректностью работы измерительной

аппаратуры при использовании в режиме реального времени измерительного щупа, в УП следует предусмотреть модуль проверки измеренных данных. Алгоритм программно реализованного такого модуля представлен на рис. 5. Управляющая программа, реализующая модуль проверки измеренных данных, включает пять блоков.

Первый блок – блок начальных данных включает: загрузку измерительного щупа в шпиндель станка; активацию рабочей системы координат детали; позиционирование шпинделя в фиксированной позиции в рабочем пространстве станка для выполнения процедуры измерения; инициализацию необходимых параметров управляющей программы.

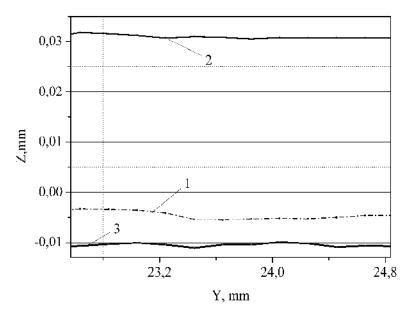


Рис. 4. Фрагмент результатов измерений на трех поверхностях

Второй блок – блок суммирования счетчика выполнений процедуры измерения NBL++.

Третий блок – блок измерений, в котором реализуется процедура измерения базовой поверхности. Для использованного в исследовании измерительного щупа ТС50 в качестве специализированного программного обеспечения, позволяющего распознавать сигналы, поступающие от измерительного щупа, используются «измерительные циклы», представляющие собой текстовые модули специализированных подпрограмм: BL9700, BL9701, BL9702, BL9703, BL9704, BL9705, BL9706, BL9707. Тип измерительной задачи определяет систему ненулевых параметров соответствующей подпрограммы. Основной подпрограммой, вызываемой непосредственно из управляющей программы для станка с ЧПУ, является BL9700 с максимальным числом передаваемых параметров, равным 16.

Четвертый блок – блок оценки достоверности измерений, в котором устанавливается достоверность измерения и выбирается вариант дальнейшего исполнения управляющей программы. Измеренное значение определяет корректирующие воздействия, отрабатываемые в режиме реального времени в рабочей УП. Недостоверное значение, полученное при измерении, может привести или к останову технологического перехода или поломке станка. Специфической особенностью измерительных циклов для щупов серии TC50 является использование предопределенных переменных пользователя или R-параметров для систем ЧПУ Sinumerik. Измеренное значение по оси Z сохраняется в параметре «R[02]». Предельное значение температурного перемещения  $\delta$  устанавливается заранее и может отличаться от измеренного значения более чем на 100 %, но не на несколько порядков.

Пятый блок — блок завершения, в котором принимается решение о завершении технологического перехода измерений. Заранее, из практики использования данного измерительного щупа, устанавливается пороговое значение числа контрольных измерений N, позволяющих гарантировать достоверность измерения. Это число обязательно больше двух. Длительность одного повторяющегося измерения составляет не более  $3\ c$ .

Реализация ОММ-технологии в механообработке может быть осуществлена без использования дополнительных прогнозных моделей. В этом случае реализуется другой алгоритм формирования корректирующих воздействий температурной погрешности станка, при котором коррекция выполняется на основании только результатов измерений без прогнозируемых значений

температурных перемещений рабочих органов станка.

В заключение дискуссии хотелось бы остановиться на некоторых особенностях завершающего этапа предлагаемой методики — это модификация УП. Схема работы программы представлена на рис.6. Используемая в методике управляющая программа для станка с ЧПУ имеет четыре принципиальных отличия от типовой программы.

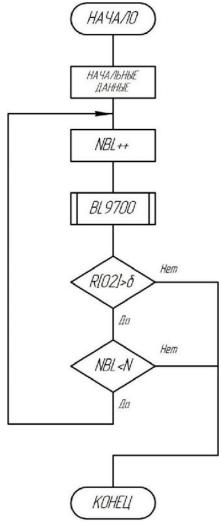


Рис. 5. Алгоритм модуля проверки измеренных данных

Первое отличие. Число циклов обработки детали NCLN (рис.6) больше, чем в типовой, так как в этом случае добавляются измерительные переходы. Количество измерительных переходов определяется прогнозируемой интенсивностью температурной погрешности станка.

Второе отличие. Отработка корректирующих смещений рабочих органов станка выполняется только при условии выполнения ограничений:

$$\Delta \leq \varepsilon$$
, (2)

где  $\Delta$  — измеренная погрешность (по модулю), мкм;  $\varepsilon$  — установленный технологией обработки допуск размера, мкм.

Если величина корректирующих смещений, установленная по результатам измерений, больше требуемого допуска на фиксированный размер, то процесс обработки завершается, так как уже фиксируется брак. В противном случае осуществляется переход к исполнению второго блока алгоритма.

Чтобы не доводить до брака обрабатываемую деталь следует предельное значение температурной погрешности  $\varepsilon'$  устанавливать несколько меньше, чем значение допуска на размер:

$$\varepsilon' = r \cdot \varepsilon , \ r \ni [0, ..., 1] , \tag{3}$$

где r — коэффициент запаса.

Установленное предельное значение температурной погрешности  $\mathcal{E}$  может привести к изменению общего числа циклов обработки.

Третье отличие. Управляющая программа для станка с ЧПУ реализуется двумя вложенными циклами. Внешний цикл определяется технологическими переходами, предусмотренными технологией обработки детали, а также дополнительными циклами, обусловленными результатом работы АСРКВ. Циклы *Cycle\_in* — это исполнение обработки детали без измерения при выполнении условия:

$$\Delta_{np} \leq \mathcal{E}',$$
 (4)

где  $\Delta_{np}$  — прогнозируемое значение температурной погрешности станка.

В этом случае отработка корректирующих воздействий приводами станка осуществляется в пределах внутреннего цикла.

Четвертое отличие. Алгоритм коррекции температурной погрешности станка предусматривает дополнительный блок Пересчет коррекции, в котором производится автоматический пересчет корректирующих воздействий. Так, например, при отработке внутреннего цикла реализуются корректирующие воздействия типа (1), приводящие к некоторому прогнозируемому значению погрешности  $\Delta_{np}$ . В тоже время в результате измерения неизбежно фиксируется отклонение фактической температурной погрешности станка  $\Delta$  от прогнозируемой  $\Delta_{np}$ .

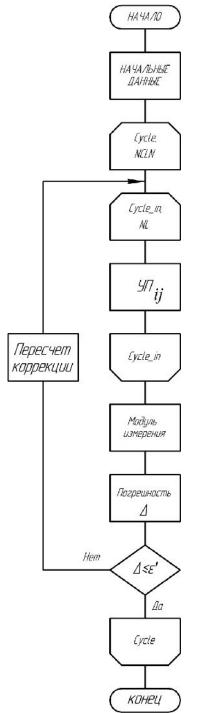


Рис. 6. Схема работы управляющей программы для станка с ЧПУ

В блоке *Пересчет коррекции* для исключения установленной погрешности  $\beta$  осуществляется пересчет корректирующих воздействий на текущий момент времени.

$$\beta = \left| \Delta_{np} - \Delta \right|. \tag{5}$$

Анализ результатов измерений обработанных поверхностей, представленных на рисунке 4, показал, что после 240 минут нагревания станка температурная погрешность составила около 37 мкм при измерении на координатно-измерительной машине и 39 мкм при измерении на станке с

использованием измерительного щупа. Применение алгоритмов коррекции температурной погрешности позволило её сократить практически до 10 мкм. Для получения большей точности обработки требовалась более точная настройка алгоритмов коррекции, например, за счет введения дополнительных измерительных переходов при обработке.

Выводы. Таким образом, В статье представлена методика практической реализации алгоритмов компенсации температурной погрешности станка с ЧПУ. Методика содержит семь основных этапов, методологически четыре области работ: охватывающих экспериментальную; программноматематическую, связанную с аппроксимацией экспериментальных характеристик; измерительную и подготовку управляющих программ для станков с ЧПУ, реализующую ОММ-технологии и алгоритмы коррекции температурной погрешности станков с ЧПУ. Доказано, представленная что методика позволяет разработать ДЛЯ любого станка индивидуальную автоматизированную систему компенсации возникающей температурной погрешности. Важнейшими факторами эффективности предлагаемой методики являются полнота экспериментальной базы и настройки алгоритмов коррекции температурной погрешности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Nishiwaki N., Hori S., Sugiura Y. Study on Thermal Deformation of Machine Tool Estimated by its Basic Characteristics. In: Kochhar A.K. et al. (eds) Proceedings of the Thirty-Second International Matador Conference. Palgrave, London. 1997, pp. 615–620. doi:10.1007/978-1-349-14620-8 97
- 2. Mayr J., Jedrzejewski J., Uhlmann E. et al. Thermal Issues in Machine Tools. Annals of the CIRP 61(2). 2012. Pp.771–792.
- 3. Cao H., Zhu L., Li X. et al. Thermal error compensation of dry hobbing machine tool considering workpiece thermal deformation. Int J Adv Manuf Technol, 2016, vol. 86, issue 5–8, pp 1739–1751. https://doi.org/10.1007/s00170-015-8314-5
- 4. Zhou Z.D., Gui L., Tan Y.G. et al. Actualities and Development of Heavy-Duty CNC Machine Tool Thermal Error Monitoring Technology. Chin. J. Mech. Eng. 2017. Vol. 30, Issue 5, pp 1262–1281. https://doi.org/10.1007/s10033-017-0166-5
- 5. Wang S., Zhou B., Fang C. et al. Research on thermal deformation of large CNC gear profile grinding machine tools. Int J Adv Manuf Technol. 2017. Volume 91, Issue 1–4, pp. 577–587. https://doi.org/10.1007/s00170-016-9442-2.
  - 6. Putz M., Richter C., Regel J. et al. Industrial

- consideration of thermal issues in machine tools. Prod. Eng. Res. Devel. 2018. 12: 723. https://doi.org/10.1007/s11740-018-0848-6
- 7. Aguado S., Santolaria J., Samper D. et al. Protocol for machine tool volumetric verification using commercial laser tracker. Int J Adv Manuf Technol (2014) 75: 425. https://doi.org/10.1007/s00170-014-6055-5
- 8. Aguado S., Samper D., Santolaria J. et al. Machine Tool Rotary Axis Compensation Trough Volumetric Verification Using Laser Tracker. Procedia Engineering, Volume 63, 2013, Pages 582-590, ISSN 1877-7058, https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.189.
- 9. He G., Huang, X., Ma W. et al. CAD-based measurement planning strategy of complex surface for five axes on machine verification. Int J Adv Manuf Technol (2017) 91: 2101. https://doi.org/10.1007/s00170-016-9932-2
- 10. Lee E.S., Lee C.H., Kim S.C. Machining Accuracy improvement by Automatic Tool Setting and On Machine Verification // Key Engineering Materials. 2008. Vol. 381–382. Pp. 199-202.
- 11. Kim S.H., Ko T.J., Ahn J.H. Elimination of Settling Error Due to Clamping Forces in On-Machine Measurement // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2002. Vol. 19. Issue 8. Pp. 573–578.
- 12. Choi J.P., Min B.K., Lee S.J. Reduction of machining errors of a three-axis machine tool by on

- machine measurement and error compensation system // Journal of Materials Processing Technology. 2004. Vol. 155–156. Pp. 2056–2064.
- 13. Ibaraki S., Intani T. Matsushita T. Calibration of location errors of rotary axes on five-axis machine tools by on-the-machine measurement using a touch-trigger probe // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012. Vol. 58. Pp. 44–53.
- 14. Chen F.J., Yin S.H., Huang H., Ohmori H, Wang Y., Fan Y.F., Zhu Y. J. Profile error compensation in ultra-precision grinding of aspheric surfaces with on-machine measurement // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2010. Vol. 50. Issue. 5. Pp. 480-486.
- 15. Huang N., Bi Q., Wang Y, Sun C.5-Axis adaptive flank milling of flexible thin-walled pats based on the on-machine measurement // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2014. Vol. 84. Pp.1–8.
- 16. Поляков А.Н., Гончаров А.Н. Автоматизированная система коррекции температурной погрешности станков с ЧПУ// Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2016. № 2 (227). С. 33–41.
- 17. Поляков А.Н., Гончаров А.Н., Марусич К.В., Романенко К.С. Экспериментальные исследования статических и тепловых характеристик станка с ЧПУ // СТИН. 2014. №6. С.13–18.

#### Информация об авторах

**Поляков Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: anp\_temos@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13.

**Гончаров Антон Николаевич**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: ang\_osu\_aki\_tmmsk@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13.

**Парфёнов Игорь Валентинович**, кандидат технических наук, доцент, декан факультета дистанционных образовательных технологий. E-mail: ivparfenov@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поступила в январе 2019 г.

© Поляков А. Н., Гончаров А.Н., Парфёнов И. В., 2019

#### <sup>1</sup>Polyakov A.N., <sup>1</sup>Goncharov A.N., <sup>1</sup>,\*Parfenov I.V.

<sup>1</sup>Orenburg State University Russia, 460018, Orenburg, ave. Pobedy, 13 \*E-mail: ivparfenov@mail.ru

#### TECHNIQUE FOR CORRECTION OF CNC MACHINE TOOL TEMPERATURE ERROR

**Abstract.** The work is devoted to the issue of ensuring the accuracy of processing on machine tools with numerical control due to the correction of the temperature error. The construction of a system for correcting the temperature error of a tool using the automatic part measurement of device is considered.

Analysis of various sources shows the method for correcting machining errors, caused by static and dynamic factors and based on the technology of automatic measurement of the part on the machine is considered in the literature. However, the issues of correction the temperature error using the technology of automatic measurement of tool parts in the open press are presented insufficiently for practical implementation. Therefore, this paper presents the developed methodology for the practical implementation of control algorithms for machine tool working elements that compensate its temperature error using automatic part measurement technology. The methodology contains seven main stages, covering four areas of work: experimental; mathematical program; measurement and preparation of control programs for machine tools with numerical program control. It is proved that the presented method allows developing an individual automated system for correcting the resulting temperature error for any machine. The most important areas for increasing the efficiency of such a system are to ensure the completeness of the experimental base and the accuracy of setting algorithms for correcting the temperature error of the machine.

**Keywords:** method, temperature error of the machine, thermal characteristics, measuring probe, OMM technology, control program.

#### REFERENCES

- 1. Nishiwaki N., Hori S., Sugiura Y. Study on Thermal Deformation of Machine Tool Estimated by its Basic Characteristics. In: Kochhar A.K. et al. (eds) Proceedings of the Thirty-Second International Matador Conference. Palgrave, London, 1997, pp. 615–620. doi:10.1007/978-1-349-14620-8 97
- 2. Mayr J., Jedrzejewski J., Uhlmann E. et al. Thermal Issues in Machine Tools. Annals of the CIRP 61(2), 2012, pp.771–792.
- 3. Cao H., Zhu L., Li X. et al. Thermal error compensation of dry hobbing machine tool considering workpiece thermal deformation. Int J Adv Manuf Technol, 2016, vol. 86, issue 5–8, pp. 1739–1751. https://doi.org/10.1007/s00170-015-8314-5
- 4. Zhou Z.D., Gui L., Tan Y.G. et al. Actualities and Development of Heavy-Duty CNC Machine Tool Thermal Error Monitoring Technology. Chin. J. Mech. Eng, 2017, vol. 30, issue 5, pp. 1262–1281. https://doi.org/10.1007/s10033-017-0166-5
- 5. Wang S., Zhou B., Fang C. et al. Research on thermal deformation of large CNC gear profile grinding machine tools. Int J Adv Manuf Technol, 2017, vol. 91, Issue 1–4, pp. 577–587. https://doi.org/10.1007/s00170-016-9442-2.
- 6. Putz M., Richter C., Regel J. et al. Industrial consideration of thermal issues in machine tools. Prod. Eng. Res. Devel, 2018, 12: 723. https://doi.org/10.1007/s11740-018-0848-6
- 7. Aguado S., Santolaria J., Samper D. et al. Protocol for machine tool volumetric verification using commercial laser tracker. Int J Adv Manuf Technol (2014) 75: 425. https://doi.org/10.1007/s00170-014-6055-5
- 8. Aguado S., Samper D., Santolaria J. et al. Machine Tool Rotary Axis Compensation Trough Volumetric Verification Using Laser Tracker. Procedia Engineering, 2013, vol. 63, pp. 582–590, ISSN 1877-7058, https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.189.
- 9. He G., Huang X., Ma W. et al. CAD-based measurement planning strategy of complex surface

- for five axes on machine verification. Int J Adv Manuf Technol, 2017, 91: 2101. https://doi.org/10.1007/s00170-016-9932-2
- 10. Lee E.S., Lee C.H., Kim S.C. Machining Accuracy improvement by Automatic Tool Setting and On Machine Verification. Key Engineering Materials, 2008, vol. 381–382, pp. 199–202.
- 11. Kim S.H., Ko T.J., Ahn J.H. Elimination of Settling Error Due to Clamping Forces in On-Machine Measurement. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2002, vol. 19, issue 8, pp. 573–578.
- 12. Choi J.P., Min B.K., Lee S.J. Reduction of machining errors of a three-axis machine tool by on machine measurement and error compensation system. Journal of Materials Processing Technology. 2004, vol. 155–156, pp. 2056–2064.
- 13. Ibaraki S., Intani T. Matsushita T. Calibration of location errors of rotary axes on five-axis machine tools by on-the-machine measurement using a touch-trigger probe. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, vol. 58, pp. 44–53.
- 14. Chen F.J., Yin S.H., Huang H., Ohmori H, Wang Y., Fan Y.F., Zhu Y. J. Profile error compensation in ultra-precision grinding of aspheric surfaces with on-machine measurement. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, vol.50, Issue. 5, pp. 480–486.
- 15. Huang N., Bi Q., Wang Y, Sun C. 5-Axis adaptive flank milling of flexible thin-walled pats based on the on-machine measurement. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, vol. 84, pp. 1–8.
- 16. Polyakov A.N., Goncharov A.N. Automated system for the correction of temperature errors of CNC machine tools. The Directory. Engineering journal with the app. 2016, no. 2 (227), pp. 33–41.
- 17. Polyakov A.N., Goncharov A.N., Marusich K.V., Romanenko S.K. Experimental study of the static and thermal characteristics of CNC machine. STIN, 2014, no. 6, pp. 13–18.

Information about the authors

**Polyakov, Aleksandr N.** DSc, Professor. E-mail: anp\_temos@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, ave. Pobedy, 13.

**Goncharov, Anton N.** Ph.D, Senior lecturer. E-mail: ang\_osu\_aki\_tmmsk@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, ave. Pobedy, 13.

**Parfenov, Igor V.** PhD, Assistant professor. E-mail: ivparfenov@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, ave. Pobedy, 13.

Received in January 2019

## Для цитирования:

Поляков А.Н., Гончаров А.Н., Парфёнов И.В. Методика коррекции температурной погрешности станка с ЧПУ // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 117–127. DOI: 10.34031/article 5ca1f634ef76c8.31770383

#### For citation:

Polyakov A.N., Goncharov A.N., Parfenov I.V. Technique for correction of cnc machine tool temperature error. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 117–127. DOI: 10.34031/article 5ca1f634ef76c8.31770383

# DOI: 10.34031/article\_5ca1f6356f67c4.15287599

# <sup>1</sup>Бондаренко Ю.А, <sup>1</sup>Ханин С.И., <sup>2,\*</sup>Бестужева О.В.

<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46
<sup>2</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
\*E-mail: bestuzheva@bsu.edu.ru

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦАПФЫ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ И ВРАЩЕНИЯ

Аннотация. В статье рассматривается цапфа шаровой мельницы под действием постоянных нагрузок корпуса с мелющими телами и материалом, одновременным действием силы тяжести и вращения за счет момента внешних сил. При эксплуатации шаровой мельницы опасным сечением днищ является место перехода цилиндрической части цапфы в коническую. Оценено напряженно-деформированное состояние цапфы шаровой мельницы производится на основе математической модели, включающей в себя полную систему уравнений равновесия, определяющих соотношений упругопластического деформирования, учитывающих эффекты циклического нагружения материала, с соответствующими начальными и граничными условиями. Учтена динамическая нагрузка, возникающая при вращении, по принципу Даламбера, согласно которому ко всем действующим внешним силам добавляются силы инерции. Получено уравнение изгиба оси цапфы, учитывающее действие сил инерции. Получены зависимости прогиба, кривизны прогиба и напряжения от продольной координаты при действии силы тяжести и вращения на ось цапфы. Определена величина касательного напряжения от действия крутящего момента. Определено общее выражение эквивалентного напряжения, учитывающее сложное напряженно-деформированное состояние цапфы шаровой мельницы, испытывающей растягивающее напряжение от изгибающих нагрузок и сдвиговое напряжение от крутящего момента.

**Ключевые слова:** цапфа шаровой мельницы, износ оборудования, математическое описание, напряженно-деформированное состояние, изгиб вращающейся цапфы.

Введение. При эксплуатации шаровой мельницы опасным сечением днищ является место перехода цилиндрической части цапфы в коническую [1, 2]. Под действием постоянных нагрузок корпуса с мелющими телами и материалом, одновременным действием силы тяжести и вращения за счет момента внешних сил возникает изгиб [3].

Цапфа имеет форму полого цилиндра, который защемлен на конце и вращается вокруг продольной оси [4]. Оценка напряженно-деформированного состояния цапфы шаровой мельницы производится на основе математической модели, включающей в себя полную систему уравнений равновесия, определяющих соотношений упругопластического деформирования, учитывающих эффекты циклического нагружения материала, с соответствующими начальными и граничными условиями

Методология. Согласно работам [5, 6, 7], в первом приближении решение этой задачи может быть получено с использованием инженерных подходов на основе простейших соотношений теории упругости, сопротивления материалов и механики материалов [8, 9, 10]. Изгиб вращающейся цапфы обусловлен одновременным действием силы тяжести и вращения за счет момента внешних сил (рис. 1).

Вращение при изгибе детали цилиндрической формы приводит к формированию сложного напряженно-деформированного состояния [8]. Моделирование такого процесса требует применения эйлерово-лангранжева подхода, прослеживания истории деформирования материальных частиц, в том числе процесса нагружения и процессов упругопластического нагружения с появлением вторичных пластических деформаций и изменением предела текучести материала, учета особенностей законопеременного деформирования.

Основная часть. При наличии зоны пластических деформаций в области высоких значений кривизны продольной оси цапфы, ситуация существенно меняется, поскольку в результате пластического нагружения формируется остаточная кривизна [5, 11].

Оценка напряженно-деформированного состояния цапфы, изогнутого под действием собственного веса и веса корпуса, поворачивающегося вокруг оси, выполняется с привлечением уравнений механики материалов. Для учета динамической нагрузки, возникающей при вращении, применяется принцип Даламбера [5, 12], согласно которому ко всем действующим внешним силам добавляются силы инерции.

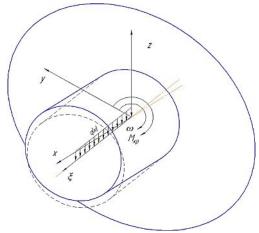


Рис. 1. Расчетная схема изгиба и вращения цапфы

Уравнение изгиба оси цапфы, учитывающее действие сил инерции (рис. 1), имеет вид [5, 6, 7]:

$$EJ\frac{d^4U(x)}{dx^4} = mg + m\omega^2 U(x), \qquad (1)$$

с граничными условиями

$$U(x)|_{x=0} = 0, (2)$$

$$\left. \frac{dU(x)}{dx} \right|_{x=0} = 0,\tag{3}$$

$$\frac{d^2 U(x)}{dx^2}\Big|_{x=l} = \frac{M(x)}{EJ}\Big|_{x=l} = 0,$$
 (4)

$$\frac{d^3 U(x)}{dx^3}\Big|_{x=l} = \frac{q(x)}{EJ}\Big|_{x=l} = 0,$$
 (5)

где U(x) — функция прогиба цапфы; x — продольная координата: J — геометрический момент инерции объема относительно оси ОХ, рассчитываемый по формуле:

$$J = \int R_2^2 dV, \tag{6}$$

где  $R_2$  — внешний радиус цапфы, V — объем цапфы; m — погонная масса, рассчитываемая по формуле:

$$m = m_{\rm H} + 0.5 \cdot m_{\rm K},\tag{7}$$

где  $m_{\rm ц}$  — масса цапфы шаровой мельницы,  $m_{\rm K}$  — масса корпуса с мелющими телами и материалом; M(x) — внешний изгибающий момент; q(x) — распределенная массовая нагрузка: q(x) = mg, где g — ускорение свободного падения.

Решение неоднородного дифференциального уравнения (1) четвертого порядка представляется общим решением  $U_1(x)$  однородного дифференциального уравнения [12, 13]:

$$EJ\frac{d^4U_1(x)}{dx^4} - m\omega^2 U_1(x) = 0, (8)$$

и частным решением  $U_2(x)$  неоднородного дифференциального уравнения:

$$EJ\frac{d^4U_2(x)}{dx^4} + m\omega^2U_2(x) = mg.$$
 (9)

Общее решение  $U_1(x)$  уравнения (8) строится в виде [12, 13]:

$$U_1(x) = Ae^{\alpha x}, \tag{10}$$

частное решение  $U_2(x)$  уравнения (2.9) согласно [7, 8] разыскивается в виде:

$$U_2(x) = B, (11)$$

соответствующем виду правой части уравнения (9), где A, B и  $\alpha$  – искомые константы.

Подстановка решения (10) в однородное дифференциальное уравнение (8) приводит к характеристическому уравнению:

$$EJ\alpha^4 A e^{\alpha x} - m\omega^2 A e^{\alpha x} = 0.$$
 (12)

Введем обозначение

$$D^4 = \frac{m\omega^2}{EI}. (13)$$

Исходя из (13), полученное соотношение (12) можно представить в виде алгебраического уравнения четвертой степени:

$$\alpha^4 = D^4. \tag{14}$$

Корни уравнения (14) имеют вид:

$$\alpha_1 = +D, \alpha_2 = -D, \alpha_3 = iD, \alpha_4 = -iD,$$
 (15) где  $i = \sqrt{-1}$  – мңимая (комплексная) единица.

Общее решение однородного дифференциального уравнения (8) принимает вид:

$$U_1(x) = A_1 e^{Dx} + A_2 e^{-Dx} + A_3 e^{iDx} + A_4 e^{-iDx}.$$
 (16)

Подстановка решения (11) в неоднородное дифференциальное уравнение (9) приводит к уравнению относительно константы В:

$$m\omega^2 B = mg. \tag{17}$$

Из (17) следует:

$$B = -\frac{g}{\omega^2}. (18)$$

В итоге решения дифференциального уравнения (1) записывается в виде:

$$U(x) = U_1(x) + U_2(x) = A_1 e^{Dx} + A_2 e^{-Dx} + A_3 e^{iDx} + A_4 e^{-iDx} - \frac{g}{\omega^2}.$$
 (19)

С учетом формулы Эйлера [7]:

$$U(x) = A_1 e^{Dx} + A_2 e^{-Dx} + A_3 \cos Dx + A_4 \sin Dx - \frac{g}{\omega^2}.$$
 (20)

Для нахождения значений постоянных интегрирования  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  используются граничные условия (2)-(5):

$$\begin{cases} U(x)|_{x=0} = \left[ A_1 e^{Dx} + A_2 e^{-Dx} + A_3 \cos Dx + A_4 \sin Dx - \frac{g}{\omega^2} \right]_{x=0} = 0, \\ \frac{dU(x)}{dx}|_{x=0} = \left[ A_1 D e^{Dx} - A_2 D e^{-Dx} - A_3 D \sin Dx + A_4 D \cos Dx \right]_{x=0} = 0, \\ \frac{dU(x)}{dx}|_{x=0} = \left[ A_1 D e^{Dx} - A_2 D e^{-Dx} - A_3 D \sin Dx + A_4 D \cos Dx \right]_{x=0} = 0, \\ \frac{d^3 U(x)}{dx^3}|_{x=1} = \left[ A_1 D^3 e^{Dx} - A_2 D^3 e^{-Dx} + A_3 D^3 \sin Dx - A_4 D^3 \cos Dx \right]_{x=1} = 0. \end{cases}$$

$$(21)$$

Соотношения (21) являются системой линейных алгебраических уравнений относительно искомых весличин A1, A2, A3, A4:

$$\begin{cases} 1A_{1} + 1A_{2} + 1A_{3} + 0A_{4} = \frac{g}{\omega^{2}}, \\ DA_{1} - DA_{2} + 0A_{3} + DA_{4} = 0, \\ D^{2}e^{Dl}A_{1} + D^{2}e^{-Dl}A_{2} - D^{2}\cos Dl A_{3} - D^{2}\sin Dl A_{4} = 0, \\ e^{Dl}D^{3}A_{1} - e^{-Dl}D^{3}A_{2} + D^{3}\sin Dl A_{3} - D^{3}\cos Dl A_{4} = 0. \end{cases}$$

$$(22)$$

Решение полученной системы линейных алгебраических уравнений (22) с подстановкой всех

известных величин позволяет определить постоянные интегрирования:

$$A1 = 28,73588; A2 = 53,71975; A3 = 74,50436; A4 = 24,98738.$$
 (23)

Решение (19) принимает вид:

$$U(x) = 28,73588e^{Dx} + 53,71975e^{-Dx} + 74,50436\cos(Dx) + 24,98738\sin(Dx) - \frac{g}{\omega^2}.$$
 (24)

Кривизна прогиба осевой линии цапфы определяется по формуле:

$$\kappa = \frac{d^2 U(x)}{dx^2} = D^2 (28,73588e^{Dx} + 53,71975e^{-Dx} + 74,50436\cos(Dx) + +24,98738\sin(Dx))$$
 (25) На рисунке 2 приведена форма прогиба осевой

На рисунке 2 приведена форма прогиба осевой линии цапфы при ее вращении, на рисунке 3 – кривизна прогиба оси цапфы.

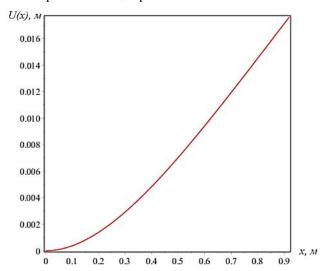


Рис. 2. Зависимость прогиба от продольной координаты ОХ при действии силы тяжести и вращения на ось цапфы

Напряжения, возникающие в цапфе шаровой мельницы, согласно [6] определяются как:

$$\sigma = E \cdot k \cdot R_2. \tag{26}$$

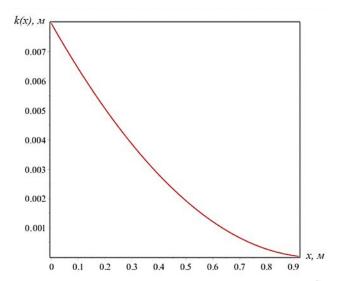


Рис. 3. Зависимость кривизны прогиба от продольной координаты ОХ при действии силы тяжести и вращения на ось цапфы

На рисунке 4 представлен график зависимости напряжения цапфы от продольной координаты х, показывающий распределение напряжения по

длине внешней цилиндрической поверхности цапфы при действии силы тяжести и вращении.

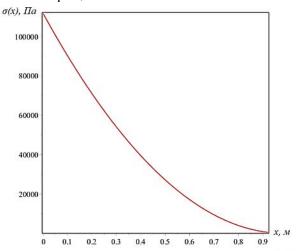


Рис. 4. Зависимость напряжения от продольной координаты при действии силы тяжести и вращения на ось цапфы

Как видно из рисунка 3, наибольшая кривизна цапфа имеет место в точке x=0:

$$\kappa|_{x=0} = D^2(28,73588e^{D\cdot 0} + 53,71975e^{-D\cdot 0} + 74,50436\cos(D\cdot 0) + +24,98738\sin(D\cdot 0)) = 0,79769$$
 (27)

Следовательно, наибольшие по модулю напряжения в цапфе достигаются именно в этом сечении,

$$\sigma_{max} = E \cdot k_{max} \cdot R_2 = 111676 \,\,\text{\Pia.} \tag{28}$$

Определение величины касательного напряжения от действия крутящего момента  $M_{\kappa p}$ , приложенного к цапфе, выполняется согласно [5, 6, 8]:

$$\tau = \frac{M_{\text{KP}}}{I_p} R_2, \tag{29}$$

где  $M_{\kappa p}$ — крутящий момент даровой мельницы;  $I_p$  — полярный момент инерции поперечного сечения [11]:

$$I_p = 4\pi (R_2^4 - R_1^4);$$

Для заданных значениях радиуса внешней и внутренней поверхности цапфы и крутящего момента шаровой мельницы, максимальное сдвиговое напряжение определяется величиной:

$$\tau_{max} = \frac{M_{\rm KP}}{I_p} R_2 = 3516 \, \text{\Pia}.$$

Учитывая сложное напряженно-деформированное состояние цапфы шаровой мельницы, испытывающей растягивающее напряжение от изгибающих нагрузок и сдвиговое напряжение от крутящего момента, эквивалентное напряжение следует определять с использованием понятия интенсивности напряжения  $\sigma_i$ , определяемого общим выражением [5, 6, 15]:

$$\sigma_{i} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(\sigma_{x} - \sigma_{y}\right)^{2} + \left(\sigma_{y} - \sigma_{z}\right)^{2} + \left(\sigma_{z} - \sigma_{x}\right)^{2} + 6\left(\tau_{xy}^{2} + \tau_{yz}^{2} + \tau_{zx}^{2}\right)}.$$
(30)

Для определения эквивалентного напряжения цапфы в данном случае, формула (30) будем иметь вид:

$$σ_i = \sqrt{\sigma + 3\tau_x^2} = 0$$
,1118 ΜΠα.

Выводы. Получено уравнение изгиба оси цапфы, учитывающее действие сил инерции. Получены зависимости прогиба, кривизны прогиба и напряжения от продольной координаты при действии силы тяжести и вращения на ось цапфы. Определена величина касательного напряжения от действия крутящего момента. Определено общее выражение эквивалентного напряжения, учитывающее сложное напряженно-деформированное состояние цапфы шаровой мельницы, ис-

пътывающей растягивающее напряжение от изгибающих нагрузок и сдвиговое напряжение от крутящего момента.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Маркова О.В. Аулов В.Г., Лавренчук А.Н., Федоренко М.А. Анализ методов расчета износа контактных поверхностей трения // Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс» (г. Губкин, 12 апреля 2012 г), Губкин: Изд-во БГТУ, 2012. С. 65-69.
- 2. Федоренко М.А., Маркова О.В. Колебательные процессы в помольных мельницах цементной промышленности // Международная научно-практическая конференция «Техника и

технология современных производств», Пенза, 2014. С. 113–116.

- 3. Богданов В.С., Ильин А.С., Семикопенко И.А. Основные процессы в производстве строительных материалов. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г.Шухова. 2008. 550 с.
- 4. Гологорский Е.Г., Доценко А.И., Ильин А.С. Эксплуатация и ремонт оборудования предприятий стройиндустрии. М.: Архитектура, 2006. 503 с.
- 5. Бояршинов М.Г. Оценка напряженно-деформированного состояния вращающегося длинного цилиндра // Вестник ПНИПУ. Механика. 2013. N 1. C. 25–38.
- 6. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1979. 702 с.
- 7. Эрдеди А.А., Эрдеди Н.А.. Теоретическая механика. Сопротивление материалов. М.: Академия, 2012. 320 с.
- 8. Светлицкий В.А. Строительная механика машин. Механика стержней. В 2 томах. М.: Физматлит, 2009. 408 с.

- 9. Варданян Г.С., Андреев В.И., Атаров Н.М., Горшков А.А. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. М.: Инфра-М, 2011. 640 с.
- 10.А.И. Дудяк, Т.А. Сахнович. Прикладная теория упругости. М.: Издательство Гревцова, 2010.  $164\ c$ .
- 11. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. М.: Высшая школа, 2003. 720 с.
- 12.Кудрявцев Л.Д. Краткий курс математического анализа. Том 1. М.: Физматлит, 2009. 400 с
- 13. Эльсгольц Л.Э. Обыкновенные дифференциальные уравнения. СПб.: Лань, 2002. 224 с.
- 14. Бьюи Х.Д. Механика разрушения. Обратные задачи и решения. М.: Москва, 2011. 410 с.
- 15. Бардзокас Д.И., Фильштинский Л.А., Фильштинский М.Л. Актуальные проблемы связанных физических полей в деформируемых телах. Математический аппарат физических и инженерных наук. Том 1. М.: Москва, 2010. 864 с.

#### Информация об авторах

**Бондаренко Юлия Анатольевна**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения. E-mail: kdsm2002@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46.

**Ханин Сергей Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры механического оборудования. E-mail: dh@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46.

**Бестужева Ольга Васильевна**, старший преподаватель кафедры прикладной информатики и информационных технологий. E-mail: bestuzheva@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, 85.

Поступила в декабре 2018 г.

© Бондаренко Ю.А., Ханин С.И., Бестужева О.В., 2019

#### <sup>1</sup>Bondarenko Ju.A., <sup>1</sup>Khanin S.I., <sup>2</sup>,\*Bestuzheva O.V.

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46 <sup>2</sup>Belgorod State National Research University Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85 \*E-mail: bestuzheva@bsu.edu.ru

# MATHEMATICAL DESCRIPTION OF STRESS-STRAIN CONDITION OF BALL MILL'S PIN UNDER THE FORCE OF GRAVITY AND ROTATION

Abstract. The article discusses the pin of a ball mill under the action of constant loads of the body with grinding material, the simultaneous action of gravity and rotation due to the moment of external forces. During the operation of a ball mill, a dangerous section of the bottoms is the place where the cylindrical part of the trunnion becomes conical. The stress-strain condition of the ball mill' pin is estimated on the basis of a mathematical model that includes a complete system of equilibrium equations, defining ratios of elastoplastic deformation. It takes into account the effects of cyclic loading of the material, with the corresponding initial and boundary conditions. The dynamic load that occurs during rotation is taken into account, according to

the D'Alembert's principle, which means inertia forces are added to all acting external forces. The bend equation of pin's axle is obtained; it considers the action of inertia forces. The dependences of the deflection, deflection curvature and stress on the longitudinal coordinate under the action of gravity and rotation on the pin's axle are obtained. The value of the shear stress from the action of torque is determined. The general expression of equivalent stress is examined. It includes the complex stress-strain condition of the ball mill's pin, which experiences tensile stress from bending loads and shear stress of torque.

**Keywords:** pin of ball mill, depreciation of equipment, the mathematical description of the stress-strain condition, the bending of the rotating pin.

#### REFERENCES

- 1. Markova O.V., Aulov V.G., Lavrenchuk A.N., Fedorenko M.A. Analysis of methods for calculating the wear of friction contact surfaces. International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Youth and Scientific and Technical Progress" (Gubkin, April 12, 2012), Gubkin: BSTU Publishing House, 2012, p. 65–69.
- 2. Fedorenko M.A., Markova O.V. Oscillatory processes in the grinding mills of the cement industry. International scientific-practical conference "Technique and technology of modern production", Penza, 2014, p. 113–116.
- 3. Bogdanov V.S., Il'in A.S., Semikopenko I.A. The main processes in the production of building materials. Belgorod: Izd-vo BSTU V.G. Shukhova, 2008, 550 p.
- 4. Gologorsky E.G., Dotsenko A.I., Ilyin A.S. Maintenance and repair of equipment of construction enterprises. M.: Architecture, 2006, 503 p.
- 5. Boyarshinov M.G. Evaluation of the stress-strain state of a rotating long cylinder. Bulletin of the PNRPU, Mechanics, 2013, no. 1, p. 25–38.
- 6. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. Calculation of the strength of machine parts. M.: Mashinostroenie, 1979, 702 p.

- 7. Erdedi A.A., Erdedi N.A., Theoretical Mechanics. Strength of materials. M.: Academy, 2012, 320 p.
- 8. Svetlitsky VA. Construction mechanics of machines. Rod mechanics. In 2 volumes. M.: Fizmatlit, 2009, 408 p.
- 9. Vardanyan G.S., Andreev V.I., Atarov N.M., Gorshkov A.A. Resistance of materials with the fundamentals of the theory of elasticity and plasticity. M.: Infra-M, 2011, 640 p.
- 10. Dudyak A.I., Sakhnovich T.A. Applied theory of elasticity. Moscow: Grevtsova Publishing, 2010, 164 p.
- 11. Nikitin N.N. The course of theoretical mechanics. M.: Higher School, 2003, 720 p.
- 12. Kudryavtsev LD A short course of mathematical analysis. Vol. 1. M.: Fizmatlit, 2009, 400 p.
- 13. Elsgolts L.E. Ordinary differential equations. SPb .: Lan, 2002, 224 p.
- 14. Buie H.D. Fracture mechanics. Inverse problems and solutions. M.: Moscow, 2011, 410 p.
- 15. Bardzokas D.I., Filshtinsky L.A., Filshtinsky M.L. Actual problems related physical fields in deformable bodies. Mathematical apparatus of physical and engineering sciences. Volume 1. M.: Moscow, 2010. 864 p.

Information about the authors

**Bondarenko**, **Julia A.** DSc, Professor. E-mail: kdsm2002@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Khanin, Sergey I.** DSc, Professor. E-mail: dh@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Bestuzheva, Olga V.** Senior lecturer. E-mail: bestuzheva@bsu.edu.ru. Belgorod State National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Received in Desember 2018

#### Для цитирования:

Бондаренко Ю.А., Ханин С.И., Бестужева О.В. Математическое описание напряженно-деформированного состояния цапфы шаровой мельницы под действием силы тяжести и вращения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 128–133. DOI: 10.34031/article\_5ca1f6356f67c4.15287599

#### For citation:

Bondarenko Ju.A., Khanin S.I., Bestuzheva O.V. Mathematical description of stress-strain condition of ball mill's pin under the force of gravity and rotation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 128–133. DOI: 10.34031/article 5ca1f6356f67c4.15287599

DOI: 10.34031/article\_5ca1f635ef2844.35993706

#### <sup>1,</sup>\*Остановский А.А.

<sup>1</sup>ООО «Оптимастрой»

Россия, 141130, г. Руза, Московской области, ул. Школьная, д. 28 \*E-mail: ostanovskiy51@mail.ru

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОГО НЕСООТВЕТСТВИЯ ВЕТВЕЙ ЗАМКНУТОГО КОНТУРА НА УДЕЛЬНУЮ ЭНЕРГОЁМКОСТЬ В МЕЛЬНИЦЕ СИСТЕМЫ «МКАД»

Аннотация. Обосновывается необходимость совершенствования технологических операций при переработке минерального сырья и использования для реализации этой задачи энергоэффективного измельчительного оборудования. Приводятся технические и технологические преимущества вертикальных мельниц динамического самоизмельчения, в основе которых заложен способ самоизмельчения материала, позволяющий добиться при использовании этого прогрессивного способа и машин, разработанных на его основе, снижение удельных энергозатрат. Разъясняются технические преимущества мельниц системы «МКАД», структурные схемы которых имеет индифферентную группу. Так как в мельницах этой системы для разрушения кусков и частиц дополнительно используется так называемая «циркулирующая» энергия, зависящая от степени деформации вала приводного двигателя, обосновывается необходимость исследования влияния кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура на удельные энергозатраты измельчения. Представлены графические зависимости влияния кинематического несоответствия на удельные энергозатраты измельчения в мельницах системы «МКАД».

**Ключевые слова:** мельница, энергоэффективность, удельные энергозатраты, структурная схема, индифферентные группы, замкнутый контур, кинематическое несоответствие, кинетическая энергия, потенциальная энергия, циркулирующая энергия.

При переработке минерального сырья основной технологической операцией является механическое разрушение исходных материалов с целью сокращения их размеров и разделения его на составные части. Такой способ получения готового продукта применяется во многих отраслях народного хозяйства и является одной из важнейших операций в технологии подготовки минерального сырья к дальнейшей переработке. При ежегодном объёме переработки минерального сырья (свыше 3 млрд. т.) общие затраты электроэнергии составляют 60 млрд. кВт-ч или до 4 % общего производства в России и странах Евразийского союза [1]. Поэтому задача по снижению энергопотребления всегда будет важнейшим направлением поиска технических решений по созданию энергоэффективного измельчительного оборудования для всех отраслей промышленности.

Основными подготовительными операциями для получения готового продукта при переработке минерального сырья являются операции дробления и измельчения. Эти операции весьма энергоёмки и металлоёмки, а энергозатраты на осуществление этих процессов процессы достигают 70–80 % от подводимой энергии [2]. Кроме того, качество произведённого продукта, полученного после переработки этого сырья, во многом определяет тонина помола, что приводит к росту удельной энергоёмкости измельчения [3].

Существующий парк на действующих предприятиях измельчительных машин морально и физически устарел и не может в полной мере удовлетворить современные требования при производстве различных продуктов и не позволяет добиться заметного снижения удельных энергозатрат, что снижает конкурентоспособность используемых измельчительных машин на мировом рынке [4].

К основным недостаткам используемого измельчительного оборудования для переработки строительных материалов по-прежнему являются низкая производительность, удельные энергозатраты и большая стоимость, высокая металлоёмкость, капитальные и эксплуатационные затраты и низкая надёжность [5-7]. Вместе с тем, отсутствие в различных отраслях промышленности, в том числе и отраслях по производству строительных материалов, высоко производительного и энергоэффективного измельчительного оборудования не позволяет в полной мере добиться поставленной цели, так как на существующих предприятиях преобладают морально и физически устаревшие измельчительные машины, конструкции которых разработаны ещё в 70-80 -х годах прошлого столетия. Соответственно применяемые технологии переработки их соответствуют уровню 70-х годов прошлого века и ориентированы на выпуск, как правило, узкого ассортимента продукции и сравнительно низкого качества. Это обстоятельство выдвигает задачу перед наукой и производством по внедрению в отрасли по производству строительных материалов передовых технологий и машин мирового уровня (рис. 1).

На рис. 1 представлены задачи отраслевой науки, которые она должна решить в области создания современных технологий и оборудования, обеспечивающих повышения эффективности, при производстве строительных материалов исходя из стратегии развития строительной отрасли на ближайший период её развития.

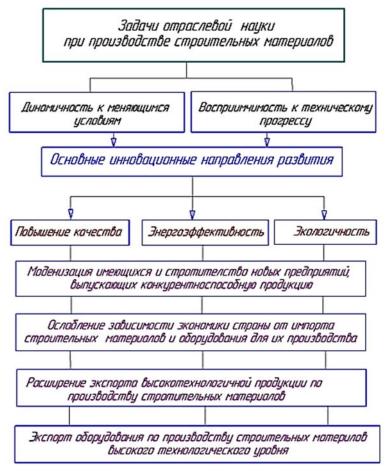


Рис. 1 Стратегия развития строительной отрасли до 2020 года (Приказ Минрегионразвития РФ от 30.05. 2011 №262)

К наиболее перспективным измельчительным машинам, которые могут решить существующую проблему совершенствования используемого для этого оборудования, в настоящее время являются вертикальные мельницы динамического самоизмельчения системы «МАЯ», в основе которых заложен способ самоизмельчения [8–12]. Их использование позволяет добиться следующих технических преимуществ в сравнении с существующими типами мельниц:

- из процесса помола выведены мелющие тела, что позволяет выполнять футеровку менее металлоёмкой;
- появляется возможность сократить стадии дробления;
- снижается загрязнение готового продукта частицами изнашиваемого металла;

- снижение металлоёмкости позволяет снизить нагрузку на приводные элементы и увеличить надёжность машин, а также снизить мощность привода.

Однако, созданные и находящиеся в эксплуатации мельницы динамического самоизмельчения различного конструктивного исполнения, достигли предельных значений по производительности и оптимальности энергозатрат. Это объясняется тем, что в основе конструкций существующих мельниц динамического самоизмельчения используется кинетическая энергия вращающегося ротора, зависящая в основном от его скорости вращения, которая не может превышать некоторого критического значения, и увеличение которой обуславливает рост энергопотребления и эксплуатационных затрат [13].

Альтернативой мельницам этой системы являются мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД», отличительной особенностью которых является наличие в их структурой схеме индифферентных групп, что способствует снижению энергозатрат из-за возникновения так называемой «циркулирующей» энергии, которая приводит к дополнительному силовому взаимодействию кусков измельчаемого материала [14—18].

Так как удельные энергозатраты являются важнейшим критерием эффективности процесса измельчения и технических характеристик используемого для этих целей оборудования, то для вертикальных мельниц динамического само-измельчения системы «МКАД», которые являются альтернативой мельницам системы «МАЯ», то для доказательства их технического

преимущества по удельным энергозатратам проведено сравнение этого показателя на основании экспериментальных исследований.

Согласно результатам экспериментальных исследований на основе полно факторного эксперимента, проведённых на опытном образце мельницы с индифферентной структурной группой, были получены результаты зависимости производительности и энергозатрат за период измельчения, представленных в табл. 1- 5 для мельниц обеих систем.

В табл. 1 представлены результаты экспериментальных исследований производительности по общему выходу классов и удельных энергозатрат в зависимости от входящих параметров X1, X2 и X3 для 23-х опытов согласно матрице рототабельного центрального композиционного плана для мельницы системы «МАЯ» [19].

Tаблица l Производительность мельницы системы «МАЯ» согласно полнофакторного эксперимента

№ опыта	Матрица планирования			Производительнос выходу классов $Y_{10}$	
	$X_1$	<i>X</i> <sub>2</sub>	<i>X</i> <sub>3</sub>	Минутная	Часовая
	Частота вращения ротора прот, об/мин (разность между частотами вращения ротора и цилиндрического кор-	Высота засыпки барабана исходным материалом $(H_{cn})$ , мм	Диаметр выпускных отверстий в барабане ( $d_{\text{вып}}$ ), мм	G <sub>вых (мин)</sub> кГ/мин	G <sub>вых (час)</sub> т/час
1	пуса) 329	500	0.0	0.502	0.0201
2	329	500 500	9,0 5,0	0,502 0,333	0,0301 0,02
3	380,4	260	9,0	0,368	0,0221
4	380,4	260	5,0	0,308	0,0221
5	431,2	500	9,0	0,487	0,028
6	431,2	500	5,0	0,383	0,017
7	431,2	260	9,0	0,35	0,021
8	431,2	260	5,0	14,6	0,0146
9	582,8	380	7,0	0,717	0,043
10	481,9	380	3,4	0,243	0,0146
11	481,9	178	7,0	0,235	0,0141
12	329,7	380	7,0	0,548	0,0329
13	481,9	380	10,4	0,517	0,031
14	481,9	581,2	7,0	0,483	0,029
15	481,9	380	7,0	0,558	0,0335
16	481,9	380	9,0	0,61	0,0366
17	481,9	500	7,0	0,615	0,0369
18	380,4	500	7,0	0,553	0,0332
19	380,4	380	9,0	0,468	0,0281
20	481,9	260	7,0	0,388	0,0233
21	481,9	380	5,0	0,315	0,0189
22	431,2	380	5,0	0,252	0,0151
23	431,2	260	7,0	0,372	0,0223

В табл. 1 приняты следующие обозначения:  $X_1$  – разность между частотами вращения ротора и цилиндрического корпуса;

 $X_2$  – высота засыпки исходного материала в барабан, мм;

 $X_3$  – диаметр выпускных отверстий в барабане, мм;

 $Y_i$  – производительность по общему выходу классов измельчённого материала в i-м опыте (к $\Gamma$ /мин; т/ч).

На основе экспериментальных исследований получены с помощью измерительного комплекса

[20] и разработанной программы [21] запись изменения мощности, потребляемой из сети мельницы системы «МАЯ» -  $N_{\text{сети (МАЯ)}}$ , за период измельчения материала.

На рис. 2 представлен график записи этой мощности из опыта №1 полнофакторного эксперимента.

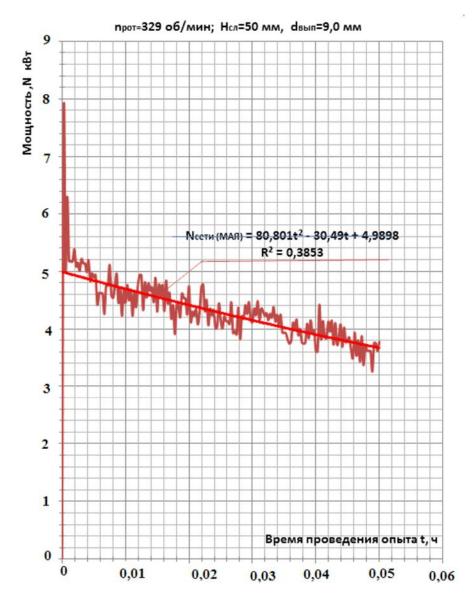


Рис. 2. График изменения мощности, потребляемой из сети, при измельчении мергеля в мельнице системы «МАЯ» из опыта №1 полнофакторного эксперимента

Вычисление энергозатрат производилось путём интегрирования полученной в результате измерения мощности потребляемой из сети, как  $N_{\text{сети}} = f(I_{\text{кн}})$ :

$$Ecemui = \int_{0}^{t_{i}} F(N_{cemui}) \cdot dt_{i}, \qquad (1)$$

Удельные энергозатраты измельчения в i-ом опыте вычислялись как

$$E_{\rm y,l} = \frac{E_{cemui}}{G_{\rm Bbix}i}, \qquad (2)$$

где  $E_{\text{сети}}$  – энергия, потреблённая из сети за период измельчения  $t_i$  в i-м опыте, кВт·ч;  $G_{\text{вых}i}$  – производительность мельницы в i-м опыте,  $\tau$ /ч.

На основе вычисления энергопотребления за период измельчения мергеля и производительности за этот же период были получены следующие результаты энергопотребления для каждого опыта этого эксперимента (табл. 2).

Таблица 2 Результаты вычисления энергозатрат в мельнице системы «МАЯ»

	Матрица планирования			Энергозатраты за период измельчения Еі (МАЯ), кВт·ч
	X1	X2	X3	Yi (MAЯ)
№ опыта	Частота вращения ротора прот, об/мин (разность между частотами вращения ротора и цилиндрического корпуса)	Высота засыпки барабана исход- ным материалом (Нсл),	Диаметр выпуск- ных от- верстий в барабане (dвып), мм	
1	329	500	9,0	$Y_1 = \int_0^{0.05} (80,801 \cdot t^2 - 30,49 \cdot t + 4,9898) dt = 0,215$
2	329	500	5,0	$Y_2 = \int_{0}^{0.05} (1103.9 \cdot t^2 - 111.69 \cdot t + 5.4972) dt = 0.181$
3	329	260	9,0	$Y_3 = \int_0^{0.05} (5217 \cdot t^2 - 50,235 \cdot t + 3,215) dt = 0,12$ $Y_4 = \int_0^{0.05} (5229 \cdot t^2 - 50,178t + 3,335) dt = 0,122$ $Y_5 = \int_0^{0.05} (1272, 2 \cdot t^2 - 108,93 \cdot t + 5,287) dt = 0,181$
4	329	260	5,0	$Y4 = \int_{0}^{0.05} (5229 \cdot t^2 - 50178t + 3,335)dt = 0,122$
5	431,2	500	9,0	$Y_5 = \int_0^{0.05} (1272, 2 \cdot t^2 - 108, 93 \cdot t + 5, 287) dt = 0,181$
6	431,2	500	5,0	$Y_6 = \int_{0}^{0.05} (641,88 \cdot t^2 - 66,554 \cdot t + 4,0047) dt = 0,144$
7	431,2	260	9,0	$Y_6 = \int_{0}^{0.05} (641,88 \cdot t^2 - 66,554 \cdot t + 4,0047) dt = 0,144$ $Y_7 = \int_{0}^{0.05} (559,48 \cdot t^2 - 56,329 \cdot t + 3,1564) dt = 0,112$
8	431,2	260	5,0	$Y_8 = \int_{0}^{0.05} (826.1 \cdot t^2 - 80.219 \cdot t + 3.1794) dt = 0.093$
9	582,8	380	7,0	$Y_8 = \int_0^{0.05} (826.1 \cdot t^2 - 80.219 \cdot t + 3.1794) dt = 0.093$ $Y_9 = \int_0^{0.05} (636.76 \cdot t^2 - 51.942 \cdot t + 5.706) dt = 0.247$ $Y_{10} = \int_0^{0.05} (999.39 \cdot t^2 - 96.257 \cdot t + 5.2979) dt = 0.186$ $Y_{10} = \int_0^{0.05} (100.26 \cdot t^2 - 96.221 t + 3.4825) dt = 0.000$
10	481,9	380	3,4	$Y_{10} = \int_{0}^{0.05} (999, 39 \cdot t^2 - 96, 257 \cdot t + 5, 2979) dt = 0,186$
11	329,7	178	7,0	$Y_{11} = \int_{0}^{0.05} (10936 \cdot t^2 - 96321 \cdot t + 34825) dt = 0,099$
12	481,9	380	7,0	$Y_{11} = \int_{0}^{0.05} (10936 \cdot t^{2} - 96321 \cdot t + 34825 dt = 0.099)$ $Y_{12} = \int_{0}^{0.05} (-7799 \cdot t^{2} + 4.152 \cdot t + 4.801) dt = 0.213$
13	481,9	380	10,4	113 = 1 (1.30831 - 32831 + 3.019301 = 0.21
14	481,9	581,2	7,0	$Y_{14} = \int_{0}^{0.05} (17823 \cdot t^2 - 45362 \cdot t + 61419) dt = 0.258$
15	481,9	380	7,0	$Y_{15} = \int_{0}^{0.05} (33766t^2 - 50423t + 5473dt = 0.225)$
16	481,9	380	9,0	$Y_{16} = \int_{0}^{0.05} (138  18 \cdot t^2 - 11049 \cdot t + 5,833  8) dt = 0,211$
17	380,4	500	7,0	$Y_{17} = \int_{0}^{0.05} (15359 \cdot t^2 - 10027 \cdot t + 6,2286) dt = 0,25$
18	380,4	500	7,0	$Y_{18} = \int_{0}^{0.05} (49495 \cdot t^2 - 49,778t + 5,4249dt = 0,23)$
19	481,9	380	9,0	$Y_{19} = \int_{0}^{0.05} (-37,203t^2 - 39,592t + 4,4234)dt = 0,17$
20	481,9	260	7,0	$Y_{20} = \int_{0}^{0.05} (936,31 \cdot t^2 - 81,337 \cdot t + 4,4933) dt = 0,187$
21	431,2	380	5,0	$Y_{21} = \int_{0}^{0.05} (645,69 \cdot t^2 - 57,97 \cdot t + 4,4032) dt = 0,175$
22	431,2	380	5,0	$Y_{22} = \int_{0}^{0.05} (1508, 2 \cdot t^2 - 110, 17 \cdot t + 3,6613) dt = 0,108$
23	481,9	260	7,0	$Y_{14} = \int_{0}^{0.05} (17823 \cdot t^2 - 45362 \cdot t + 61419) dt = 0,258$ $Y_{15} = \int_{0}^{0.05} (33766 \cdot t^2 - 50423 t + 5473) dt = 0,225$ $Y_{16} = \int_{0}^{0.05} (13818 \cdot t^2 - 11049 \cdot t + 58338) dt = 0,211$ $Y_{17} = \int_{0}^{0.05} (15339 \cdot t^2 - 10027 \cdot t + 62286) dt = 0,25$ $Y_{18} = \int_{0}^{0.05} (49495 \cdot t^2 - 49778 t + 54249) dt = 0,23$ $Y_{19} = \int_{0}^{0.05} (-37203 t^2 - 39592 t + 44234) dt = 0,17$ $Y_{20} = \int_{0}^{0.05} (93631 \cdot t^2 - 81337 \cdot t + 44933) dt = 0,187$ $Y_{21} = \int_{0}^{0.05} (64569 \cdot t^2 - 5797 \cdot t + 44032) dt = 0,175$ $Y_{22} = \int_{0}^{0.05} (15082 \cdot t^2 - 11017 \cdot t + 36613) dt = 0,108$ $Y_{23} = \int_{0}^{0.05} (28949 \cdot t^2 - 34995 t + 35366) dt = 0,145$

Произведённые вычисления позволили про- извести определить удельные энергозатраты в

каждом из 23-х опытов для мельницы системы «МАЯ» (табл. 3).

Таблица 3 Результаты вычисления удельных энергозатрат для мельницы системы «МАЯ»

				Параметры			
		Матрица іланировані	19	Производительность в опыте $G_{\text{выхі}}$ , т	Энергозатраты за период измельчения в опыте $E$ i, $\kappa$ B $_{1}$ -ч	Удельные энергозатраты в опыте $E_{ m yzi}$ , к ${ m BT} \cdot { m u}/$	
	$X_{I}$	$X_2$	$X_3$	-	-	-	
1	329	500	9,0	0,0301	0,215	0,215/0,0301= <b>7,14</b>	
2	329	500	5,0	0,02	0,181	0,181/0,02= <b>9,05</b>	
3	380,4	260	9,0	0,0221	0,12	0,12/0,0221= <b>5,42</b>	
4	380,4	260	5,0	0,0145	0,122	0,122/0,0145= <b>8,41</b>	
5	431,2	500	9,0	0,028	0,181	0,181/0,028= <b>6,46</b>	
6	431,2	500	5,0	0,017	0,144	0,144/0,017= <b>8,47</b>	
7	431,2	260	9,0	0,021	0,112	0,112/0,021= <b>5,33</b>	
8	431,2	260	5,0	0,0146	0,094	0,094/0,0146= <b>6,48</b>	
9	582,8	380	7,0	0,043	0,247	0,247/0,043= <b>5,74</b>	
10	481,9	380	3,4	0,0146	0,186	0,186/0,0146=12,7	
11	481,9	178	7,0	0,0141	0,099	0,099/0,0147= <b>7,02</b>	
12	329,7	380	7,0	0,0329	0,213	0,213/0,0339= <b>6,47</b>	
13	481,9	380	10,4	0,031	0,21	0,21/0,031= <b>6,78</b>	
14	481,9	581,2	7,0	0,029	0,258	0,258/0,029= <b>8,90</b>	
15	481,9	380	7,0	0,0335	0,225	0,225/0,0335= <b>6,71</b>	
16	481,9	380	9,0	0,0366	0,211	0,211/0,0366= <b>5,77</b>	
17	481,9	500	7,0	0,0369	0,25	0,25/0,0369= <b>6,77</b>	
18	380,4	500	7,0	0,0332	0,23	0,23/0,0332= <b>6,92</b>	
19	380,4	380	9,0	0,0281	0,17	0,17/0,0281= <b>6,05</b>	
20	481,9	260	7,0	0,0233	0,187	0,187/0,0233= <b>8,03</b>	
21	481,9	380	5,0	0,0189	0,175	0,175/0,0189 <b>=9,23</b>	
22	431,2	380	5,0	0,0151	0,108	0,108/0,0151= <b>7,15</b>	
23	431,2	260	7,0	0,0223	0,145	0,145/0,0223= <b>6,50</b>	

Аналогично предыдущему случаю для мельницы с индифферентной структурной группой системы «МКАД» определены производи-

тельность и энергозатраты при измельчении материала, по которым определены удельные энергозатраты (табл. 4, 5 и 6).

Таблица 4 Производительность мельницы системы с индифферентной структурной группой системы «МКАД» согласно полнофакторного эксперимента

	Матр	рица планировани	Производительность по общему в ходу классов $Y_{1(MKAД)}$		
<b>№</b> опыта	<i>X</i> <sub>1</sub>	$X_2$	<i>X</i> <sub>3</sub>	Минутная	Часовая
	Кинематическое несоответствие ветвей замкнутого контура ( $I_{\text{кн}}$ )	Высота за- сыпки матери- ала в барабане $H_{\text{сл}}$ , мм	Диаметр вы- пускных отвер- стий в барабане $(d_{\text{вып}})$ , мм	$G_{\scriptscriptstyle  m Bbix\;(MИH)}$ к $\Gamma/{ m MИH}$	G <sub>вых (час)</sub> т/час
1	0,42	500	9,0	0,488	0,0293
2	0,42	500	5,0	0.323	0,0194
3	0,42	260	9,0	0,338	0,0203
4	0,42	260	5,0	0,23	0,0138
5	0,32	500	9,0	0,483	0,029
6	0,32	500	5,0	0,233	0,014
7	0,32	260	9,0	0,30	0,018
8	0,32	260	5,0	0,237	0,0142
9	0,22	380	7,0	0,65	0,039
10	0,38	380	3,4	0,227	0,0136
11	0,38	178	7,0	0,24	0,0144
12	0,48	380	7,0	0,553	0,0332
13	0,38	380	10,4	0,487	0,0292
14	0,38	581,2	7,0	0,525	0,0315
15	0,38	380	7,0	0,603	0,0362
16	0,38	380	9,0	0,648	0,0389
17	0,38	500	7,0	0,61	0,0363
18	0,42	500	7,0	0,538	0,0323
19	0,42	380	9,0	0,473	0,0284
20	0,38	260	7,0	0,375	0,0225
21	0,38	380	5,0	0,302	0,0181
22	0,32	380	5,0	0,217	0,0130
23	0,32	260	7,0	0,585	0,0351

В табл. 4 приняты следующие обозначения:

 $X_1$  — величина кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура, определяемая как  $i_{\text{верх}}/i_{\text{нижн}}$ :  $i_{\text{верх}}$  — передаточное отношение кинематической передачи в верхней ветви замкнутого контура;  $i_{\text{нижн}}$  — передаточное отношение кинематической передачи в нижней ветви замкнутого контура;

 $X_2$  – высота засыпки исходного материала в барабан, мм;

 $X_3$  – диаметр выпускных отверстий в барабане, мм;

 $Y_i$  – производительность по общему выходу классов измельчённого материала в i-м опыте (к $\Gamma$ /мин; т/ч).

Производительность мельницы системы «МКАД» по 23 опытам полнофакторного эксперимента представлена в табл. 5

Таблица 5 Производительность мельницы системы с индифферентной структурной группой системы «МКАД» согласно полнофакторного эксперимента

	Матрица планирования			Производительность по общему выходу классов $Y_{1(MKAД)}$	
№	$X_1$	$X_2$	$X_3$	Минутная	Часовая
опыта	Кинематическое несоответствие ветвей замкнутого контура $(I_{\text{кн}})$	Высота засыпки барабана исходным материалом $(H_{cn})$ , мм	Диаметр вы- пускных отвер- стий в барабане $(d_{\text{вып}})$ , мм	$G_{ ext{вых (мин)}}$ к $\Gamma$ /мин	G <sub>вых (час)</sub> т/час
1	0,42	500	9,0	0,488	0,0293
2	0,42	500	5,0	0.323	0,0194
3	0,42	260	9,0	0,338	0,0203
4	0,42	260	5,0	0,23	0,0138
5	0,32	500	9,0	0,483	0,029
6	0,32	500	5,0	0,233	0,014
7	0,32	260	9,0	0,30	0,018
8	0,32	260	5,0	0,237	0,0142
9	0,22	380	7,0	0,65	0,039
10	0,38	380	3,4	0,227	0,0136
11	0,38	178	7,0	0,24	0,0144
12	0,48	380	7,0	0,553	0,0332
13	0,38	380	10,4	0,487	0,0292
14	0,38	581,2	7,0	0,525	0,0315
15	0,38	380	7,0	0,603	0,0362
16	0,38	380	9,0	0,648	0,0389
17	0,38	500	7,0	0,61	0,0363
18	0,42	500	7,0	0,538	0,0323
19	0,42	380	9,0	0,473	0,0284
20	0,38	260	7,0	0,375	0,0225
21	0,38	380	5,0	0,302	0,0181
22	0,32	380	5,0	0,217	0,0130
23	0,32	260	7,0	0,585	0,0351

На рис. 3 представлена запись изменения мощности, потребляемой из сети при имитации мельнины системы «МАЯ» и мельнины системы

«МКАД» в опыте  $\mathfrak{N}$ 1 полнофакторного эксперимента.

На основе вычисления энергопотребления за период измельчения мергеля и производительности за этот же период были получены следующие результаты энергопотребления для каждого опыта этого эксперимента (табл. 6).

На основе полученных данных производительности и энергозатрат в каждом из 23- х опытов полнофакторного эксперимента произведены вычисление удельных энергозатрат в каждом из этих опытах (табл. 7).

Анализ полученных результатов удельных энергозатрат для мельниц систем «МАЯ» и «МКАД» показывает, что энергоэффективность

мельницы системы «МКАД» в сравнении с прототипом. При этом максимальное снижение удельных затрат составило: для опыта №15 - при влияющих факторах  $-I_{\text{кн}}$ =0,38;  $H_{\text{сл}}$ =380 мм;  $d_{\text{вып}}$ =7,0 мм  $E_{\text{уд}}$  (мкад) =4,14 кВт·ч/т и  $E_{\text{уд}}$  (мая)=6,17 кВт·ч/т, что соответствует снижению на 32,9%. Минимальное снижение удельных энергозатрат для мельниц двух систем составило в опыте №6 - при влияющих факторах  $-I_{\text{кн}}$ =0,32;  $H_{\text{сл}}$ =500 мм;  $d_{\text{вып}}$ =5,0 мм  $E_{\text{уд}}$  (мкад) =8,52 кВт·ч/т и  $E_{\text{уд}}$  (мая) =8,47 кВт·ч/т, что соответствует снижению удельных энергозатрат всего на 0,6%.

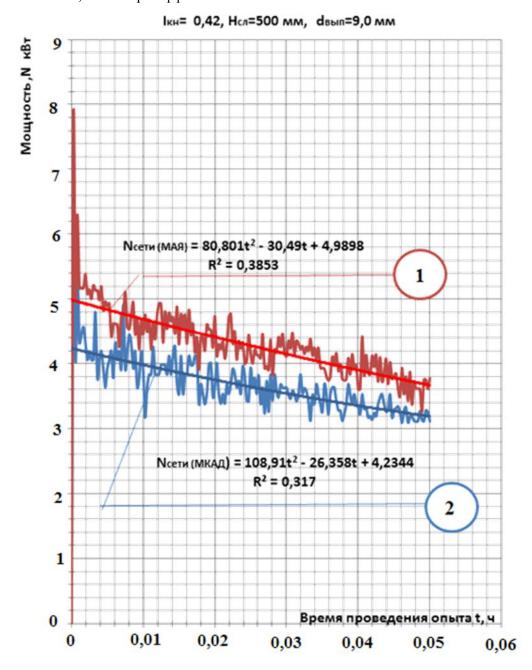


Рис. 3. Результаты измерения мощности, потребляемой из сети, в мельнице системы «МАЯ» и «МКАД» за период измельчения мергеля в опыте №1

Таблица 6 Результаты измерения энергозатрат за период измельчения в мельнице системы «МКАД»

		Матрица планирования		Энергозатраты за период измельчения Есети (МКАД), кВт·ч
№	X1	X2	X3	Үі (МКАД)
опыта	Кинематическое несоответствие ветвей замкнутого контура (Ікн)	Высота засыпки барабана исходным материалом (Нсл), мм	Диаметр выпускных отверстий в барабане (dвып), мм	
1	0,42	500	9,0	$Y_1 = \int_{0}^{0.05} (108,911 \cdot t^2 - 26,358 \cdot t + 4,2344) dt = 0,183$
2	0,42	500	5,0	$Y_2 = \int_{0}^{0.05} (992,28 \cdot t^2 - 95,573 + 4,7054) dt = 0,157$
3	0,42	260	9,0	$Y_2 = \int_{0}^{0.05} (992,28 \cdot t^2 - 95,573 + 4,7054) dt = 0,157$ $Y_3 = \int_{0.05}^{0.05} (440,91 \cdot t^2 - 38,178 + 2,678) dt = 0,105$
4	0,42	260	5,0	$Y_4 = \int_0^{0.05} (440.9 \cdot t^2 - 38.178 \cdot t + 2.679) dt = 0.105$ $Y_5 = \int_0^{0.05} (223.08 \cdot t^2 - 46.137 \cdot t + 2.679) dt = 0.127$ $Y_5 = \int_0^{0.05} (223.08 \cdot t^2 - 46.137 \cdot t + 2.679) dt = 0.127$
5	0,32	500	9,0	$Y_5 = \int_{0}^{0.05} (223,08 \cdot t^2 - 46,137 \cdot t + 2,679) dt = 0,127$
6	0,32	500	5,0	$Y_5 = \int_{0}^{0.05} (223,08 \cdot t^2 - 46,137 \cdot t + 2,679) dt = 0,127$
7	0,32	260	9,0	$Y_6 = \int_0^{0.05} (1278, 6 \cdot t^2 - 90,663 \cdot t + 3,5841) dt = 0,119$
8	0,32	260	5,0	$Y7 = \int_{0}^{0.05} (1145, 3 \cdot t^2 - 75,885 \cdot t + 2,6755) dt = 0,087$
9	0,22	380	7,0	$Y_8 = \int_{0}^{0.05} (739,59 \cdot t^2 - 53,894 \cdot t + 2,2113) dt = 0,074$
10	0,38	380	3,4	$Y_{10} = \int_{0}^{0.05} (2494, 2 \cdot t^2 - 187, 2 \cdot t + 5,9597) dt = 0,168$
11	0,38	178	7,0	$Y_{11} = \int_{0}^{0.05} (999, 14 \cdot t^2 - 76, 19 \cdot t + 2,7255) dt = 0,083$
12	0,48	380	7,0	$Y_{12} = \int_{0}^{0.05} (185,78 \cdot t^2 - 31,274 \cdot t + 3,8365) dt = 0,16$
13	0,38	380	10,4	$Y_{13} = \int_{0}^{0.05} (-365, 78 \cdot t^2 - 52, 998 \cdot t + 4,8429) dt = 0,161$
14	0,38	581,2	7,0	$Y_{14} = \int_{0}^{0.05} (-23,934 \cdot t^2 - 36,734 \cdot t + 5,6793) dt = 0,237$
15	0,38	380	7,0	$Y_{15} = \int_{0}^{0.05} (-507,53 \cdot t^2 - 50,241 \cdot t + 4,6802) dt = 0,15$
16	0,38	380	9,0	$Y_{16} = \int_{0}^{0.05} (109,71 \cdot t^2 - 36,414 \cdot t + 4,5869) dt = 0,188$
17	0,38	500	7,0	$Y_{17} = \int_{0}^{0.05} (564,98 \cdot t^2 - 45,38 \cdot t + 5,1306) dt = 0,223$
18	0,42	500	7,0	$Y_{18} = \int_{0}^{0.05} (156,87 \cdot t^2 - 23,252 \cdot t + 4,2654) dt = 0,191$
19	0,42	380	9,0	$Y_{19} = \int_{0}^{0.05} (677,87 \cdot t^2 - 81,414 \cdot t + 4,2266) dt = 0,138$
20	0,38	260	7,0	$Y_{20} = \int_{0}^{0.05} (441,26 \cdot t^2 - 56,631 \cdot t + 4,1249) dt = 0,154$
21	0,38	380	5,0	$Y_{21} = \int_{0}^{0.05} (15001 \cdot t^2 - 112,73 \cdot t + 4,731) dt = 0,158$
22	0,32	380	5,0	$Y_{22} = \int_{0}^{0.05} (1869 \cdot t^2 - 120.25 \cdot t + 3.079) dt = 0.082$
23	0,32	260	7,0	$Y_{21} = \int_{0}^{0.05} (15001 \cdot t^2 - 11273 \cdot t + 4731) dt = 0.158$ $Y_{22} = \int_{0}^{0.05} (1869 \cdot t^2 - 120.25 \cdot t + 3.079) dt = 0.082$ $Y_{23} = \int_{0}^{0.05} (927.06 \cdot t^2 - 59.825 \cdot t + 2.9253) dt = 0.11$

Таблица 7 Результаты вычисления удельных энергозатрат в мельнице системы «МКАД»

	Матрица планирования			Параметры				
№ опыта				Производитель ность в опыте $G_{\text{выхі}}$ , т	Энергозатраты за период измельчения в опыте $E_i$ , $\kappa B_T \cdot v$	Удельные энергозатраты в опыте $E_{yдi}$ , к $B$ т·ч/т		
-	$X_1$	$X_2$ $X_3$		-	-	-		
1	0,42	500	9,0	0,0293	0,183	0,183/0,0293 <b>=6,25</b>		
2	0,42	500	5,0	0,0194	0,157	0,157/0,0194= <b>8,1</b>		
3	0,42	260	9,0	0,0203	0,105	0,105/0,0203= <b>5,17</b>		
4	0,42	260	5,0	0,0138	0,107	0,107/0,0138=7,75		
5	0,32	500	9,0	0,029	0,127	0,127/0,029= <b>4,38</b>		
6	0,32	500	5,0	0,014	0,119	0,119/0,014= <b>8,52</b>		
7	0,32	260	9,0	0,018	0,087	0,087/0,018= <b>4,83</b>		
8	0,32	260	5,0	0,0142	0,074	0,074/0,0142= <b>5,21</b>		
9	0,22	380	7,0	0,039	0,223	0,223/0,039= <b>5,71</b>		
10	0,38	380	3,4	0,0136	0,168	0,168/0,0136= <b>12,4</b>		
11	0,38	178	7,0	0,0144	0,083	0,083/0,0144= <b>5,57</b>		
12	0,48	380	7,0	0,0332	0,16	0,16/0,0332= <b>4,82</b>		
13	0,38	380	10,4	0,029	0,161	0,161/0,029= <b>5,52</b>		
14	0,38	581,2	7,0	0,0315	0,237	0,237/0,0315= <b>7,52</b>		
15	0,38	380	7,0	0,0362	0,15	0,15/0,0362= <b>4,14</b>		
16	0,38	380	9,0	0,0389	0,188	0,188/0,0389 <b>=4,83</b>		
17	0,38	500	7,0	0,0363	0,223	0,223/0,0363= <b>6,14</b>		
18	0,42	500	7,0	0,0323	0,191	0,191/0,0323= <b>5,91</b>		
19	0,42	380	9,0	0,0283	0,138	0,138/0,0283= <b>4,89</b>		
20	0,38	260	7,0	0,0224	0,154	0,154/0,0224= <b>6,88</b>		
21	0,38	380	5,0	0,0181	0,158	0,158/0,0181= <b>8,73</b>		
22	0,32	380	5,0	0,0130	0,082	0,082/0,0159= <b>6,31</b>		
23	0,32	260	7,0	0,0351	0,185	0,185/0,0351= <b>5,27</b>		

Полученные результаты и зависимость удельных энергозатрат от кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура являются ориентиром для выбора оптимальных конструктивных и режимных параметров вертикальной мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД» при их проектировании, обеспечивающие минимальные удельные энергозатраты при измельчении принятого для исследования материала.

На основе полученных результатов построены графики зависимости удельных энергозатрат от величины кинематического несоответствия

ветвей замкнутого контура. В табл. 8 представлены исходные данные для построения графика удельных энергозатрат в зависимости от кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура, а на рис. 4 построены эти зависимости при заданных параметрах — высоты засыпки  $H_{\rm cn}$ =380 мм и диаметре выпускных отверстий в барабане  $d_{\rm вып}$ =7,0 мм для мельницы системы «МКАД».

Исходные данные для построения графиков, принятые из полнофакторного эксперимента, представлены в табл. 8.

Таблица 8
Исходные данные для построения графика удельных энергозатрат в зависимости от кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура

№п/п	Кинематическое	Высота засыпки ис-	Диаметр выпускных от-	Удельные энергоза-	
	несоответствие $I_{\mbox{\tiny KH}}$	ходного материала в	верстий в барабане $d_{\text{вып}}$ ,	траты $E_{\rm уді(MKAД)}$ ,	
		барабан, $H_{c\pi}$ , мм	MM	кВт·ч/т	
1	0,22	380	7,0	5,71	
2	0,38	380	7,0	4,14	
3	0,42	380	7,0	5.52	
4	0,48	380	7,0	4,89	

Построение графика зависимости удельных энергозатрат в зависимости от кинематического

несоответствия ветвей замкнутого контура мельницы системы «МКАД» производилось с помощью программы «AdvancedGrapher».

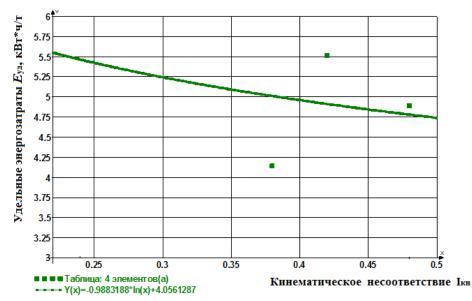


Рис. 4. График зависимости удельных энергозатрат измельчения от кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура в мельнице системы «МКАД»

Анализ полученной зависимости экспериментально подтверждает дополнительного влияния силовой составляющей процесса измельчения в мельнице данной системы, возникающей «циркулирующей» энергии в замкнутом контуре при передаче по её ветвям разных по величине потоков мощности к столбу измельчаемого материала [22]. Так как с увеличением величины кинематического несоответствия вал электродвигателя будет деформироваться (скручиваться) на большую величину относительно первоначального состояния, то и потенциальная энергия в нём будет расти, а удельные энергозатраты будут снижаться, что наблюдается на графике (рис. 3).

Аналогично рассмотренному выше графику будет изменяться удельная энергоёмкость в зависимости от других сочетаний влияющих параметрах процесса.

**Выводы.** Полученные экспериментальным путём данные зависимости удельных энергозатрат в зависимости от величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура для мельницы с индифферентной структурной группой системы «МКАД»:

1) экспериментом подтвердить возможность полезного использования так называемой «циркулирующей» энергии для дополнительного силового воздействия на измельчаемый материал за равный период измельчения, что обеспечивает снижение энергозатрат в сравнении с мельницей системы «МАЯ»;

- 2) получить более низкие удельные энергозатраты на измельчение материала, достигающие 32,6 % при измельчении мергеля с исходной крупностью  $D_{\text{исx}}$ =30 мм;
- 3) путём изменения величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура регулировать производительность и энергозатраты, обеспечивая получение готового продукта измельчения с требуемыми характеристиками;
- 4) построить зависимости удельных энергозатрат в зависимости от кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура, что позволит при проектировании и эксплуатации мельниц этой системы устанавливать оптимальные режимные и конструктивные параметры, обеспечивающие значительное снижение энергопотребления и удельных энергозатрат измельчения материала.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Хетагуров В.Н. Разработка и проектирование центробежных мельниц вертикального типа. Владикавказ: Терек, 1999. 225 с.
- 2. Гегелашвили М. В. Теория и практика мельниц динамического самоизмельчения. Владикавказ: Терек, 2001. с. 208.
- 3. Егоров И.Н. К вопросу об интенсификации помола в бильной мельнице // Сб. трудов международного научного симпозиума машиностроителей и механиков. 2014. С. 189—193.
- 4. Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И., Пилов В.И. Измельчение. Энергетика и технология. М.: Издательский дом «Руда и Металлы». 2007. 296 с.

- 5. Субботин М. Ф. Анализ современного состояния и перспективы развития дробильно-измельчительного оборудования // Вестник Читинского гос ун-та (Вестник ЧитГУ). Чита: ЧитГУ, 2010. (№3(5)). С. 100-105.
- 6. Ревнивцев В.И., Капралов Е.Л., Костин И.М. и др. В кн.: Совершенствование процессов дробления, измельчения, грохочения и классификации руд и продуктов обогащения. Л., Механобр, 1985.
- 7. Технология сырья на перепутье. Проблемы и перспективы. Пер. с англ./Под ред. Б. А. Уилса, Р. В. Барея. М.: Недра, 1992. 272 с.
- 8. Дровников А.Н., Остановский А.А. Создание измельчителя динамического самоизмельчения // Инженерный вестник Дона. Номер. 2012. С. 5–6.
- 9. Дровников А.Н., Остановский А.А., Никитин Е.В., Павлов И.А, Осипенко Л.А., Агафонов Н.А Измельчитель динамического самоизмельчения Пат. на изобретение №2465960 РФ, 5 с.
- 10. Дровников А.Н., Остановский А.А., Маслов Е.В., Бурков Н.В., Романенко Г.Н. Мельница. Пат. на изобретение № 2496581 Российская Федерация. 5 с.
- 11. Пат. на изобретение №2520008 Российская Федерация. МПК В02С13/14. Измельчитель динамического самоизмельчения материала/ Дровников А.Н., Остановский А.А., Маслов Е.В., Рыбальченко А.Н.; 2013105689/13; заявл. 11.02. 2013; Патентообладатель: Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса (ФГБОУ ВПО "ЮРГУЭС"), опубл. 20.06 2014 г., Бюл. №17. 4 с.
- 12. Дровников А.Н., Остановский А. А., Бурков Н. В., Маслов Е.В. Усовершенствование измельчителей динамического самоизмельчения. // Юбилейный международный сборник научных трудов, посвящённый 40-летию кафедры «Машины и оборудование бытового и жилищно-бытового назначения, 2013. С. 58–61.
- 13. Гегелашвили М.В. Определение границ скоростных режимов движения материала в мельнице динамического самоизмельчения «МАЯ» // Механизмы и машины ударного, периодического и вибрационного действия. Матер, междунар. симп. (Орел 22- 24 нояб. 2000 г.) Орел ОПУ. 2000 С. 245–249.

- 14. Крайнев А.Ф. Словарь—справочник по механизмам. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1987. 560 с.
- 15. Никитин А.А. Явление возврата мощности через замыкающую кинематическую цепь // Тр. Днепропетровского ин-та железнодорожного тр-та, вып. 19. Днепропетровск, 1948. С. 161–239.
- 16. Остановский А.А., Дровников А.Н. Закономерности передачи мощности к измельчаемому материалу в мельницах системы «МКАД» // Наука и образование. 2017. №5.
- 17. Дровников А.Н., Остановский А.А. Системы мельниц динамического самоизмельчения контурного типа. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2017. 183 с.
- 18. Остановский А.А., Осипенко Л.А., Дровников А. Н., Маслов Е.В. Сравнительный анализ энергоэффективности вертикальных мельниц динамического самоизмельчения системы «МАЯ» и «МКАД» // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова, 2018. 9. С. 75–82.
- 19. Пат. на полезную модель №175743 РФ, МПК GOIL 3/24. Стенд для измерения мощности в замкнутом контуре мельницы динамического самоизмельчения. Остановский А. А., Дровников А.Н., Рыбальченко Н.Г., Рыбальченко А.Н., Черкесова Э.Ю; заявл. 13.12.2016, заявитель и патентообладатель Остановский А.А., опубл. 23.05.2018, Бюл. №15.
- 20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661841 «Программа расчёта угла скручивания вала электромеханической системы стенда для измерения мощности в замкнутом контуре мельницы динамического самоизмельчения». Остановский А.А., Алехин А.С., Козырев П.П., Шейрих В.С.; заявл. 14.06.2018, заявитель и патентообладатель Донской государственный технический университет (ДГТУ); зарегистрировано 19.09.2018 года.
- 21. Остановский А.А. Анализ и выбор рациональной структурной схемы вертикальной мельницы динамического самоизмельчения // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2018. № 1. С. 66—73.

#### Информация об авторах

**Остановский Александр Аркадьевич**, кандидат технических наук, доцент, главный инженер. E-mail: ostanovskiy51@mail.ru. ООО «Оптимастрой». Россия, 141130, г. Руза, Московской области, улица Школьная, дом 28.

Поступила в декабре 2018 г.

© Остановский А.А., 2019

## 1,\*Ostanovskiy A.A.

<sup>1</sup>LLC "Optimastroy" Russia, 141130 Ruza, Moscow Region, Shkolnaya St. 28 \*E-mail: ostanovskiy51@mail.ru

# ANALYSIS OF THE IMPACT OF KINEMATIC INSUFFICIENCY OF BRANCHES OF A CLOSED CONTOUR REDUCED POWER INPUT IN THE MILL OF THE MKAD SYSTEM

Abstract. The necessity of improving technological operations in the processing of mineral raw materials and the use of energy-efficient grinding equipment is substantiated. The technical and technological benefits of vertical dynamic autogenous grinding mills are given. They are based on a method of self-grinding of the material, which allows to reduce the specific energy consumption. The technical advantages of the MKAD system mills, the structural schemes of which have an indifferent group are explained. Since the mills of this system additionally use so-called "circulating" energy, depending on the degree of deformation of the drive motor shaft, it is necessary to study the effect of kinematic mismatch of closed-circuit branches on the specific energy consumption of grinding. The graphic dependences of kinematic discrepancy effect on the specific energy consumption of grinding in the MKAD system mills are presented.

**Keywords:** mill, energy efficiency, specific energy consumption, block diagram, indifferent groups, closed loop, kinematic discrepancy, kinetic energy, potential energy, circulating energy

#### REFERENCES

- 1. Khetagurov V.N. Development and design of centrifugal mills of vertical type. Vladikavkaz: Terek, 1999. 225p.
- 2. Gegelashvili M.V. Theory and Practice of Dynamic Self-Grinding Mills. Vladikavkaz: Terek, 2001, p. 208.
- 3. Egorov I.N. On the question of the intensification of grinding in a mobile mill. Sb. labor of the international scientific symposium machine builders and mechanics, 2014, p. 189–193.
- 4. Pivnyak G.G., Weisberg L.A., Kirichenko V.I., Pilov V.I. Shredding. Energy and technology. M .: Publishing house "Ore and Metals", 2007, 296 p.
- 5. Subbotin M.F. Analysis of the current state and development prospects of crushing and grinding equipment. West of the Chita State University (Vestnik ChitSU). Chita: ChitSU, 2010. (no. 3 (5)), Pp. 100–105.
- 6. Revnivtsev V.I., Kapralov E.L., Kostin I.M. and others. In the book: Improving the processes of crushing, grinding, screening and classification of ores and enrichment products. L., Mekhanobr, 1985.
- 7. Technology of raw materials at a crossroads. Problems and prospects. Per. from English. Ed. B.A. Wils, R.V. Bareya. M.: Nedra, 1992, 272 p.
- 8. Drovnikov A.N., Ostanovskiy A.A. Creation of a shredder for dynamic self-grinding. // Engineering Bulletin of the Don. Room, 2012, p. 5–6
- 9. Drovnikov A.N., Ostanovskiy A.A., Nikitin E.V., Pavlov I.A., Osipenko L.A., Agafonov N.A. The Grinder of Dynamic Self-Grinding Pat. the invention no. 2465960 of the Russian Federation, 5 p.
- 10. Drovnikov A.N., Ostanovskiy A.A., Maslov E.V., Burkov N.V., Romanenko G.N. Mill. Pat for

invention no. 2496581 Russian Federation. 5 p.

- 11. Pat. for invention №2520008 Russian Federation. IPC B02C13 / 14. From the grinder of the dynamic self-grinding of the material / Drovnikov A.N., Ostanovskiy A.A., Maslov E.V., Rybalchenko A.N.; 2013105689/13; declare 11.02. 2013; Patent holder: South-Russian State University of Economics and Service (FSBEI HPO "YURGUES"), publ. 20.06 2014, Byul. no. 17. 4 p.
- 12. Drovnikov A.N., Ostanovskiy A.A., Burkov N.V., Maslov E.V. Improvement of dynamic self-grinding shredders. The jubilee international collection of scientific papers dedicated to the 40th anniversary of the department "Machines and equipment for household and residential purposes? 2013, pp. 58–61.
- 13. Gegelashvnln M.V. Determination of the boundaries of high-speed modes of movement of the material in the MAY dynamic self-grinding mill // Mechanisms and machines of percussion, periodic and vibrational action. Mater, mezhdynar. simp (Eagle, 22-24 Nov. 2000). Eagle OPU. 2000 pp. 245–249.
- 14. Kraynev A.F. Dictionary-reference mechanisms. 2nd ed., Pererab. and add. M.: Mashinostroenie, 1987, 560 p.
- 15. Nikitin A.A. The phenomenon of the return of power through the closing kinematic chain. Tr. Dnepropetrovsk Institute of Railroad Tr-ta, vol. 19, Dnipropetrovsk, 1948, pp. 161–239.
- 16. Ostanovskiy A.A., Drovnikov A.N. Patterns of power transmission to grindable material in the mills of the MKAD system. Science and Education. 2017, no. 5.
- 17. Drovnikov A.N., Ostanovskiy A.A. Systems of mills of dynamic self-milling of contour type. South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after MI Plateau-va. Novocherkassk:

YuPGPU (NPI), 2017, 183 p.

- 18. Ostanovskiy A.A., Osipenko L.A., Drovnikov A.N., Maslov E.V. Comparative analysis of the energy efficiency of vertical mills of dynamic autogenous grinding of the MAYA and MKAD system. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no. 9, pp. 75–82.
- 19. Pat. for useful model №175743 RF MPC GOIL 3/24. Stand for measuring power in a closed loop mill dynamic autogenous grinding. Stop A. A., Drovnikov A.N., Rybalchenko N.G., Rybalchenko A.N., Cherkesova E.U.; for-yavl. 12/13/2016, applicant and patent holder Ostanovskiy AA, publ. 05.23.2018 Bul. no. 15.
- 20. Certificate of state registration of computer program no. 2018661841 "Program for calculating the angle of torsion of the shaft of the electromechanical system of the bench for measuring power in a closed loop of a dynamic self-grinding mill". Ostanovskiy A.A., Alekhin A.S., Kozyrev P.P., Sherikh V.S.; declare 06/14/2018, the applicant and patentee Don State Technical University (DSTU); Registered on 19.09.2018.
- 21. Ostanovskiy A.A. Analysis and selection of a rational structural scheme of a vertical mill of dynamic self-grinding. News of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical science, 2018. no. 1, pp. 66–73.

Information about the author

**Ostanovsky, Alexander A.** PhD, Assistant professor, chief engineer. E-mail: ostanovskiy51@mail.ru. LLC "Optimastroy", Russia, 141130 Ruza, Moscow Region, Shkolnaya St. 28

Received in Desember 2018

## Для цитирования:

Остановский А.А. Анализ влияния кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура на удельную энергоёмкость в мельнице системы «МКАД» // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №3. С. 134–148. DOI: 10.34031/article 5ca1f635ef2844.35993706

## For citation:

Ostanovskiy A.A. Analysis of the impact of kinematic insufficiency of branches of a closed contour reduced power input in the mill of the mkad system. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 134–148. DOI: 10.34031/article\_5ca1f635ef2844.35993706

DOI: 10.34031/article\_5ca1f63662e207.78327984

1,\*Юдин К.А., <sup>2</sup>Харин Н.П.

<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

<sup>2</sup>ОАО "Завод ЖБК-1"

Россия, 308013, Белгород, ул. Коммунальная, д. 5

\*E-mail: ydin.ka@bstu.ru

# ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ ДЛЯ СМЕСИТЕЛЯ С ДВУНАПРАВЛЕННЫМ ВРАЩАТЕЛЬНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА МАТЕРИАЛ

Аннотация. Рассматриваются смесители периодического действия. Представлена целесообразность разработки смесителей нового типа. Выполнен литературный обзор отечественных и зарубежных авторов по данной тематике. Представлены авторская кинематическая схема смесителя, описывающие воздействие на перемешиваемый в смесительной камере материал относительно двух взаимно перпендикулярных горизонтальных осей. Особенности движения материала в смесителе позволяют говорить о наличии элементов гироскопического эффекта. Вращение смесительной камеры осуществляется посредством ременной, цепной и конической передачи. Возникающее сложное пространственное движение частиц материала можно регулировать частотным преобразователем и подбором соответствующих зубчатых колес. Представлен алгоритм моделирования конической передачи для смесителя с двунаправленным вращательным воздействием на материал. Коническая зубчатая передача установлена на водиле. Проведены предварительные экспериментальные исследования. Представлена трехмерная модель конической зубчатой передачи. Показана корректировка установочных размеров для нее. Трехмерная модель конической зубчатой передачи, реализованная с помощью программного продукта NX дополнена таблицей для ее расчета и начальной модель-заготовкой. Показана практическая реализации конической зубчатой передачи в металле. Сделаны выводы по моделированию.

**Ключевые слова:** смеситель периодического действия, вращение камеры относительно двух взаимно перпендикулярных осей, автоматизация проектирования, коническая зубчатая передача.

**Введение.** Экономическая ситуация вынуждает реализовывать инновационные подходы в вопросах переработки различных материалов. Эффективное перемешивание различных материалов является проблемным направлением, требующим значительных ресурсов.

Интересным инновационным проектом является реализация двунаправленного вращательного воздействия на материал в смесителе периодического действия.

Предлагаемая патентно-чистая конструкция смесителя претерпела изменения, однако важнейшие элементы остались прежними. Двунаправленное вращательное воздействие на смешиваемый материал в смесителе со сферической смесительной камерой реализуется вращением водила с камерой относительно горизонтальной оси и собственно камеры относительно второй оси, перпендикулярной первой [1]. Для этого применяем закрепленную на водиле ортогональную коническую передачу с прямыми зубьями и цепную передачу с натяжителями цепи.

Движение частиц перемешиваемого материала происходит по траекториям свободного падения, а благодаря установленной конической передаче суперпозиция сил внутри смесительной

камеры сферической формы способствует перемещению частиц материала по сложной траектории. С одной стороны, центробежные силы обусловлены вращением водила с закрепленной на нём сферической смесительной камерой относительно горизонтальной оси. С другой стороны, центробежные силы обусловлены вращением собственно смесительной камеры относительно второй оси, перпендикулярной первой. Эта траектория может меняться при варьировании частоты вращения смесительной камеры как с помощью частотного преобразователя, так и подбором элементов ременной, цепной и конической передач.

Представим кинематическую схему предлагаемого устройства, реализующего двунаправленное вращательное воздействие на материал (рис.1).

Рассмотрим продолжение тематики использования смесителя периодического действия нового типа, описанного ранее [2, 3]. Возникающее двунаправленное вращательное воздействие на материал предполагает рассмотрение задач взаимодействий частиц материала как между собой, так и со стенками смесительной камеры. Матема-

тический аппарат этих взаимодействий был описан ранее [2, 3]. Одним из ответственных узлов предлагаемого смесителя является коническая передача, что предполагает внесений изменений в исходные данные и приводит к корректировке проектирования конической передачи и смесителя в целом. Для прямозубой конической передачи профили зубьев конического колеса, построенные на развертке среднего дополнительного конуса близки к профилям зубьев эквивалентного цилиндрического прямозубого колеса. Выбор параметров и расчет геометрии конических колес включает порядка 50 формул и начинается с выбора формы зубьев [4], поэтому целесообразно применять автоматизированное проектирование.

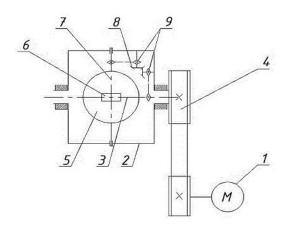


Рис. 1. Кинематическая схема устройства для перемешивания материалов с вращением камеры относительно двух взаимно перпендикулярных осей:

1 – привод; 2 – вращающееся водило;

- 3 горизонтальная ось; 4 ременная передача;
- 5 смесительная камера; 6 загрузочный люк;
- 7 вторая ось; 8 коническая зубчатая передача; 9 цепная передача

Для этого используются современные программные продукты, одним из которых является NX.

Реализация цифровой модели предлагаемого устройства – смесителя периодического действия позволит проанализировать его конструктивные особенности и минимизировать ошибки этапов моделирования.

Программа NX характеризуется большими функциональными возможностями, высокой производительностью и стабильностью работы. Программа NX поддерживает разработку и изготовление изделия на всех этапах жизненного цикла — от создания трехмерных моделей деталей, сборок и чертежей до формирования программы для изготовления детали на станке с ЧПУ и проектирования цехов и различных технологических циклов. Эти особенности, а также широ-

кий функционал NX позволили создать трёхмерную модель смесителя на основе исходных данных.

Необходима тщательная конструкторская проработка сборочных единиц и деталей машины для их эффективного применения.

Проектирование смесителя в системе NX осуществлялось методом "снизу-вверх", что предполагает в начале получение электронноцифровых моделей всех составных деталей и узлов, а затем в модуле NX «Сборки» их сопряжение относительно друг друга.

Одной из важных задач моделирования предлагаемого смесителя, решаемых с помощью NX, является корректировка присоединительных размеров компонентов на основе новых технических решений, которые неизменно возникают на этапах работы.

Важной сборочной единицей при построении модели смесителя является коническая зубчатая передача, поэтому возникла необходимость корректировки размеров ее крепления. При этом следует учесть профиль конических зубчатых колёс и особенности расчета в связи с внесёнными изменениями. Созданная цифровая модель конической зубчатой передачи смесителя представлена на рис.2.

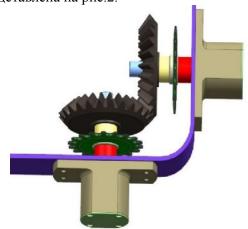


Рис. 2. Цифровая модель конической зубчатой передачи смесителя

В нашем случае, при позиционировании конической зубчатой пары было определено несоответствие размеров крепления их узлов к вращаемому водилу. В результате чего полученная конструкция смесителя работала бы менее эффективно из-за повышенного износа в месте контакта шестерен. Был произведен повторный расчёт расстояния от вершины колеса до плоскости внешней окружности вершин зубьев, на основе которого скорректированы значения позиций мест крепления узлов (рис. 3, рис.4). Это расстояние в программе задано положением центрального и периферийных отверстий (прошедшая корректировка: с 273,8 мм на 266,8 мм).

Получение цифровой модели конического зубчатого колеса происходило при применении заготовки и реализации эвольвенты для "нарезки" зубьев колеса, что отражается на рис. 5. Готовый элемент получается при объединении двух эвольвент и создания профиля впадины, что

соответствует реальному представлению об изготовлении зубчатых колёс. При этом конечный вариант модели создается применением массива необходимого количества на "вырезанный" элемент впадины.

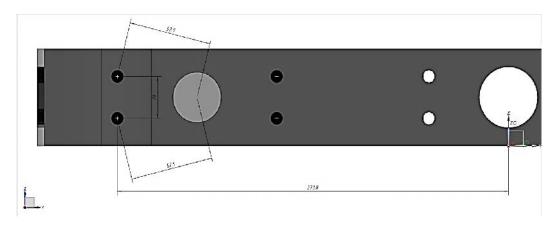


Рис. 3. Найденные несоответствия размеров

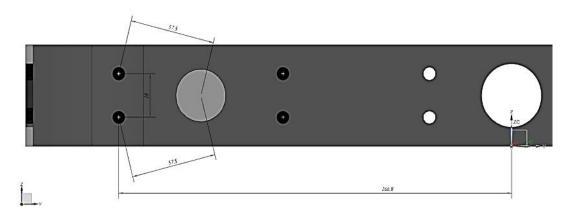


Рис. 4. Исправленный вариант

Такая корректировочная работа над моделью приводит к минимизации ошибок, а также позволяет получить максимально эффективный вариант готовой модели. При прохождении всех этапов проектирования было решено несколько подобных задач.

Необходимым условием построения эвольвенты для конического зубчатого колеса было изменение его диаметра со 122 мм до 120 мм, что можно увидеть в предлагаемой таблице на рис. 6. Эвольвента, построенная с помощью сплайнов заданных по закону, автоматически приходит к нужному виду благодаря зависимостям между переменными в таблице. Получаемая величина соответствует характеристикам в соответствии с ГОСТом.

Создаваемую электронно-цифровую модель смесителя в дальнейшем можно использовать

для расчёта на прочность, динамический и кинематический анализ, а также для рекомендаций по практической реализации смесителя.

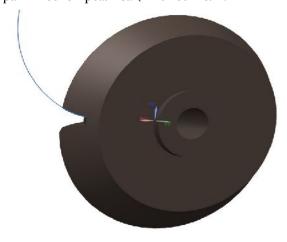


Рис. 5. Модель конического колеса с эвольвентой

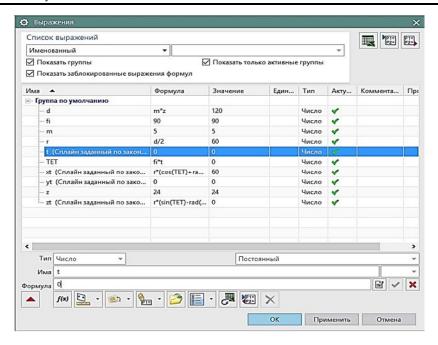


Рис. 6. Таблица значений переменных для построения эвольвенты конического колеса



Рис. 7. Практическая реализация описываемой конической зубчатой передачи

Таким образом, отслеживается весь жизненный цикл для конической зубчатой передачи, начиная с предпроектных исследований, разработки проектной документации, создания цифро-

вой модели, корректировки размеров и взаимного расположения компонентов передачи, реализации передачи в металле и дальнейшей эксплуатации предлагаемого смесителя.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Юдин К.А., Семикопенко И.А., Фадин Ю.М. Устройство для перемешивания материалов. Патент на полезную модель №174442 РФ МПК7В01 F9/02, Бюл. №29, 4 с.
- 2. Юдин К.А., Дегтярь А.Н., Харин Н.П. Моделирование двунаправленного вращательного воздействия на материал в сферической смесительной камере // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 126–132.
- 3. Юдин К.А., Дегтярь А.Н., Стовпенко А.С. Двунаправленное вращательное воздействие на материал в сферической смесительной камере // Известия Вузов. Строительство. 2016. №7. С.99–106.
- 4. Киркач Н.Ф., Баласанян Р.А. Расчет и проектирование деталей машин: Учебное пособие для техн.вузов. Х.: Основа, 1991. С. 60–82.

#### Информация об авторах

**Юдин Константин Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46. E-mail: kyudin@mail.ru.

**Харин Никита Петрович**, инженер-конструктор 2 категории ОАО "Завод ЖБК-1". Россия, 308013, Белгород, ул. Коммунальная, д. 5. E-mail: bigpandanick@yandex.ru.

Поступила в декабре 2018 г.

© Юдин К.А., Харин Н.П., 2019

## 1,\*Yudin K. A., 2Kharin N.P.

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46 <sup>2</sup>OJSC "Plant Reinforced Concrete Structures-1" Russia, 308013, Belgorod, st. Kommunalnaya, 5 \*E-mail: ydin.ka@bstu.ru

# THE MODELING OF A BEVEL GEAR FOR MIXER WITH BI-DIRECTIONAL ROTATIONAL IMPACT ON THE MATERIAL

Abstract. A batch mixer is considered. The feasibility of developing a new type of mixers is presented. A literary review of domestic and foreign authors on this subject is made. The author's kinematic scheme of the mixer is presented. It describes the effect on the material mixed in the mixing chamber with respect to two mutually perpendicular horizontal axes. Movement features of material in the mixer suggest the presence of elements of the gyroscopic effect. Rotation of the mixing chamber is carried out by means of belt, chain and conical transmission. The resulting complex spatial motion of the material particles can be controlled by a frequency converter and the selection of appropriate gears. An algorithm for modeling the conical transmission for a mixer with a bi-directional rotational effect on the material is presented. Bevel gear is set on the carrier. Preliminary experimental studies have been conducted. A three-dimensional model of the bevel gear is presented. Adjustment of the installation dimensions is shown. A three-dimensional model of a bevel gear transmission, using the NX software product, is supplemented with a table for its calculation and an initial stocking model. The practical implementation of bevel gears in metal is shown. conclusions on modeling are made.

**Keywords:** batch mixer, rotation of the chamber with respect to two mutually perpendicular axes, design automation, bevel gear.

#### REFERENCES

- 1. Yudin K.A., Semikopenko I.A, Fadin Y. M. A device for mixing materials, applicant and patentee. Patent on useful model no. 174442 13.10.17.
- 2. Yudin K.A., Degtyar A.N., Kharin N.P. Modelling of bi-directional rotary impact on the material in a spherical mixing chamber. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2017, no. 5, pp. 126–132.
- 3. Yudin K.A., Degtyar A.N., Stovpenko A.S. Bi-directional rotational impact on the material in a spherical mixing chamber. News of higher educational institutions. Construction, 2016, no. 7, pp. 99–106.
- 4. Kirkach N.F., Balasanian R.A. Calculation and design of machine parts. K.: Foundation, 1991. pp. 60–82.

Information about the authors

**Yudin, Konstantin A.** PhD, Assistant professor. Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46. E-mail: kyudin@mail.ru

**Kharin, Nikita P.** Design Engineer 2 categories of OJSC "Plant Reinforced Concrete Structures-1". Russia, 308013, Belgorod, st. Kommunalnaya, 5. E-mail: bigpandanick@yandex.ru

Received in Desember 2018

#### Для цитирования:

Юдин К.А., Харин Н.П. Особенности моделирования конической передачи для смесителя с двунаправленным вращательным воздействием на материал // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 149—154. DOI:  $10.34031/article\_5ca1f63662e207.78327984$ 

#### For citation:

Yudin K.A., Kharin N.P. The modeling of a bevel gear for mixer with bi-directional rotational impact on the material. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 149–154. DOI: 10.34031/article\_5ca1f63662e207.78327984

DOI: 10.34031/article\_5ca1f636d3f584.58960670 <sup>1</sup>,\*Петько В.Г., <sup>2</sup>Никитина И.П.

<sup>1</sup>Оренбургский государственный аграрный университет Россия, 460014, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18 
<sup>2</sup>Оренбургский государственный университет Россия, 430005, г. Оренбург, пр. Победа, д. 13 
\*E-mail: vgpetko@mail.ru

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВОДОГАЗОВОГО УЗЛА

Аннотация. В статье представлены новые технические решения, направленные на повышение эффективности работы водогазового узла газовых колонок, используемых для нагревания воды. На основании анализа различных конструкций водогазовых узлов газовых колонок, получивших широкое распространение для нагрева воды в бытовых условиях, было выявлено, что основным общим недостатком этих водогазовых узлов является наличие механической связи мембраны с клапаном подачи газа, осуществляемой через сальник между газовой и водяной камерами каждого узла. Такая конструктивная особенность из-за недолговечности сальника приводит к частому отказу колонок в процессе эксплуатации, сопровождающемуся материальными потерями и опасностью проникновения газа в помещение.

В работе предложена новая конструктивная схема водогазового узла, в котором механическая связь между мембраной и клапаном заменена связью, реализуемой магнитным полем двух дисковых магнитов. Магниты ориентированы друг по отношению к другу одноимёнными полюсами и расположены по обе стороны немагнитной перегородки, разделяющей водяную и газовую камеры водогазового узла. В предложенном водогазовом узле исключаются утечки воды и газа, так как он не содержит сальниковых уплотнений. А отсутствие трения при передаче усилия от мембраны к клапану подачи газа повышает точность срабатывания клапана. Также повышается стабильность порога ограничения подачи воды.

Предложена методика расчёта основных геометрических и силовых параметров водогазового узла разработанной конструкции, предполагающая использование снятой экспериментально зависимости силы отталкивания магнитов от расстояния между их полюсами.

**Ключевые слова:** трение и износ, газовая колонка, мембрана, клапан, магнит, сопло Вентури.

Введение. Бурное развитие малоэтажного строительства, а также гостиничного бизнеса приводят к актуализации проблем эффективного использования водонагревательных аппаратов. Различают водонагреватели с поверхностным нагревом (тепло передается воде при соприкосновении ее с поверхностью нагретых элементов) и с контактным нагревом - при использовании энергии горячего пара, солнца или газа. Водонагреватели применяют в системах горячего водоснабжения, водяного отопления, нагрева воды для котельных агрегатов, для бытовых и других нужд. Современный рынок предлагает широкий выбор водонагревателей различных видов: электрические проточные водонагреватели; электрические накопительные водонагреватели; газовые проточные водонагреватели; газовые накопительные водонагреватели; электрические проточные водонагреватели и др. [1–7].

Для нагрева воды в домах, где отсутствует центральное горячее водоснабжение, в настоящее время используются преимущественно газовые колонки. Все газовые колонки имеют одинаковую схему. Основными их элементами являются: горелка, используемая для нагревания

воды, и автоматика, которая обеспечивает безопасную работу газовой колонки. В этих аппаратах осуществляется плавное регулирование температуры воды, при этом автоматика обеспечивает ее стабильность и независимость от резких перепадов напора воды.

Важнейшие риски газового оборудования связаны с открытым пламенем. Это – пожаро- и взрывоопасность, а также вредность продуктов сгорания газа для людей их вдыхающих [8]. Во всех современных моделях существует система контроля пламени: колонка автоматически отключается при его отсутствии, что предотвращает взрыв газа.

Проведенные исследования в этой области и наблюдения авторов показали, что имеются отказы элементов аппарата проточного газового водонагревателя [9, 10].

Объект и методы исследований. Наиболее широко распространены в России газовые колонки, выпускаемые отечественным производителем — Армавирским заводом газовой аппаратуры [11]. Центральным элементом этих колонок является водогазовый узел. Он содержит клапан подачи газа, расположенный в газовой камере, и мембранный регулятор (ограничитель) подачи

воды, расположенный в водяной камере. Клапан подачи газа соединён с мембраной через шток и открывается путём воздействия на него со стороны последней, как только расход воды через теплообменник превысит минимально допустимую для данной колонки величину. Установленными на штоке двумя сальниковыми уплотнениями осуществляется разделение газовой и водяной полостей.

Путём длительного наблюдения за работой таких колонок было установлено, что в среднем за год их эксплуатации происходит износ сальникового уплотнения. В результате вода и газ, в постепенно увеличивающихся количествах, поступают в жилое помещение. Возникает опасность аварийной загазованности помещения. Вызов аварийной газовой службы и замена сальников обходится потребителю в сумму, сопоставимую со стоимостью самой колонки, а кроме того сопровождается неудобствами, связанными с отсутствием на неопределённое время горячей воды. Недостатком такого водогазового узла является также и то, что трение в сальниковых

уплотнениях снижает точность регулирования подачи воды.

Поэтому для исключения влияния процессов изнашивания сальникового уплотнения на работоспособность оборудования была разработана принципиально новая конструкция водогазового узла, в котором связь между клапаном подачи газа и мембраной осуществляется через магнитное поле двух магнитов [12].

На рис. 1 представлено устройство предлагаемого водогазового узла, состоящее из двух отсеков: водяного 1 и газового 2. Отсеки разделены немагнитной (из латуни или нержавеющей стали) перегородкой 3. В корпусе 4 водяного отсека установлена мембрана 5. Она делит полость корпуса на две полости: повышенного давления 6 и пониженного давления 7. Полости соединены между собой через нагнетающий 8 и всасывающий 9 выводы эжектора 10. Со стороны полости повышенного давления мембрана механически связана с клапаном 11 ограничения подачи холодной воды, а со стороны пониженного давления подпружинена предварительно напряжённой пружиной 12.

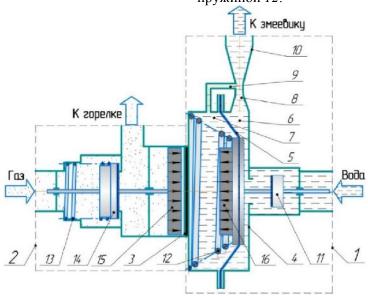


Рис. 1. Устройство водогазового узла

В газовом отсеке 2 установлен подпружиненный в сторону седла пружиной 13 клапан 14 подачи газа. Он штоком связан с магнитом 15, примыкающим к перегородке 3. Точно такой же магнит 16 установлен с противоположной стороны перегородки на мембране 5. При этом магниты ориентированы друг по отношению к другу одноимёнными полюсами.

Функционирует водогазовый узел следующим образом. Будем считать, что в исходном состоянии вентиль на выходе змеевика (на схеме не показан) закрыт. Вода через эжектор 10 не протекает, поэтому давление в полостях 6 и 7 с обеих

сторон мембраны 5 одинаковое. Мембрана под действием предварительно напряжённой пружины 12 занимает крайнее правое положение. При этом клапан 11 ограничения подачи воды полностью открыт, а клапан 14 подачи газа под действием пружины 13 закрыт.

По мере открывания вентиля, установленного на выходе змеевика, будет увеличиваться подача воды, протекающей, в том числе, и через эжектор 10. В результате давление в полости 7 будет уменьшаться с увеличением подачи и, когда подача достигнет минимально допустимой для данной колонки, мембрана 5 под действием

разности давлений с обеих её сторон преодолеет сопротивление пружины 12 и начнёт перемещаться справа налево. Расстояние между магнитами 15 и 16 будет уменьшаться, а сила отталкивания их друг от друга увеличиваться и, когда она станет больше силы, с которой пружина 13 прижимает клапан 14 к седлу, клапан сместится влево и откроет доступ газа к горелке. При такой минимальной подаче воды температура её будет максимально допустимой.

Дальнейшее открывание вентиля на выходе змеевика будет сопровождаться увеличением подачи воды и понижением её температуры. Это даёт возможность, регулируя степень открытия вентиля, устанавливать необходимую температуру нагрева воды. Однако в случае нестабильного давления воды в водопроводе установленная температура будет непредсказуемо изменяться, что создаст определённые неудобства при пользовании этой водой. В этом случае вентиль открывается полностью и подача воды увеличивается настолько, что произойдёт ещё большее уменьшение давления в полости 7. Мембрана 5 сместится ещё левее, клапан 11 начнёт ограничивать дальнейшее увеличение подачи воды, а, следовательно, и ограничивать уменьшение её температуры до приемлемого уровня. Колебания давления воды в водопроводе не будут приводить при этом к колебаниям температуры воды на выходе змеевика.

При закрытии вентиля, мембрана под действием пружин смещается влево и система переходит в исходное состояние.

Результаты исследований. Естественно, что нормальное функционирование водогазового узла будет происходить только при согласованных силовых характеристиках пружин и магнитов, а также при правильной установке всех основных размеров водогазового узла. Ниже приведена методика их расчёта на примере расчёта размеров и выбора основных конструктивных элементов конкретного варианта водогазового узла. При этом будем считать, что в системе водопровода отсутствуют скачки давления (что в основном соответствует действительности). Поэтому в рассматриваемом водогазовом узле в использовании системы ограничения подачи воды нет необходимости. Клапан 11 и пружину можно не использовать (рис. 1). На рис. 2 приведена расчётная схема такого водогазового узла.

Расчёт водогазового узла осуществляется в следующей последовательности:

1. В качестве исходных данных принимается внутренний диаметр седла клапана  $d_{\rm K}$  и определяется его площадь  $S_{\rm K}$ , в рассматриваемом примере диаметр седла клапана  $d_{\rm K}$  принимается равным 15 мм:

$$S_K = \pi d_{\nu}^2 / 4,$$
 (1)

$$S_K = 3.14 \cdot 15^2 / 4 = 176.63 \text{ MM}^2$$

Тогда силу  $F_{\Gamma}$  воздействия газа на клапан в закрытом состоянии можно рассчитать следующим образом:

$$F_{\Gamma} = P_{\Gamma} \cdot S_{K} \cdot 10^{-6}, \qquad (2)$$

$$F_T = 3000 \cdot 176,63 \cdot 10^{-6} = 0.53$$
 H,

где  $P_{\Gamma}$  – давление газа в газовой магистрали на входе в колонку, в среднем равное 3000 Па [13].

2. На этом этапе необходимо определить силу воздействия пружины на клапан в закрытом состоянии  $F_1$ .

С тем, чтобы на суммарную силу воздействия на клапан в меньшей степени влияло колебание давления в газовой сети, она должна быть во много раз больше силы воздействия газа на клапан. Из практики эксплуатации и проектирования водогазовых узлов можно принять кратность превышения равной двадцати [14–16]:

$$F_1 = 20 \cdot F_{\Gamma},$$
 (3)  
 $F_1 = 20 \cdot 0.53 = 10.6 \text{ H}.$ 

В результате суммарная сила  $F_{K1}$  воздействия на клапан пружины и газа будет иметь вид:

$$F_{K1} = F_T + F_1 ,$$
 
$$F_{K1} = 0.53 + 10.6 = 11.13 \text{ H}.$$

3. На этом этапе следует определить максимальный ход клапана  $\Delta L_{\rm KM}$  из условия равенства проходного сечения зазора между седлом и рабочей поверхностью клапана и площади отверстия клапана:

$$\Delta L_{\text{KM}} = S_{\text{K}}/(\pi d_{\text{K}}),$$
 (4)  
 $\Delta L_{\text{KM}} = 176,63/(3,14 \cdot 15) = 3,75 \text{ MM}.$ 

С целью обеспечения точности срабатывания автоматической системы управления по открытию газового клапана, её статическая характеристика должна быть достаточно жёсткой. Поэтому необходимо установить силу воздействия пружины  $F_2$  на клапан в полностью открытом состоянии для рассматриваемого в качестве примера водогазового узла на 5 % больше силы воздействия пружины на закрытый клапан в виде:

$$F_2 = 1,05 F_1,$$
 (5)  
 $F_2 = 1,05 \cdot 10,6 = 11,13 \text{ H}.$ 

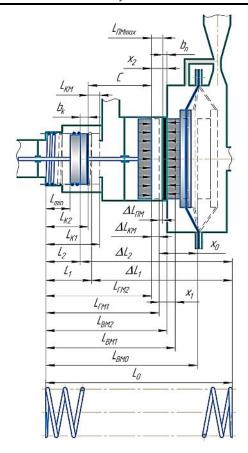


Рис. 2. Расчётная схема водогазового узла

В этом случае необходимая жёсткость пружины k может быть рассчитана в виде:

$$k = (F_2 - F_1)/\Delta L_{KM}$$
, (6)

$$k = (11,13-10,6)/3,75 = 0,14$$
 H/mm.

Ввиду малой требуемой жесткости пружины её внешний диаметр  $D_{\Pi}$  и диаметр d проволоки пружины устанавливаются из конструктивных соображений. Для рассматриваемого примера можно установить внешний диаметр пружины  $D_{\Pi}$  равным 15 мм, а диаметр проволоки d-1 мм. Если учесть, что жесткость пружины может быть определена зависимостью [17]:

$$k = Gd^4/(8D_{II}^3 n)$$
 (7)

где G — модуль сдвига, равный для стали  $78,5\cdot 10^9$  Па [4], то число рабочих витков пружины п можно определить по формуле:

$$n = Gd^{-4}/(8D_{\pi}^{3}k), \qquad (8)$$

$$n = 78500 \cdot 1^4 / (8 \cdot 15^3 \cdot 0.14) = 20.76 \approx 21.$$

4. Для определения длины пружины в полностью сжатом состоянии следует использовать зависимость вида:

$$L_{\min} = nd , \qquad (9)$$

$$L_{min} = 21 \cdot 1 = 21$$
 MM.

С целью свободного прохождения газа между витками пружины следует установить длину пружины  $L_2$  при открытом клапане на 20% больше длины в полностью сжатом состоянии:

$$L_2 = 1.2L_{min} , {10}$$

$$L_2 = 1.2 \cdot 21 = 25.2$$
 MM.

Следовательно, длина  $L_1$  пружины при закрытом клапане будет определена зависимостью:

$$L_1 = L_2 + \Delta L_{KM} , \qquad (11)$$

$$L_1 = 25.2 + 3.75 = 28.95$$
 MM.

5. Приняв толщину тарелки клапана  $b_{\rm K}$  равной максимальному ходу клапана  $\Delta L_{\rm KM}$ , можно найти координату рабочей плоскости клапана  $L_{\rm K1}$  в закрытом состоянии (координату седла клапана):

$$L_{K1} = L_1 + b_K , (12)$$

$$L_{K1} = 28.95 + 3.75 = 32.7$$
 MM.

и координату рабочей плоскости клапана  $L_{\rm K2}$  в открытом состоянии:

$$L_{K2} = L_2 + b_K, (13)$$

$$L_{K2} = 25.2 + 3.75 = 28.95$$
 MM.

6. Определить степень сжатия пружины  $\Delta L_1$  при закрытом клапане можно по зависимости:

$$\Delta L_1 = F_1/k , \qquad (14)$$

$$\Delta L_1 = 10,6/0,14 = 75,71 \text{ MM}.$$

Тогда можно определить длину пружины  $L_0$  в ненагруженном состоянии:

$$L_0 = L_1 + \Delta L_1, \tag{15}$$

$$L_0 = 28,95 + 75,71 = 104,66$$
 MM.

7. Задавшись из конструктивных соображений расстоянием между клапаном и рабочим полюсом магнита C, расположенного в газовой камере, равным 15 мм, можно определить координату рабочего полюса магнита  $L_{\Gamma M2}$  при открытом клапане:

$$L_{TM2} = L_{K2} + C , (16)$$

$$L_{\it \Gamma M \, 2} = 28,95 \, + 15 = 43,95 \, \, \, {\rm MM}.$$

Координата рабочего полюса магнита  $L_{\Gamma M1}$  при закрытом клапане определяется по зависимости:

$$L_{TM,1} = L_{TM,2} + \Delta L_{KM}, \qquad (17)$$

$$L_{TM1} = 43.95 + 3.75 = 47.7$$
 MM.

8. На этом этапе выполняется аппроксимация экспериментальных зависимостей расстояния *х* между одноимёнными полюсами дисковых

магнитов от приложенной силы P. В табл. 1 приведены соответствующие экспериментальные зависимости [18].

Таблииа 1

## Экспериментальные данные силовых характеристик магнитов

Pe, H	42,14	34,3	29,9	24,5 (P <sub>el</sub> )	19,6	14,7	9,8 $(P_{e2})$	4,9	2,45 (P <sub>e3</sub> )
Xe, MM	0,05	1	1,5	$2(x_{el})$	3	4,5	$7(x_{e2})$	11	$15,5 (x_{e3})$

В качестве аппроксимирующей зависимости можно принять степенную зависимость вида:

$$x = (a/P)c - b . (18)$$

Входящие в уравнение коэффициенты а, b и с находятся следующим образом. По любым трём выделенным в таблице экспериментальным данным точкам составляется система уравнений:

$$\begin{cases} x_{e1} = (a/P_{e1})^c - b \\ x_{e2} = (a/P_{e2})^c - b \\ x_{e3} = (a/P_{e3})^c - b \end{cases}$$
(19)

В результате решения этих уравнений с помощью системы MathCAD, для использованных в работе экспериментальных данных, получены детерминированные значения коэффициентов:  $a = 2,366 \cdot 10^{18}$ ; b = 49,64; c = 0,101.

Степень соответствия экспериментальных данных  $x_e(P_e)$  и аппроксимирующей зависимости x(P) проиллюстрирована на рис. 3.

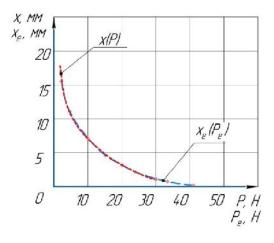


Рис. 3. Графики зависимостей  $x_e(P_e)$  и x(P)

Более существенное расхождение экспериментальных и расчетных значений наблюдается только при малых (менее 2 мм) расстояниях между полюсами магнитов. Однако это не влияет на точность последующих расчётов, так как эти

расстояния не попадают в рабочий диапазон функционирования магнитов.

9. Пользуясь полученной аппроксимационной зависимостью x(P), можно определить расстояние между полюсами магнитов в момент начала открытия клапана:

$$x_1 = (a/F_{kl})^c - b$$
, (20)

$$x_1 = (2,366 \cdot 10^{18}/11,13)^{0,101} - 49,64 = 6,61$$
 MM.

При полностью открытом клапане следует использовать зависимость вида:

$$x_2 = (a/F_2)^c - b,$$
 (21)

$$x_2 = (2,366 \cdot 10^{18}/11,13)^{0,101} - 49,64 = 6,61$$
 MM.

Координаты рабочего полюса магнита в момент открытия клапана определяются зависимостью:

$$L_{\rm BM1} = L_{\rm \Gamma M1} + x_1$$
, (22)  
 $L_{\rm BM1} = 47,7 + 6,61 = 54,31$  MM.

При полностью открытом клапане используется зависимость:

$$L_{BM2} = L_{TM2} + x_2$$
, (23)  
 $L_{BM2} = 43,95 + 6,61 = 50,56$  MM.

10. Сила воздействия на клапан магнита  $F_{\rm BM0}$ , находящегося в исходном состоянии (крайнее левое положение при закрытом вентиле на выходе змеевика), должна быть существенно меньше противодействующей силы  $F_{\rm K1}$ , удерживающей клапан в закрытом состоянии. Это необходимо, чтобы не ухудшать плотность закрытия клапана. В рассматриваемом примере расчёта принимаем её на 80% меньше:

$$F_{BM0} = F_{KI}/5$$
, (24)  
 $F_{BM0} = 11,13/5 = 2,23$  H

Тогда расстояние между полюсами магнитов  $x_0$  в исходном состоянии можно определить зависимостью:

$$x_0 = (a/F_{BMO})^c - b, \qquad (25)$$

$$x_0 = (2,366 \cdot 10^{18}/2,23)^{0,101} - 49,64 = 16,53 \text{ MM}.$$

Координата полюса магнита  $L_{\rm BM0}$ , расположенного в водяной камере, определяется зависимостью вида:

$$L_{BM,0} = L_{TM,1} + x_0, (26)$$

$$L_{BM,0} = 47,7+16,53 = 64,23$$
 MM.

11. Задавшись, из конструктивных соображений, толщиной  $b_{\Pi}$  перегородки равной 1,5 мм, можно определить координату плоскости перегородки со стороны газа  $L_{\Pi\Gamma}$  и запас хода магнита в газовой камере  $\Delta L_{\Pi M}$ :

$$L_{III} = L_{BM2} - b_{II}$$
, (27)  
 $L_{III} = 50.56 - 1.5 = 49.06 \text{ MM}.$ 

$$\Delta L_{\Pi M} = L_{\Pi \Gamma} - L_{\Gamma M I} \,, \tag{28}$$

$$\Delta L_{IIM} = 49,06 - 47,7 = 1,36$$
 MM.

12. Устанавливая перепад давления  $\Delta H$  равным 0,4 метра водяного столба, который должен быть между полостями при минимальном расходе воды через колонку  $Q_{\min} = 41,67 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{c [6]}$ , можно рассчитать сечения отверстия  $S_o$  в узкой части трубки Вентури и диаметр отверстия  $d_o$ , при коэффициенте расхода  $\mu = 0,61$ :

$$S_0 = Q_{\min} / (\mu (2g \cdot \Delta H)^{0.5}),$$
 (29)

$$S_a = 41,67 \cdot 10^{-6} / (0,61(2 \cdot 9,8 \cdot 0,4)^{0,5}) = 24,4 \cdot 10^{-6} \text{ M}^2.$$

$$d_o = (4S/\pi)^{0.5},$$
 (30)

$$d_o = (4 \cdot 24, 4 \cdot 10^{-6}/3, 14)^{0.5} = 5,57 \cdot 10^{-3} \text{ M}.$$

13. На заключительном этапе определятся площадь мембраны  $S_{\scriptscriptstyle M}$  и её диаметр  $D_{\scriptscriptstyle M}$ :

$$S_M = F_{K1}/(9800 \cdot \Delta H)$$
, (31)

$$S_M = 11,13/(98000,4) = 2,84 \cdot 10^{-3} \text{ M}^2.$$

$$D_{M} = (4S/\pi)^{0.5}, \tag{32}$$

$$D_{\rm M} = 4.28410^{3}/3.14^{0.5} = 0.06_{\rm M}$$

Выводы. Таким образом, представлена конструкция водогазового узла, в котором проблемный конструктивный элемент, отвечающий за надежность работы всего узла и реализующий в виде механической связи между мембраной и клапаном заменен связью, основанной на другом физическом принципе - магнитном поле двух дисковых магнитов. Магниты ориентированы друг по отношению к другу одноимёнными полюсами и расположены по обе стороны немагнитной перегородки, разделяющей водяную и газовую камеры водогазового узла. Это позволяет исключить утечки воды и газа, так как данный конструктивный элемент не содержит сальниковых уплотнений. А отсутствие трения при передаче усилия от мембраны к клапану подачи газа повышает точность срабатывания клапана и повышается стабильность порога ограничения подачи воды. Приведенная инженерная методика расчета основных конструктивных элементов узла позволяет реализовать предложенную конструкцию на практике.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Лилёв Н. Конкуренция на современном рынке термотехники в России // РИСК: Ресурсы, информация, снабжение, конкуренция. 2014. № 2. С. 109–113.
- 2. Поезжалов В.М., Святокум С.В., Жусупов К.С. Технология использования энергии окружающей среды для отопления и кондиционирования // Механика и технологии. 2016. № 1. С. 97—102.
- 3. Сухой ТЭН в водонагревателях DRAZICE («ДРАЖИЦЕ») // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2015. № 5. С. 56–57.
- 4. Кушнир В.Г., Поезжалов В.М. Система отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, основанная на использовании природно-климатических факторов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 3. С. 45–49.
- 5. Vaillant показал энергию будущего // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2014. № 11. С. 12–13.
- 6. Hai Quan Suna, ZhenYuan Xub, Hong Bing Wanga, Ru Zhu Wang A Solar/gas Fired Absorption System for Cooling and Heating in a Commercial Building // Energy Procedia. 2015, no. 70, pp. 518–528.
- 7. Xu Z., Wang R., Zhai X. Solar- or Gas-Driven Absorption System for Cooling and Heating in a Hotel: Handbook of Energy Systems in Green Building. Springer, Berlin, Heidelberg. 2018, pp. 1795–1809.
- 8. Czerski G. Impact assessment of selected factors on the risk of poisoning with combustion products from gas appliances // Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza. 2014. VOL. 33. No. 1. Pp. 67–74.
- 9. Goodarzi K., Goudarzi S.Y., Zendehbudi G. Investigation of the effect of using tube inserts for the intensification of heat transfer // Thermal Engineering. 2015, vol. 62, no. 1, pp. 68–75.
- 10. Глядко Л.А., Игнатьев С.А. Анализ отказов элементов аппарата проточного газового водонагревателя типа ВПГ // В сборнике: Автоматизация и управление в машино- и приборостроении. Саратов, 2015. С. 18–21.
- 11. Аппараты водонагревательные проточные газовые бытовые «NEVA—4011», «NEVA—4511». Руководство по эксплуатации 3251—00.000—01 РЭ. Армавирский завод газовой аппаратуры. [Электронный ресурс]. URL:

https://teplotehnika.spb.ru/upload/iblock/4f2/4f 29043120bfa1ae601af14762ffdb9e.pdf (дата обращения: 07.12.2018).

- 12. Пат. RU 2641999 Российская Федерация, Водогазовый узел / Петько В.Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный аграрный университет»; опубл. 23.01.2018.
- 13. СНиП 2.04.08–87\* Газоснабжение. Москва, 1995.
- 14. Кулешов М.И., Губарев А.В. Модернизация конструкции топливосберегающего газового водонагревателя, направленная на повышение его технико-экономических и экологических показателей // Промышленная энергетика. 2016. № 6. С. 24–28.
- 15. Варенов А.А., Якимов Н.Д., Ерашова Ю.Н. Инженерная модель теплового режима в индивидуальном доме // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 3–4. С. 22–28.
- 16. Goodarzi K., Goudarzi S.Y., Zendehbudi G. Investigation of the effect of using tube inserts for the intensification of heat transfer // Thermal Engineering. 2015, vol. 62, no 1, pp. 68–75.
- 17. ГОСТ Р 50753–95 Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из специальных сталей и сплавов. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов, 1995.
- 18. Петров В.М. Магниты [Электронный ресурс]. URL: http://www.petrovlam.ru/v\_stat.php?id=4&tabl=ma gnit (дата обращения: 07.12.2018).

Поступила в декабре 2018 г. © Петько В.Г., Никитина И.П., 2019

Информация об авторах

**Петько Виктор Гаврилович**, доктор технических наук, профессор кафедры электротехнологии и электрооборудования. E-mail: vgpetko@mail.ru. Оренбургский государственный аграрный университет. Россия, 460014, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18.

**Никитина Инна Петровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: innanikitina@list.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13

## <sup>1</sup>Petko V.G., <sup>2</sup>Nikitina I.P.

<sup>1</sup>Orenburg State Agrarian University. Russia, 460014, Orenburg, st. Chelyuskincev, 18 Orenburg State University Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE WATER AND GAS UNIT FUNCTIONING

Abstract. The article presents new technical solutions aimed at improving the efficiency of the water-gas unit of gas water heater. Based on the analysis of various units widely used for domestic water heating, the main disadvantage of water and gas unit is revealed. It is the mechanical connection of the membrane with the gas supply valve, which is carried out through the gland between the gas and water chambers of each unit. This design feature leads to frequent failure of gas water heater due to the fragility of the gland. It is accompanied by material losses and the risk of gas leak. The paper proposes a new design scheme of the water-gas unit, in which the mechanical connection between the membrane and the valve is replaced by a connection realized with the magnetic field of two disk magnets. The magnets are oriented with respect to each other by the same poles and are located on both sides of the non-magnetic partition, separating chambers of the water and gas unit. In the proposed water-gas unit, water and gas leaks are excluded, since it does not contain gland seals. A lack of friction in the transmission of force from the membrane to the gas supply valve increases the accuracy of the valve. The stability of the water supply limitation threshold is also increased. The method for calculating the main geometric and power parameters of water-gas unit of the developed structure is proposed. It involves the use of experimentally removed dependence of the force of magnets repulsion on the distance between their poles.

**Keywords:** friction and wear, gas water heater, membrane, valve, magnet, Venturi nozzle.

#### REFERENCES

1. Lilyov N. Competition in the current market of thermal technology in Russia. RISK: Resources,

information, supply, competition, 2014, no. 2, pp. 109–113.

2. Poezzhalov V.M., Svyatokum S.V., Zhusupov K.S. Technology uses the energy of the

environment for heating and air conditioning. Mechanics and technology, 2016, no. 1, pp. 97–102.

- 3. Dry heater in water heaters DRAZICE ("DRAZICE"). Plumbing, heating, air conditioning, 2015, no. 5, pp. 56–57.
- 4. Kushnir V.G., Poezzhalov V.M. System of heating, ventilation and air conditioning based on the use of climatic factors. Electrotechnical and information systems and systems, 2014, vol. 10, no. 3, pp. 45–49
- 5. Vaillant showed the energy of the future. Plumbing, heating, air conditioning, 2014, no. 11, pp. 12–13.
- 6. Hai Quan Suna, ZhenYuan Xub, Hong Bing Wanga, Ru Zhu Wang A Solar/gas Fired Absorption System for Cooling and Heating in a Commercial Building. Energy Procedia, 2015, no. 70, pp. 518–528.
- 7. Xu Z., Wang R., Zhai X. Solar-or Gas-Driven Absorption System for Cooling and Heating in a Hotel: Handbook of Energy Systems in Green Building. Springer, Berlin, Heidelberg, 2018, pp. 1795–1809.
- 8. Czerski G. Impact assessment of selected factors on the risk of poisoning with combustion products from gas appliances. Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza, 2014, vol. 33, no. 1, pp. 67–74.
- 9. Goodarzi K., Goudarzi S.Y., Zendehbudi G. Investigation of the effect of using tube inserts for the intensification of heat transfer. Thermal Engineering, 2015, vol. 62, no. 1, pp. 68–75.
- 10. Gliadko L.A., Ignatev S.A. Analysis of failures of elements of the apparatus of a flow-type gas

- water heater of the HSV type. In the collection: Automation and control in machine building and instrument making, Saratov, 2015, pp. 18–21.
- 11. Devices water heating flowing gas household «NEVA–4011», «NEVA–4511». Manual 3251–00.000–01 RE. Armavir gas equipment plant. Available at: http://teplotehnika.spb.ru/upload/iblock/4f2/4f29043120bfa1ae601af14762ffdb9 e.pdf (accessed:07.12.2018).
- 12. Petko V.G. Pat. RU RF, Water gas knot. Patent RF, no. 2641999, 2018.
- 13. SNiP 2.04.08–87\* Gas supply. Moscow, 1995.
- 14. Kuleshov M.I., Gubarev A.V. Modernization of the design of a fuel-saving gas water heater aimed at improving its technical, economic and environmental indicators. Industrial Energy, 2016, no. 6, pp. 24–28.
- 15. Varenov A.A., Iakimov N.D., Erashova IU.N. Engineering model of the thermal regime in an individual house. Proceedings of higher educational institutions. Energy issues, 2016, no. 3–4, pp. 22–28.
- 16. Goodarzi K., Goudarzi S.Y., Zendehbudi G. Investigation of the effect of using tube inserts for the intensification of heat transfer. Thermal Engineering, 2015, vol. 62, no. 1, pp. 68–75.
- 17. GOST R 50753–95 Coil springs cylindrical compression and tension of special steels and alloys. General technical conditions. Moscow: Publishing house of standards. 1995.
- 18. Petrov V.M. Magnets. Available at: http://www.pe-troylam.ru/y\_stat.php?id=4&tabl=magnit\_(accessed:

trovlam.ru/v\_stat.php?id=4&tabl=magnit (accessed: 07.12.2018).

Information about the authors

**Petko, Viktor G.** PhD, Professor. E-mail: vgpetko@mail.ru. Orenburg State Agrarian University. Russia, 460014, Orenburg, st. Chelyuskincev, 18.

**Nikitina, Inna P.** PhD, Assistant professor. E-mail: innanikitina@list.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Received in December 2018

# Для цитирования:

Петько В.Г., Никитина И.П. Повышение эффективности работы водогазового узла // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №3. С. 154–161. DOI: 10.34031/article 5ca1f636d3f584.58960670

## For citation:

Petko V.G., Nikitina I.P. Improving the efficiency of the water and gas unit functioning. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 2, pp. 154–161. DOI: 10.34031/article 5ca1f636d3f584.58960670

## Научное издание

# «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова» № 3, 2019 г.

Научно-теоретический журнал

**Координатор журнала** Алфимова Наталия Ивановна

**Редактор журнала** Агеева Марина Сергеевна

**Компьютерная верстка** *Яшкина Светлана Юрьевна* 

**Перевод на английский язык** Колесник Оксана Юрьевна

Учредитель журнала — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова)

Журнал зарегистрирован Министерством РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовой информации ПИ №ФС77-26533

Сдано в набор 9.02.19. Подписано в печать 22.03.19. Формат 60×84/8 Усл. печ. л. 18,83. Уч.-изд. л. 20,25 Тираж 500 экз. Заказ 388. Цена договорная. Все публикуемые материалы представлены в авторской редакции.

Адрес редакции: г. Белгород, ул. Костюкова, 46, оф. 724/4 Гк. Номер сверстан в редакции научно-теоретического журнала «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова». Отпечатано в РИЦ БГТУ им. В.Г. Шухова