

БГТУ им. В.Г. Шухова ISSN 2071-7318



#### 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

№ 2, 2021 год

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

Vol. 2. 2021

## 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: https://bulletinbstu.editorum.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 herit-
		age (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: https://bulletinbstu.editorum.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/

© Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2021

#### Главный редактор

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

#### Заместитель главного редактора

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

#### Члены редакционной коллегии

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

**Благоевич** Деян, PhD, проф. Высшей технической школы по профессиональному образованию в Нише (Республика Сербия, г. Ниш). **Богданов Василий Степанович**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой механического оборудования Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Павлович Ненад, PhD, проректор по научной работе и издательской деятельности, проф. Машиностроительного факультета Государственного Нишского университета (Республика Сербия, г. Ниш). Перькова Маргарита Викторовна, д-р арх., проф., заведующий кафедрой архитектуры и градостроительства Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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

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

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

**Савин Леонид Алексеевич**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой мехатроники, механики и робототехники Орловского государственного 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., Ваймар (Германия, г. Веймар).

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

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

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

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

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

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

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

**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).

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

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

**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, Simferonol)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Margarita V. Per'kova, Doctor of Architecture, Professor, 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" KERAMBET-OGNEUPOR" (Russian Federation, Saint Petersburg).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА	
Глаголев Е.С.	
3D-АДДИТИВНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА	8
Смоляго Г.А., Обернихина Я.Л.	
ОБЗОР ЭФФЕКТИВНОСТИ УСИЛЕНИЯ ПОЛИМЕРКОМПОЗИТНЫМИ	
МАТЕРИАЛАМИ. ОГНЕСТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ	15
Чуйкина А.А., Лобода А.В., Сотникова О.А.	
ПРОЕКТИРОВАНИЕ «ОПТИМАЛЬНОЙ» ТРУБОПРОВОДНОЙ ТРАССЫ	
ТЕПЛОВОЙ СЕТИ	28
Шашин А.В., Шепс Р.А., Семиненко А.С., Минко В.А.	
МЕСТНАЯ ВЫТЯЖНАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ С ЭЖЕКТИРОВАНИЕМ	
ВЗРЫВООПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ И РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ОЧИЩЕННОГО ВОЗДУХА	38
Швецова-Шиловская Е.А., Ильвицкая С.В.	
ПРИНЦИПЫ РЕКОНСТРУКЦИИ И РАЗВИТИЯ ПРАВОСЛАВНЫХ МОНАСТЫРЕЙ	
РУССКОГО СЕВЕРА	49
Иголкин Н.В.	
АРХИТЕКТУРА МУРМАНСКА 1930-х – 1950-х гг.	60
ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ	
Никулина Н.С., Дмитренков А.И., Никулин С.С., Власова Л.А., Санникова Н.Ю.	
ПЕРСПЕКТИВА ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ДРЕВЕСНЫХ	
МАТЕРИАЛОВ А-ВИНИЛНАФТАЛИНА	73
Ягрушкина И.Н., Дюльдина М.В., Ногачев А.Г., Якунин К.П.	
РАЗРАБОТКА СОСТАВА УДАРОПРОЧНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ	
АБС/ПК ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	80
Трубицын М.А., Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В.	
ВЛИЯНИЕ СОСТАВА КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КАЛЬЦИЙ-	
ФОСФАТНОГО НАНОКОМПОЗИТА НА ФОРМИРОВАНИЕ	
ЭЛЕКТРОПОВЕРХНОСТНЫХ И КИСЛОТНО-ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ	89
МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИ	E
Серегин А.А., Никитина И.П., Крылова С.Е.	
ПОВЫШЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ САМОЦЕНТРИРУЮЩИХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ	
ТОКАРНЫХ СТАНКОВ	100

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE	
Glagolev E.S.	
3D-ADDITIVE BUILDING TECHNOLOGIES. THEORY AND PRACTICE	8
Smolyago G.A., Obernikhina Y.L.	
REVIEW OF THE EFFICIENCY OF REINFORCEMENT BY FIBER REINFORCED	
POLYMER MATERIALS. FIRE RESISTANCE OF STRUCTURES	15
Chuykina A.A., Loboda A.V., Sotnikova O.A.	
DESIGN OF THE OPTIMAL PIPELINE ROUTE OF THE HEAT NETWORK	28
Shashin A.V., Sheps R.A., Seminenko A.S., Minko V.A.	
LOCAL EXHAUST VENTILATION WITH EJECTION OF EXPLOSIVE	
SUBSTANCES AND RECIRCULATION OF PURIFIED AIR	38
Shvetsova-Shilovskaya E.A., Ilvitskaya S.V.	
PRINCIPLES OF RECONSTRUCTION AND DEVELOPMENT	
OF ORTHODOX MONASTERIES IN RUSSIAN NORTH	49
Igolkin N.V.	
ARCHITECTURE OF MURMANSK IN THE 1930s – 1950s	60
CHEMICAL TECHNOLOGY	
Nikulina N.S., Dmitrenkov A.I., Nikulin S.S., Vlasova L.A., Sannikova N.Yu.	
THE PROSPECT OF USING A-VINYLNAPHTHALENE FOR MODIFICATION	
OF WOOD MATERIALS	73
Yagrushkina I.N., Dyuldina M.V., Nogachev A.G., Yakunin K.P.	
DEVELOPMENT OF IMPACT RESISTANT POLYMER COMPOSITION ABS/PC	
FOR AUTOMOTIVE INDUSTRY	80
Troubitsin M.A., Hoang Viet Hung, Furda L.V.	
INFLUENCE OF THE CRYSTAL-CHEMICAL STRUCTURE	
IN CALCIUM-PHOSPHATE NANOCOMPOSITE ON THE FORMATION	
OF ELECTROSURFACE	89
NAA CHINE DIII DINC AND	
MACHINE BUILDING AND	
ENGINEERING SCIENCE	
Seregin A.A., Nikitina I.P., Krylova S.E.	
beregin hining function and spirit yields	

### СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-8-14

#### Глаголев Е.С.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова E-mail: sk31.es@gmail.com

#### 3D-АДДИТИВНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

Аннотация. Представлены результаты исследования теоретических основ изготовления строительных материалов с помощью 3D-печати на основе композиционных вяжущих с применением различных способов формования, их практическая апробация на опытных образцах мелкозернистого бетона. Рассмотрены принципы регулирования структуры и свойств композитов за счёт применения минерального модификатора для возведения высотных строительных объектов по 3D-аддитивной технологии. Показано влияние характеристик компонентов сырья на свойства полученного композита. Структурообразование твердеющей цементосодержащей системы в присутствии минерального модификатора протекает более интенсивно за счёт высокой удельной поверхности и энергетической способности компонентов, представляющей собой активную минеральную добавку и основу для кристаллообразования новых гидратных соединений. Различие в прочностных показателях напечатанной стенки обусловлено направлением вырезки образца. Приложение разрушающей нагрузки вдоль направления формования 3D-принтера даёт несколько большую прочность, чем перпендикулярно направлению формования. Это явление можно объяснить формой слоя после затвердевания смеси, которая представляет собой эллипс в сечении.

**Ключевые слова:** 3D-аддитивные технологии, композиционные вяжущие, мелкозернистые бетоны, съемная и несъемная опалубка.

Введение. В настоящее время задача повышения эффективности бетонов, в том числе и мелкозернистых, так же, как и совершенствования технологий строительства, приобретает важное народнохозяйственное значение. Актуальность решения данной задачи заключается в повышении спроса на указанный вид строительной продукции, вследствие ускоренного развития строительства и реконструкции промышленных предприятий, связанное с курсом государства на развитие промышленного потенциала страны. Кроме того, большой объем монолитного мелкозернистого бетона используется в современном жилищном строительстве и при строительстве зданий общественного назначения, что требует применения эффективной технологии строительного производства, такой как 3D-печать. Повышение тонкости помола компонентов смеси, введение модификаторов и современных 3D-аддитивных технологий приводит к повышению производительности труда и качества получаемого продукта [1-4].

Одним из достоинств 3D-аддитивных технологий является быстрота строительства. С помощью 3D-печати можно построить здание площадью 250 м² за 18–20 часов. А с применением высокопрочных бетонов облегчается вся конструкция сооружения вследствие уменьшения толщины несущих элементов. Так, например, толщина стены при классе бетона В 60 может составлять 8 см, также как и перекрытия. Эта технология способствует экономии материальных и

энергетических ресурсов, снижает расход материалов. К тому же, по опыту китайских строителей, стала очевидной возможность использования в данной технологии вторсырья — измельчённых строительных отходов.

Повышению строительно-технических свойств композита, применяемого для сооружения объектов по 3D-аддитивной технологии, способствует использование высокопрочного мелкозернистого бетона на композиционном вяжущем, модифицированном минеральным модификатором. Минеральный модификатор получают раздельным помолом портландцементного клинкера и минеральных компонентов (5–7). Для повышения формуемости изделия в смесь вводят водоредуцирующую добавку (суперпластификатор), что дает возможность получить материал с уникальными свойствами, отличающими его от обычного бетона [5, 6].

Выявление взаимосвязи теоретических принципов создания оптимальной структуры композитов для 3D-аддитивных технологий с технологическими приемами современного материаловедения, разработка составов и технологии строительства объектов с использованием природных и техногенных сырьевых ресурсов является важной научно-практической задачей.

Применение мелкозернистых модифицированных бетонов повышенной прочности позволит получить технико-экономический эффект практически во всех областях строительства. Сокращение расхода вяжущего, которое составляет

до 25 %, является одним из основных направлений в решении задачи снижения затрат на производство эффективных мелкозернистых бетонов на композиционных вяжущих, при получении которых расход топлива и клинкера сокращается на 25–30 % по сравнению с чисто клинкерными цементами.

Главным средством достижения поставленной цели является применение модифицирующих добавок и создание композиционного вяжущего. Наиболее революционными добавками считаются минеральные наполнители — микрокремнезем и высокодисперсные минеральные добавки, не содержащие органики. Данные добавки улучшают структуру цементного камня, что способствует повышению ранней прочности [7, 8].

Для повышения эффективности бетона нового поколения возможно также применение способа активации вяжущего. Активация может производиться в специальных устройствах, непосредственно в бетоносмесителях или с применением СВЧ-энергии.

Главной проблемой, которая сдерживает широкое применение 3D-аддитивных технологий в стройиндустрии, является отсутствие теоретической базы создания композитов нового поколения на эффективных композиционных вяжущих и оптимизация составов с новыми видами энергосберегающего сырья.

В последние годы во всем мире возрастает необходимость разработки композиций для новых систем строительства, в частности 3D-аддитивных технологий, которые позволят вести более длительную эксплуатацию и вносить меньшие затраты. В настоящее время использование мелкозернистых бетонов в строительстве значительно расширяется. В то же время многие сооружения меняют свое функциональное значение. Разработка эффективных мелкозернистых порошковых бетонов на основе композиционных вяжущих для 3D-аддитивных технологий – одно из актуальных направлений современного материаловедения.

Материалы и методы. В специфических строительства зданий аддитивным технологиям с учетом назначения возникают специальные требования к вяжущему Для структурообразованию. его необходимо применение специальных модификаторов, содержащих в своём составе и минеральную, и органическую составляющую, которые обеспечивают высокую эффективность вяжущего. Для получения композиционных вяжущих были выполнен ряд поисковых исследований с целью изучения соотношений основы дольных портландцемента, минерального

модификатора, который обеспечил ускорение сроков схватывания шементного Применяли портландцемент ЦЕМ І 42,5Н производства 3AO «Белгородский цемент» заводской тонкости помола - 300  $M^2/K\Gamma$ высокоактивный модификатор гиперпластификатор «Melflux 5581».

В результате было определено эффективное содержание составляющих минерального модификатора (ММ) в композиционном вяжущем (КВ), их влияние на его твердение и свойства мелкозернистого бетона.

Строительство объектов с помощью 3D-аддитивных технологий может осуществляется как с применением опалубки, так и безопалубочным способом, методом прямого экструдирования бетонной смеси необходимой толщины, послойно.

Несмотря на большую индустриальность и перспективность безопалубочной технологии 3*D*-печати, возведение высотных объектов осложняется некоторыми трудностями:

- 1) обязательное армирование бетонных конструкций;
- 2) сооружение перекрытий многоэтажных каркасных зданий;
- 3) качество поверхности стен и других конструкций, контроль за производством работ.

Поэтому применение 3D-аддитивных технологий в строительстве многоэтажных зданий может быть реализовано с устройством различных видов опалубки (рис. 1).

Вид опалубки зависит от характера бетонируемого объекта, технологии строительного производства, соотношения геометрических размеров, климатическими условиями в регионе строительства.

Требования к опалубке следующие:

- прочность;
- сохранение размеров во времени;
- удобство при установке арматуры и укладке бетонной смеси.

Материал должен удовлетворять, кроме стандартных, специальным требованиям, среди которых следующие особенности формовочных смесей и композитов, применяемых для высотного строительства: реотехнологический индекс – РТИ (экструдируемость) и показатель несущей способности свежеотформованного слоя – П (пластическая прочность).

Основная часть. 3D-печать высотного строительного объекта осуществляется с применением опалубки. В качестве заполнителя для многокомпонентных композитов рекомендуется использовать отсев дробления кварцитопесчаника КМА фракции 0,315–1,25 мм. Если предъявляются повышенные требования к поверхности стен, то применение 3D-аддитивных технологий при строительстве многоэтажных зданий может быть реализовано с устройством опалубки (рис. 1).



Рис. 1. Возведение зданий с применением опалубки по 3D-аддитивной технологии

Чаще всего, учитывая перечисленные факторы, при 3D-аддитивных технологиях, опалубку проектируют как несъемную. Основное преимущество несъемной опалубки — значительное сокращение затрат (~ в 2 раза) по сравнению со съемной, за счет исключения операции распалубливания и уменьшения объема бетонной смеси, а также вследствие вхождения опалубки в состав стены.

ГОСТ Р 52085-2003 «Опалубка. Общие технические условия» классифицирует несъемную опалубку на три вида:

включаемая в расчетное сечение конструкции;

- не включаемая в расчетное сечение конструкции;
  - специальная.

По СНиП СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Общие положения» несъемную опалубку следует всегда учитывать, как составную часть стены.

Величина значения пластической прочности у смеси разработанного состава через 15 минут испытаний составляет 762,2 КПа, что значительно превосходит этот показатель для обычного бетона (133,0 КПа), также, как и РТИ, и прочность при сжатии (рисунок 2).

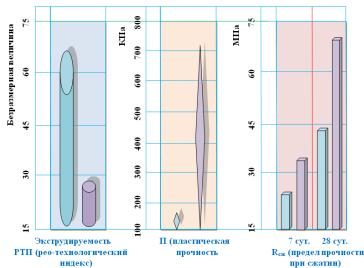


Рис. 2. Сравнение реологических характеристик смеси и бетона для 3D-аддитивных технологий Вид бетона: 

— обычный мелкозернистый бетон; 
— модифицированный мелкозернистый бетон

Результаты показали полную пригодность смеси к процессу формования по 3D-аддитивной технологии.

Поэтому, в 3D-аддитивной технологии используется несъемная опалубка, включаемая в

расчетное сечение стены, а всё сооружение является сборно-монолитным. При расчете опалубки на стадии возведения объекта важным является определение давления бетона на вертикальные или наклонные плоскости. В начальной стадии работ давление свежеуложенной бетонной смеси является гидростатическим, и зависит от высоты столба залитой в опалубку смеси, точнее от ее объема. В процессе твердение и набора прочности давление не увеличивается. Поэтому подбор опалубки и расчет давления на нее со стороны бетона, особенно для высотных зданий и сооружений, ведется с учетом только скорости бетонирования. Давление, оказываемое бетонной смесью на опалубку, зависит от нескольких факторов. Во-первых, оно может снижаться в результате зависания бетонной смеси из-за зацепления за поверхность опалубки и образования сводов, которые препятствуют передаче давления вышележащих слоев смеси на нижележащие. Во-вторых, вследствие внутреннего трения смеси, увеличивающегося по мере схватывания бетона. Поэтому поверхность стенок опалубки стараются сделать наиболее гладкой, чтобы уменьшить торможение продвижению бетонной смеси из-за трения ее о стенки опалубки. В-третьих, давление зависит от степени армирования конструкции. Давление выше в малоармированных конструкциях.

Разработанный оптимальный состав для 3D-аддитивной технологии на портландцементе, подвергнутом домолу до удельной поверхности 500 м²/кг (состав № 7, таблица 1), имеет прочностные показатели примерно на 40-42 % превышающие таковые для контрольных образцов. Это стало возможным, благодаря введению в состав твердеющей смеси минерального модификатора при следующем соотношении компонентов: смешанослойных глинистых образований, песка и мела, равном 2:2:1 (таблица 1).

Tаблица 1 Зависимость свойств композиционного вяжущего для 3D-печати от состава

№	Состав	Содержание компонентов, кг/м <sup>3</sup>					В/Ц	ρ <sub>cp</sub> ,	R <sub>сж</sub> ., МПа, в возр., сут.		Rиз., МПа, в возр., сут.	
п/п	Cociab		ВКП	ГП	MM	Вода	⊅/ц	кг/м <sup>3</sup>	тысыр. 7	28	тысыр. 7	28
1.	$\Pi \coprod (300)^1 + BK\Pi^2$			_	_	189	0,42	1950	14,5	43,2	1,6	4,7
2.	$\Pi \coprod (300) + BK\Pi + \Gamma \Pi^3$			1,35	_	171	0,38	1946	16,3	48,8	1,8	5,3
3.	$\Pi$ Ц(300) + ВКП + ММ <sup>4</sup>	450	1500	-	13,5	180	0,40	1951	16,2	48,4	1,7	5,2
4.	ПЦ(300) + ВКП + ММ + ГП			1,35	13,5	162	0,36	1949	18,1	60,1	2,2	6,0
5.	$\Pi \coprod (500)^5 + ВКП$			_	_	198	0,44	1951	18,7	55,9	2,1	6,1
6.	$\Pi$ Ц(500) + ВКП + ГП			1,35	_	189	0,42	1950	21,1	63,1	2,4	6,8
7.	$\Pi$ Ц(500) + ВКП + ММ	450	1500	-	13,5	193	0,43	1952	20,9	62,2	2,3	6,7
8.	ПЦ(500) + ВКП + ММ + ГП			1,35	13,5	189	0,42	1951	23,4	69,9	2,6	7,4

 $^{1}$ ПЦ(300) — портландцемент заводской тонкости помола (300 м²/кг);  $^{2}$ ВКП — Вольский кварцевый песок;  $^{3}$ ГП — гиперпластификатор Melflux 5581;  $^{4}$ ММ — минеральный модификатор;  $^{5}$ ПЦ(500) — портландцемент, подвергнутый домолу до удельной поверхности 500 м²/кг

Добавка гиперпластификатора «Melflux 5581» позволяет регулировать консистенцию формовочной смеси и структуру композита, его плотность и прочность, возможность снижения расхода вяжущего.

Укладку бетонной смеси необходимо производить в формы без дефектов с ровными поверхностями и гранями. Формование производится без перерывов, уплотнение заканчивается до начала схватывания.

#### Выводы

1. Таким образом, установлено, что на основе разработанных составов мелкозернистых высокопрочных бетонов возможно строительство многоэтажных зданий с помощью 3D-печати (рис. 3). Промышленное строительство высотных зданий с помощью 3D-принтера на разработанных составах и принципах быстрой прямой печати обеспечит повышенную долговечность

строения и позволит изготавливать тонкостенные объекты различной формы. Использование формовочных смесей высокопрочного мелкозернистого бетона повышенной жесткости и реологическими характеристиками (предельное напряжение сдвига, вязкость и период релаксации) требует дополнительного механического воздействия 3D-печати, которое может осуществляться с помощью вибрации, что обеспечивает эффективную ее укладку и получение устойчивой структуры стеновой конструкции. Для повышения производительности используется широкая печатающая головка, наносящая слой с двух проходов.

2. Благодаря оптимальным реологическим характеристиками: предельному напряжению сдвига, вязкости и периоду релаксации, показателю несущей способности свежеотформован-

ного слоя (пластической прочности, формоустойчивости), бетонная смесь высокопрочного мелкозернистого бетона обеспечивает эффективную ее укладку в процессе 3D-печати и получение устойчивой структуры строительной конструкции. Для этого обоснованы механизм и основные стадии процессов твердения формовочных смесей «композиционное вяжущее - минеральный модификатор - органическая добавка мелкий заполнитель - вода» при строительстве высотных зданий и сооружений методом 3D-аддитивных технологий. Необходимые реологические характеристики, ускорение гидратации и набор прочности обусловлены использованием природного и техногенного сырья определенного генезиса, формированием полиминеральных и мелкозернистых новообразований гидросиликатов кальция различной основности, как динамически стабильной системы с интенсивным взаимодействием компонентов.



Рис. 3. Промышленный 3D-принтер для высотного строительства

3. Композиционное вяжущее, модифицированное новой минеральной добавкой, с компонентами с дефектной структурой, характеризуется повышенной скоростью твердения, обеспечивает высокоплотную структуру композита и способствует уменьшению деформационных характеристик материала. Различие в прочностных показателях напечатанной стенки обусловлено направлением вырезки образца. Приложение разрушающей нагрузки вдоль направления формования 3D-принтера даёт несколько большую прочность, чем перпендикулярно направлению формования. Это явление можно объяснить формой слоя после затвердевания смеси, которая представляет собой эллипс в сечении. Нагрузка, приложенная к меньшей оси эллипса, будет больше, чем к большей оси.

4. Высокопрочный мелкозернистый бетон, полученный по 3D-аддитивной технологии, проявляет снижение прочности по сравнению с образцами, сформованными в стандартных формах (до 15 %). При этом прочность, остается достаточной для 3D-печати высотных конструкций зданий и сооружений. Микроструктура образцов бетона на композиционном вяжущем с минеральным модификатором отличается высокой степенью сцепления цементного камня с заполнителем. В процессе гидратации композиционного вяжущего с гиперпластификатором и ММ распределение новообразований по всему объёму носит равномерный характер. Полученный мелкозернистый бетон характеризуется коротким периодом схватывания и сокращённым промежутком времени между началом и концом схватывания (около 2 час.). Оптимальные свойства разработанного мелкозернистого бетона на основе модифицированного композиционного вяжущего дают возможность строить высотные объекты с помощью современных 3D-принтеров, оборудованных системой вибрационного воздействия, что обеспечит эффективную ее укладку и получение устойчивой структуры строительного объекта.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С., Зыкова В.В., Карпеня А.Н, Ким А.А, Финашенков Е.А. 3D-печать в строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. N 1(52). С. 27–46.
- 2. Perrot A., Rangeard D., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. Materials and Structures. 2016. T. 49. No. 4. Pp. 1213–1220.
- 3. Лесовик В.С., Шахова Л.Д., Кучеров Д.Э. Классификация активных минеральных добавок для композиционных вяжущих с учетом их генезиса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 10–14.
- 4. Толстой А.Д., Лесовик В.С., Милькина А.С. Особенности структуры бетонов нового поколения с применением техногенных материалов // Вестник СбАДИ. Разд. III. Строительство и архитектура. 2018. Т. 15. № 4 (62). С. 588–595.
- 5. Lesovik V.S., Pukharenko Y.V., Tolstoy A.D., Glagolev E.S., Fedyuk R.S., Ahmed Anees Al-Ani (Iraq). Powder fiber-reinforced concrete based on composite binder 20. Internationale Baustofftagung. 2 Concretes and Durability of concrete. 2018. Pp. 12–18.
- 6. Tolstoy A.D, Lesovik V.S., Glagolev E.S., Krymova A.I. Synergetics of hardening construction systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 327.

- 7. Глаголев Е.С. Композиты для 3D-аддитивного малоэтажного строительства // Наукоемкие технологии и инновации Сборник трудов науч.-практ. конф. 2019. С. 95–99.
- 8. Lesovik V.S., Tolstoy A.D., Glagolev E.S., Novikov K.Y., Strokova V.V. Powdered concretes on composition binders with application of technogene raw materials International Journal of Pharmacy & Technology. 2016. Vol. 8. Pp. 24726–24732.
- 9. On productivity of laser additive manufacturing Journal of Materials Processing Technology. 2018. T. 261. Pp. 213–232.
- 10. Nasir H., Ahmed H., Hass C, Goodruni P.M. An analysis of construction productivity differences between Canada and the United States Construction Management Economic. 2014. Vol. 32. Pp. 595–607.
- 11. Klotz M., Horman M., A. Bodenschatz A lean modelling protocol for evaluating green project delivery. Lean Construction. 2007. Vol. 3(1). Pp. 1–18.
- 12. Дьяченко В.А., Челпанов И.Б., Никифоров С.О., Хозонхонова Д.Д. Материалы и про-

- цессы аддитивных технологий (быстрое прототипирование). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН. 2015. 198 с.
- 13. Hack N., Lauer W.V., Gramazio F, Kohler M. Mesh Mould: Differentiation for Enhanced Performance. Rethinking Comprehensive Design: Speculative Counterculture, Proceedings of the 19th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia. 2014. Kyoto. Pp. 139–148.
- 14. Collins T.M. Proportioning high-strength concrete to control creep and shrinkage. ACI Materials Journal. 1989. Vol. 86. No. 6. Pp. 576–580.
- 15. Хархардин А.Н. Топологическое состояние и свойства композиционных материалов // Известия ВУЗов. Строительство. Новосибирск. 1997. № 4. С.72-77.
- 16. Хархардин А.Н. Способ получения высокоплотных составов зернистого сырья // Известия ВУЗов. Строительство. Новосибирск. 1996. N 10. С. 56-60.
- 17. Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций. / НИИЖБ, ЛенЗНИИЭП, ЦНИИПромзданий. 1987. 148 с.

Информация об авторах

**Глаголев Евгений Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: sk31.es@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 25.01.2021 г. © Глаголев Е.С., 2021

#### Glagolev E.S.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov E-mail: sk31.es@gmail.com

#### 3D-ADDITIVE BUILDING TECHNOLOGIES. THEORY AND PRACTICE

Abstract. The results of the study of the theoretical foundations of the manufacture of building materials using 3D printing based on composite binders with various molding methods and their practical testing on prototypes of fine-grained concrete are presented. The principles of regulating the structure and properties of composites through the use of a mineral modifier for the construction of high-rise building objects using 3D-additive technology are considered. The influence of the characteristics of the raw material components on the properties of the obtained composite is shown. The structure formation of the hardening cement-containing system in the presence of a mineral modifier proceeds more intensively due to the high specific surface area and energy capacity of the components, which is an active mineral additive and the basis for the crystal formation of new hydrate compounds. The difference in the strength characteristics of the printed wall is due to the direction of the sample cut. Applying a breaking load along the direction of forming of a 3D printer gives a slightly higher strength than perpendicular to the direction of forming. This phenomenon can be explained by the shape of the layer after solidification of the mixture, which is an ellipse in cross section.

**Keywords:** 3D additive technologies, composite binders, fine-grained concrete, removable and non-removable formwork.

#### **REFERENCES**

1. Batting N.I., Chumadova L.I., Goncharov I.S. Zykova V.V. Karpenya A.N. Kim A.A.,

Finashenkov E.A. 3D printing in construction [3D-pechat v stroitelstve]. Construction of unique buildings and structures. 2017. No. 1(52). Pp. 27–46 (rus).

- 2. Perrot A., Rangeard D., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. Materials and Structures. 2016. Vol. 49. No. 4. Pp. 1213–1220.
- 3. Lesovik V.S., Shakhova L.D., Kucherov D.E. Classification of active mineral additives for composite binders taking into account their genesis [Klassifikazia aktivnih mineralnih dobavok dlia kompozionnih vyazusih s uchotom ih genezisa]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2012. No. 3. Pp. 10–14 (rus).
- 4. Tolstoy A.D., Lesovik V.S., Milkina A.S. Features of the structure of new generation concrete with the use of technogenic materials [Osobtnnosti strukturi betonov novogo pokoleniya s primeneniem tehogennih materialov]. Bulletin of SbADI. Sec. III. Construction and architecture. 2018. Vol. 15. No. 4(62). Pp. 588–595 (rus).
- 5. Lesovik V.S., Pukharenko Y.V., Tolstoy A.D., Glagolev E.S., Fedyuk R.S., Ahmed Anees Al-Ani (Iraq). Powder fiber-reinforced concrete based on composite binder // 20. Internationale Baustofftagung. 2 Concretes and Durability of concrete. 2018. Pp. 12-18.
- 6. Tolstoy A.D, Lesovik V.S., Glagolev E.S., Krymova A.I. Synergetics of hardening construction systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 327.
- 7. Glagolev E.S. Composites for 3-D additive low-rise construction [Kompoziti dlia 3D-additivnogo maloetagnogo stroitelstva]. "Science-intensive technologies and innovations" Collection works of scientific and practical conference. 2019. Pp. 95–99 (rus).
- 8. Lesovik V.S., Tolstoy A.D., Glagolev E.S., Novikov K.Y., Strokova V.V. Powdered concretes on composition binders with application of technogene raw materials. International Journal of Pharmacy & Technology. 2016. Vol. 8. No. 4. Pp. 24726–24732.

- 9. On productivity of laser additive manufacturing Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 261. Pp. 213–232.
- 10. Nasir H., Ahmed H., Hass C, Goodruni P.M. An analysis of construction productivity differences between Canada and the United States Construction Management Economic. 2014. Vol. 32. Pp. 595–607
- 11. Klotz M., Horman M., A. Bodenschatz A lean modelling protocol for evaluating green project delivery. Lean Construction. 2007. Vol. 3(1). Pp. 1–18
- 12. Dyachenko V.A., Chelpanov I.B., Nikiforov S.O., Khozonkhonova D.D. Materials and processes of additive technologies (rapid prototyping) [Materiali i prozessi additivnih tehnologii (distroe prototipirovanie). Ulan-Ude: Publishing house of the BNTs SB RAS. 2015. 198 p. (rus).
- 13. Hack N., Lauer W.V., Gramazio F, Kohler M. Mesh Mould: Differentiation for Enhanced Performance. Rethinking Comprehensive Design: Speculative Counterculture, Proceedings of the 19th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia. 2014. Kyoto. Pp. 139–148.
- 14. Collins T.M. Proportioning high-strength concrete to control creep and shrinkage. ACI Materials Journal. 1989. Vol. 86. No. 6. Pp. 576–580.
- 15. Kharkhardin A.N. Topological state and properties of composite materials [Topologichtskoe sostoianie I svoistva kompozizionnih materialov]. Izv. Universities. Construction. Novosibirsk. 1997. No. 4. Pp.72–77.
- 16. Kharkhardin A.N. Method of obtaining high-density compositions of granular raw materials [Sposob polucheniia visokoplotnih sostavov zernistogo siria]. Izv. Universities. Construction. Novosibirsk. 1996. No. 10. Pp. 56–60.
- 17. Recommendations for the design and manufacture of steel fiber concrete structures. NIIZHB. LenZNIIEP. TsNIIPromzdaniy. 1987. 148 p.

Information about the authors

**Glagolev, Evgeniy S.** PhD, Associate Professor. E-mail: sk31.es@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukov, 46.

Received 25.01.2021

#### Для цитирования:

Глаголев Е.С. 3D-аддитивные строительные технологии. Теория и практика // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 8–14. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-8-14

#### For citation:

Glagolev E.S. 3D-Additive building technologies. Theory and practice. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 2. Pp. 8–14. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-8-14

#### DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-15-27 Смоляго Г.А., \*Обернихина Я.Л.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова \*E-mail: yana.ishuk@yandex.ru

## ОБЗОР ЭФФЕКТИВНОСТИ УСИЛЕНИЯ ПОЛИМЕРКОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ. ОГНЕСТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. Полимеркомпозитные материалы (FRP) быстро завоевывают популярность в различных областях гражданского строительства. На протяжении десятилетий данные материалы применялись для усиления конструкций, не подверженных воздействию огня, таких как мосты. Для применения данного способа усиления для увеличения несущей способности конструкций зданий и сооружений, огнестойкость является важным свойством, которое следует учитывать для любого материала. Из-за небольшого количества исследований в этой области для данных конструкций отсутствует техническая документация, регламентирующая свойства сцепления и механические характеристики при повышенных температурах, необходимые для проектирования. Существует также необходимость разработки простого метода расчета огнестойкости и толщины изоляционного материала для усиливаемой конструкции. Данная статья объединяет существующие исследования работы волокон и связующего системы усиления при высоких температурах. Также в статье приведены экспериментальные результаты и численные исследования при повышенных температурах различных авторов для изолированных, а также неизолированных железобетонных конструкций, усиленных полимеркомпозитными материалами. Кроме того, приводится сравнение огнестойкости двух основных методов усиления полимеркомпозитными материалами: системы внешнего армирования и метода затяжки. Усиление конструкций методом затяжки обладает большими преимуществами по сравнению с усилением методом внешнего армирования.

**Ключевые слова:** железобетонных конструкции, усиление, огнестойкость, углеволокно, полимеркомпозитные материалы, метод внешнего армирования.

Введение. В последние десятилетия как в отечественной практике, так и за рубежом было проведено множество различных экспериментальных и численных исследований усилению железобетонных конструкций полимеркомпозитными материалами [1-30]. Полимеркомпозиты быстро завоевывают признание в различных областях гражданского строительства. В основном данный метод широко используют для усиления конструкций, при проектировании которых не требуется учитывать огнестойкость, например, при усилении мостовых конструкций. Хотя существует и более широкая область применения, включая жилые и общественные, а также промышленные здания, где пожарная безопасность является ключевой проблемой [31].

Конструкции, усиленные внешним армированием полимеркомпозитными материалами должны отвечать высоким требования по огнестойкости, изложенным в нормативных документах. Изучению влияния высоких температур на физико-механические характеристики материалов системы усиления посвящено множество исследований [32–39].

Применение полимеркомпозитных материалов осуществляется с помощью одного из двух известных методов армирования: внешнее армирование (EBR) и метод затяжки (NSM). Оба имеют несколько преимуществ и недостатков по сравнению друг с другом.

При использовании системы внешнего армирования (EBR) холсты или ламинаты наносят на поверхность конструкции, таким образом увеличивая жесткость и прочность элемента усиления. Кроме того, при использовании данного метода увеличивается прочность бетона на изгиб, сдвиг и кручение, что повышает несущую способность железобетонной конструкции.

В методе затяжки (NSM) армирование устанавливается в каналах, вырезанных на поверхности конструкции, которые затем заполняются связующим веществом, таким как эпоксидная смола или цементный раствор.

Основная часть. Метод внешнего армирования (EBR). Композитные материалы нашли свое применение для усиления железобетонных конструкций, а именно балок, плит, колонн и т.д., в случаях, когда традиционные методы усиления неэффективны. При усилении таким методом холст полимеркомпозитного материала с помощью клея на основе эпоксидной смолы приклеивается к поверхности усиливаемой конструкции. Этот метод прост и эффективен с точки зрения, как стоимости, так и механических характеристик, а также устойчив к коррозии в отличие от других альтернатив, таких как усиление стальными пластинами. Системы внешнего армирования из полимеркомпозитных материалов обеспечивают значительное увеличение прочности и жесткости, не увеличивая собственный вес конструкции. Область применения данного метода усиления постоянно увеличивается [40].

Авторы [41] провели испытания систем внешнего армирования после воздействия высоких температур, для исследования следующих параметров:

- остаточная предельная прочность на растяжение, деформации при разрушении и модуль упругости однонаправленных полимеркомпозитных материалов;
- остаточное сцепление между слоями полимеркомпозита в системе усиления, что важно в случаях, где контакт между слоями существенно влияет на работу конструкции, например, при усилении колонн обоймами;
- остаточное сцепление шва соединения полимеркомпозит-бетон.

Кривые термогравиметрического анализа (TGA – метод термического анализа, при котором регистрируется изменение массы образца в

зависимости от температуры), представленные на рисунке 1, показывают, что стекловолокно сохранило почти всю свою первоначальную массу при температурах до 800 °C, в то время как холсты из углеродного волокна потеряли около 10 % своей начальной массы при таких же температурах. Ни один из холстов не потерял заметной массы при температуре ниже 400 °C. Оба вида эпоксидных смол потеряли 90 % своей массы при температуре 800 °C, причем 80–90 % этой потери происходит при температурах от 300 °C до 400 °C.

Для достижения требуемого температурного воздействия образцы хранили в электрической печи и нагревали до заданной максимальной температуры со скоростью 10 °С/мин. Максимальную температуру поддерживали постоянной в течение 3 часов, а затем оставляли охлаждаться до комнатной температуры, для имитации воздействия огня при стандартном пожаре. После охлаждения образцы были испытаны.

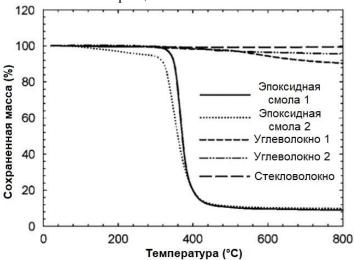


Рис. 1. Результаты термогравиметрического анализа различных составляющих системы усиления полимеркомпозитными материалами [41]

На основании экспериментальных данных можно сделать вывод, что остаточная прочность на растяжение систем внешнего армирования снижалась более чем на 50 % при температурах, приближающихся к температуре стеклования эпоксидных полимерных матриц. При температурах выше 100 °C системы усиления были способны сохранять около 80 % их прочности на растяжение. Таким образом, температура воздействия до 200 °C может быть допустимой. Сцепление между холстами в системе и сцепление полимеркомпозита с бетоном сохранили 80 % своей прочности при температуре на 150 °C выше, чем температура стеклования полимера Тg, т.е. примерно при 250 °C.

В работе [42] были проведены исследования работы железобетонных балок, усиленных углепластиком (CFRP), при воздействии огня. Программа эксперимента состояла из испытания на прочность по нормальным сечениям 24-х железобетонных балок с размерами поперечного сечения 100×150 мм, усиленных углепластиком шириной 100 мм и толщиной 1 мм, и изолированных одним слоем противопожарной изоляции на основе цемента толщиной 15-20 мм. Для оценки эффективности противопожарной изоляции испытания проводились по стандартной методике Британского института стандартов BSI 1987 г. Ненагруженные балки подвергались воздействию огня в течение 1 часа, а затем нагружались поэтапно вплоть до разрушения. На рисунке 2 показана температура разных участков образца.

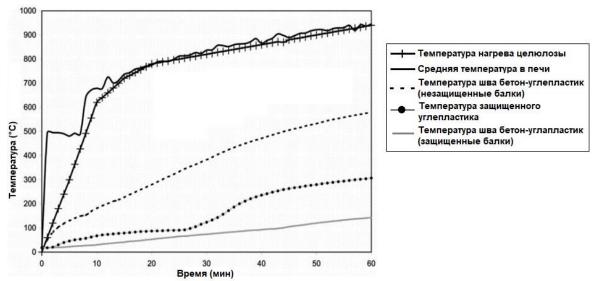


Рис. 2. Графики зависимости время-температура горения целлюлозы и время-температура различных областей образцов [42]

Результаты испытаний показали, что адгезионная связь между бетоном и углепластиком была разрушена в результате пожара из-за нарушения структуры связующего материала, в то время как углеволокно сохранило свою целостность. На основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что данной противопожарной изоляции недостаточно для поддержания температуры связующего ниже температуры его стеклования Tg более 30-45 мин.

Авторы [43] провели исследование огнестойкости двух полноразмерных балок таврового поперечного сечения, усиленных углеволокном, несущая способность которых после усиления увеличилась на 15 %. Углепластик был защищен вермикулитовой изоляцией, нанесенной на нижнюю и боковые поверхности элементов толщиной 25 мм для первого образца и 38 мм для второго образца. Балки были нагружены на 48 % от теоретической разрушающей нагрузки при комнатной температуре, а затем подвержены воздействию высоких температур. Оба образца показали 240-минутную огнестойкость. Однако в обоих случаях температура стеклования связующего Tg = 93 °C была достигнута в интервале между 35 и 36 минутами в первой балке и между 55 и 57 минутами во второй балке.

В статье [44] дополнительно расширено описанное выше исследование, испытаниями двух дополнительных балок таврового поперечного сечения, с противопожарной изоляцией 40 мм из цементного раствора, нанесенной распылением на боковые и нижние грани, и предварительно нагруженных до 71 % их теоретической разрушающей нагрузки при комнатной температуре. Полученные результаты были аналогичны результатам [43], несмотря на достижение температуры

стеклования адгезивом Тg менее чем за 30 минут. Ни одна из балок не разрушилась, и их огнестой-кость составила 240 мин. Высокий уровень огнестойкости был обеспечен благодаря системе противопожарной изоляции, поддерживающей низкие температуры. Анкеровка углепластика на приопорных участках балок также могла повысить их огнестойкость [45].

Авторы [46] испытали 4-е железобетонные балки, усиленные углеволокном под нагрузкой, при этом прирост прочности после усиления составил 50 %. Образцы подвергались воздействию расчетного пожара для общественного здания по стандартной методике Еврокода 1. Все балки были нагружены по схеме четырехточечного изгиба до половины их теоретической разрушающей нагрузки. Длина балок составляла 3,66 м. Приопорные зоны анкеровки были изолированы, поэтому только центральная часть пролета усиленной балки (2,44 м) была непосредственно подвергнута воздействию огня.

Результаты испытания показали, что балки, усиленные углеволокном, могут выдерживать воздействие огня в течение более 3 часов. Это связано с наличием противопожарной изоляции, которая сыграла важную роль в поддержании низкой температуры арматуры в течение всего времени испытания на огнестойкость. Стальная арматура сохраняла почти полную несущую способность в течение всего периода испытаний, так как арматура не теряет существенной прочности при температуре до 400 °C. Углепластик отклеился от поверхности балки между 20 и 25 минутой испытания, когда температура на границе раздела бетон-углепластик достигла температуры стеклования клея Tg = 82 °C. Нарушение сцепления под воздействием высоких температур уменьшило жесткость усиленных балок. Ни одна из балок не вышла из строя по огнестойкости.

В работе [47] были проведены испытания на огнестойкость шести железобетонных балок, усиленных полосами из углепластика, под нагрузкой равной половине их теоретической разрушающей нагрузки. Ламинаты углепластика были изолированы либо плитами силикат кальция (СS), либо цементным раствором на основе вермикулита/перлита. Толщина изоляции составляла 25–40 мм. Зоны анкеровки находились за пределами печи. Данный метод противопожарной изоляции позволил нагретому ламинату работать как затяжка, закрепленная в приопорных

зонах, где соединение углепластика с бетоном оставалось относительно неповрежденным.

Углепластик выключился из работы, когда в одной из приопорных зон анкеровки нарушилось сцепление, что произошло в результате достижения в шве соединения температуры равной температуре стеклования клея Тg, составившей 55 °C. Из рисунка 3 видно, что разрушение шва системы усиления произошло из-за снижения жесткости балки, т.е. внезапного увеличения прогиба в середине пролета. Противопожарная изоляция способствовала значительному увеличению огнестойкости системы усиления, причем ее величина варьировалась от 23 минут до 167 минут для различных типов изоляции.

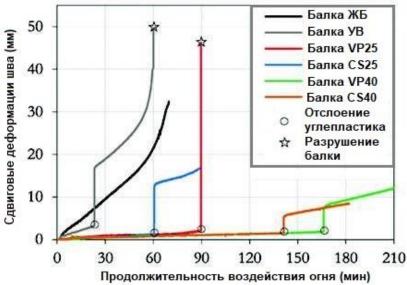


Рис. 3. Увеличение сдвиговых деформаций шва в середине пролета в зависимости от продолжительности воздействия высоких температур [47]

Авторы [46] для расширения экспериментальной базы провели исследование влияния противопожарной изоляции на несущую способность балок, усиленных углеволокном, подверженных воздействию огня. Для этого было изготовлено 4-е железобетонные балки прямоугольного поперечного сечения в соответствии со спецификациями Американского института бетона (АСІ 318). Железобетонные балки с прочностью бетона 55 МПа в день испытания были усилены углеволокном (толщиной 2 мм и шириной 203 мм), что привело к увеличению теоретической несущей способности на 50 %. Для усиления использовали двухкомпонентный эпоксидный клей с температурой стеклования Tg равной 82 °C. Для двух балок углеволокно приклеивали по всей длине для изучения влияния приопорной зоны анкеровки на огнестойкость конструкции два образца второй серии были усилены ламинатами углепластика для оценки эффекта расслоения шва соединения углепластик-бетон. На образцы

была нанесена противопожарная изоляция на основе вермикулита (изоляция VG) и эпоксидного клея. Для первой серии балок температура в установке увеличивалась, а затем постепенно уменьшалась, в то время как образцы второй серии были испытаны в условиях, соответствующих стандартному пожару. Результаты испытаний приведены на рисунке 4.

Температура поперечных сечений образцов второй серии увеличивалась на протяжении всего испытания, поскольку они подвергались воздействию стандартного огня, а в сечениях образцов первой серии температура сначала увеличивалась до максимального значения, а затем начинала снижаться. Снижение температуры может быть связано с фазой охлаждения при пожаре. Из-за развития трещин температура в системе усиления повысилась и привела к локальному горению эпоксидной смолы, поскольку температура стеклования Тg эпоксидных смол невелика (82 °C).

Из-за образования защитного слоя полукокса в результате пиролиза температура на границе шва углепластик-бетон медленно увеличивалась. Средняя температура стальной арматуры оставалась ниже 400 °C в течение всего периода испытаний, что способствовало минимальной

потере прочности арматуры, т. е. стальная арматура сохраняла полную прочность на протяжении всего испытания. Таким образом, можно сделать вывод о том, что эффективная схема изоляции в усиленных железобетонных балках имеет решающее значение для обеспечения необходимой огнестойкости.

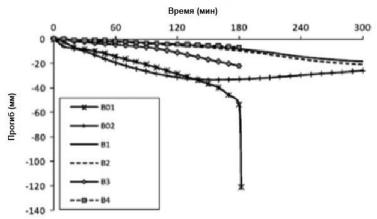


Рис. 4. График зависимости время-прогиб железобетонных балок, усиленных углеволокном с противопожарной изоляцией, подверженных воздействию огня [46]

Метод затяжки (NSM). В последнее время в практике зарубежного строительства метод затяжки (NSM) стал все более широко использоваться ввиду своей эффективности и простоты применения. Для этого на поверхности железобетонного элемента вырезаются каналы, в которые вклеиваются холсты или ленты полимеркомпозита. Усилие сдвига или изгиба может быть обеспечено любым из методов, используемых для усиления железобетонных конструкций [48].

В статье [49] описаны испытания 4-х полноразмерных железобетонных балок таврового поперечного сечения, усиленных ламинатами углепластика и подвергнутых воздействию огня под нагрузкой по схеме четырехточечного изгиба. В ходе испытания изучалось влияние уровня нагружения балки (50-65 % от теоретической несущей способности до усиления) и наличие U-образной системы противопожарной изоляции толщиной 25 мм. Результаты испытаний приведены на рисунке 5. На основании экспериментальных данных можно сделать вывод, что ламинаты углепластика в первую очередь отрываются только в зоне чистого изгиба балки во время пожара. В результате чего, система усиления методом затяжки под воздействием высоких температур не выходит из строя полных 210 минут.

В работе [50] были проведены испытания железобетонных балок двух серий (по 6 образцов в каждой серии) пролетом 3,15 м, подверженных воздействию огня. Из 12 балок: 2 – эталонные образцы, а 10 – усиленные железобетонные балки, дополнительно защищенные противопожарной

изоляцией. Изолированные балки были усилены методом затяжки полосами углепластика, в качестве связующего использовалось два типа эпоксидного клея с температурой стеклования Тд в диапазоне 62-65 °C и 82 °C соответственно. Противопожарная изоляция была из пяти различных материалов с одинаковой толщиной 20-100 мм и наносилась на нижнюю и боковые грани по всей длине балок. Первоначально балки были нагружены до 37-54 % их теоретической несущей способности, а затем подвергались воздействию огня по стандартной методике ISO 834. Все образцы воспринимали приложенную нагрузку без отказов в течение 2 ч при воздействии высоких температур. Температура соединения превысила температуру стеклования клея Тg, но это не нарушило сцепление системы.

В статье [51] описаны испытания 13 образцов железобетонных плит, 11 из которых были усилены методом затяжки углеволокном с адгезивом (эпоксидным или цементным клеем). Шесть образцов плит были испытаны при комнатной температуре при поэтапном нагружении до разрушения, а семь образцов - при постоянной нагрузке с повышением температуры поверхности вплоть до разрушения. Для этого плиты при комнатной температуре были загружены со скоростью 2 кН/мин до нагрузки 20 кН. После достижения нагрузки 20 кН повышали температуру до 100 или 200 °C.

Испытание показало, что используемый эпоксидный клей обеспечивает лучшую адгезию по сравнению с цементным клеем, используемым

при усилении железобетонных изгибаемых элементов полимеркомпозитными материалами методом затяжки. Конструкции, усиленные методом затяжки полимеркомпозитными материалами, могут сопротивляться воздействию высоких температур в течение нескольких часов даже в тех случаях, когда после усиления несущая способность конструкции существенно повышена.

Также можно сделать вывод, что эффективность работы системы усиления методом затяжки при высоких температурах можно значительно увеличить, используя цементный клей, обеспечивающий надежное сцепление шва соединения в течении 4 часов.

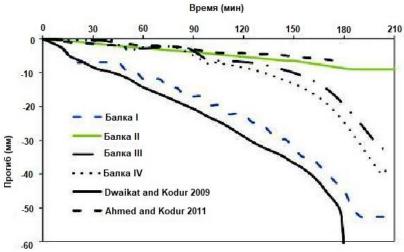


Рис. 5. Сравнение прогибов в середине пролета железобетонных балок без усиления, усиленных углеволокном методом затяжки и усиленных методом внешнего армирования [49]

Огнестойкость элементов системы усиления полимеркомпозитными материалами. Таким образом, можно сделать вывод, что, даже если существующий ранее конструктивный элемент был чрезмерно нагружен, а система усиления обеспечивает небольшое увеличение несущей способности, элемент все еще может воспринимать приложенную нагрузку в течение определенного промежутка времени под воздействием высоких температур [45]. В большинстве исследований, описанных выше, системы усиления обеспечивали сравнительно низкое увеличение несущей способности, что объясняет хорошую огнестойкость конструкций. При применении в системах усиления дополнительной противопожарной изоляции зачастую замедляется отказ конструкции, а также обеспечивается теплоизоляция как бетона, так и стальной арматуры.

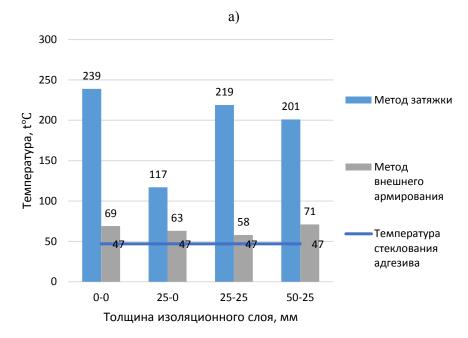
Сравнение огнестойкости системы внешнего армирования и метода затяжки. Авторы [47] пришли к выводу, что системы усиления методом затяжки, использующие ламинаты углепластика, обеспечивают безотказную работу усиленной конструкции под воздействием огня. В таких системах огнестойкость конструкций значительно выше. Это вызвано следующими факторами:

- теплоизоляцией углепластика, ввиду частичного погружения системы усиления в бетон;
- улучшенными характеристиками сцепления углепластика и бетона.

Сравнение огнестойкости систем усиления методом внешнего армирования и методом затяжки, приведенное в [45] представлено на рисунке 6: а) средняя температура зоны анкеровки; б) среднее время разрушения конструкции.

Выводы. Несмотря на то, что в этой области зарубежными исследователями было проведено множество испытаний, информация об огнестой-кости конструкций, усиленных полимеркомпозитными материалами, ограничена, особенно в реальных условиях пожара и под нагрузкой. На основании приведенной выше информации можно сделать вывод, что, если несущая конструкция запроектирована с запасом по огнестойкости, а увеличение несущей способности конструкции после усиления является небольшим, конструктивный элемент все еще может воспринимать приложенную нагрузку под воздействием высоких температур.

Усиление конструкций методом затяжки обладает большими преимуществами по сравнению с усилением методом внешнего армирования. Кроме того, изоляция огнезащитными материалами системы внешнего армирования может значительно улучшить огнестойкость конструкции, повышая при этом стоимость усиления. Существует также необходимость разработки более простого метода расчета огнестойкости и толщины изоляционного материала для усиливаемой конструкции.



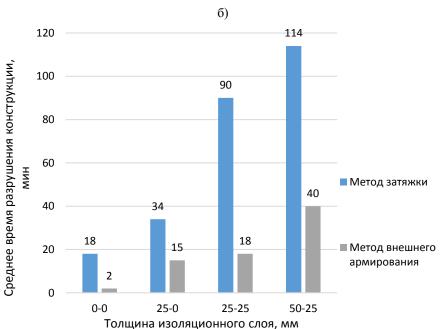


Рис. 6. Сравнение огнестойкости систем усиления методом внешнего армирования и методом затяжки: а) средняя температура зоны анкеровки в зависимости от толщины изоляции в мм. [45];

б) среднее время разрушения конструкции при различных толщинах изоляции в мм [45]

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Бокарев С.А., Неровных А.А., Смердов Д.Н. Стойкость изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных композиционными материалами на основании углеродного волокна, к воздействию отрицательных и положительных температур // Международная научнопрактическая конференция, посвященная 80-летию Сибирского государственного университета путей сообщения. Тезисы конференции. Ч. І. Новосибирск. 2012. С. 127–128.
- 2. Бокарев С.А., Костенко А.Н., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Эксперименталь-

- ные исследования при пониженных и повышенных температурах железобетонных образцов, усиленных полимерными композиционными материалами // Интернет-журнал «Науковедение». 2013. №3 (16). С. 1–9.
- 3. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Нелинейный анализ железобетонных изгибаемых конструкций, усиленных композитными материалами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. №2. С. 113–125.
- 4. Бокарев С.А., Смердов Д.Н., Устинов В.П., Яшнов А.Н. Усиление пролетных строений

- с использованием композитных материалов // Путь и путевое хозяйство. 2008. №6. С. 30–31.
- 5. Бокарев С.А., Власов С.М., Неровных А.А., Смердов Д.Н. Коэффициенты надежности для композиционных материалов, применяемых для усиления железобетонных элементов мостовых конструкций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. №2. С. 222–229.
- 6. Бокарев С.А., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Методика расчета по прочности сечений, эксплуатируемых железобетонных пролетных строений, усиленных композитными материалами // Известия вузов. Строительство. 2010. №2. С. 63–64.
- 7. Бокарев С.А., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Оценка выносливости изгибаемых железобетонных конструкции, усиленных композитными материалами // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения. Международный сборник научных трудов. Хабаровск. 2010. С. 287–294.
- 8. Быков А.А., Румянцев С.Д., Бирин А.С. Экспериментальное исследование прочностных и деформационных характеристик железобетонных балок, усиленных углепластиком // Вестник ПНИПУ. 2016. №2(22). С. 112–126.
- 9. Григорьева Я.Е. Экспериментальное исследование влияния внешнего армирования изгибаемых железобетонных балок углеволокном на прочность и жесткость конструкций // Вестник Московского государственного строительного университета. 2011. №8. С. 181–184.
- 10. Михуб А., Польской П.П. Опытные значения ширины раскрытия нормальных трещин железобетонных балок, усиленных композитными материалами // Инженерный вестник Дона. 2013. №2 (25). 104 с.
- 11. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Ч.1. Отечественные эксперименты при статическом нагружении [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2016. [Т. 8]. №3. URL: http://naukovedenie.ru/PDF.
- 12. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Ч.2. Влияние температуры [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2016. [Т. 8]. №4. URL: http://naukovedenie.ru/ PDF/01TVN416.pdf.
- 13. Смердов М.Н., Смердов Д.Н., Клементьев А.О. Экспериментальные исследования

- прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, армированных в сжатой и растянутой зоне неметаллической композиционной арматурой // Транспорт Урала. 2014. №4. С. 49–54.
- 14. Смердов М.Н., Неволин Д.Г., Клементьев А.О., Смердов Д.Н. Методика расчета изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерными композиционными материалами // Транспорт Урала. 2015. №3. С. 98–101.
- 15. Смердов М.Н., Смердов Д.Н., Селиванова Е.О. К вопросу долговечности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных полимерными композиционными материалами // Материалы международной научно-практической конференции «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе». Пермь. 2015. С. 490–493.
- 16. Смердов М.Н., Смердов Д.Н., Селиванова Е.О. Отечественный опыт экспериментальных исследований долговечности железобетонных элементов, усиленных полимерными композиционными материалами // Инновационный транспорт. 2015. №2. С. 60–63.
- 17. Смоляго Г.А., Ищук Я.Л., Чередниченко А.П. Усиление изгибаемых железобетонных элементов углеволокном с учетом истории нагружений // Наука и инновации в строительстве: Сборник докладов Международной научно-практической конференции (к 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова). Белгород. 2018. С. 120–124.
- 18. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами. М.: Стройиздат, 2007. 180 с.
- 19. Юшин А.В. К расчету наклонных сечений элементов железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами // Вестник гражданских инженеров. 2013. №4 (39). С. 83–91.
- 20. Юшин А.В., Морозов В.И. Анализ НДС двухпролетных железобетонных балок, усиленных композитными материалами по наклонному сечению, с учетом нелинейности [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2014. №6. URL: http://www.science-education.ru.
- 21. Юшин А.В., Морозов В.И. Экспериментальные исследования двухпролетных железобетонных балок, усиленных композитными материалами по наклонному сечению // Вестник гражданских инженеров. 2014. №5 (46). С. 77–84.
- 22. Польской П.П., Маилян Д.Р. Композитные материалы как основа эффективности в строительстве и реконструкции зданий и сооружений [Электронный ресурс] // Инженерный

- вестник Дона. 2012. №4. Ч.2. URL: http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307.
- 23. Хишмах М., Польской П.П., Михуб А. К вопросу о деформативности балок из тяжелого бетона, армированных стеклопластиковой и комбинированной арматурой // Эл. журнал «Инженерный вестник Дона». 2012. №4. С. 163-166.
- 24. Польской П.П., Маилян Д.Р., Мерват Х., Кургин К.В. О деформативности изгибаемых элементов из тяжелого бетона при двухрядном расположении углепластиковой и комбинированной арматуры [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2094.
- 25. Польской П.П., Георгиев С.В. Вопросы исследования сжатых железобетонных элементов, усиленных различными видами композитных материалов [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2134.
- 26. Маилян Д.Р., Польской П.П. Прочность и деформативность вновь усиленных композитными материалами балок, при различных варьируемых факторах [Электронный ресурс] // Эл. журнал «Инженерный вестник Дона». 2013. №2. URL: http://ivdon@ivdon.ru.
- 27. Маилян Д.Р., Польской П.П., Георгиев С.В. Методики усиления углепластиком и испытания коротких и гибких стоек // Научное обозрение. 2014. №10. Ч.2. С. 415–418.
- 28. Клюев С.В. Усиление и восстановление конструкций с использованием композитов на основе углеволокна // Бетон и железобетон. 2012. N23. С. 23–26.
- 29. Клюев С.В., Гурьянов Ю.В. Внешнее армирование изгибаемых фибробетонных изделий углеволокном // Инженерно-строительный журнал. 2013. №1 (36). С. 21–26.
- 30. Клюев С.В., Рубанов В.Г., Павленко В.И., Гурьянов Ю.В., Гинзбург А.В. Расчет строительных конструкций усиленных углеволокном // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №5. С. 54–56.
- 31. Kodur V., Baingo D. Fire resistance of FRP reinforced concrete slabs. National Research Council of Canada. 1998. 758 p.
- 32. Mallick P.K. Fiber-Reinforced Composites. CRC Press. 2007. 584 p.
- 33. Sen R., Mariscal D., Shahawy M. Durability of Fiberglass Prestensioned Beams // ACI Structural Journal. 1993. Vol. 90. Pp. 525–533.
- 34. Gates T. Effects of Elevated Temperature on the Viscoelastic Modeling of Graphite/Polymeric Composites // NASA Technical Memorandum. 1991. Pp. 104–160.

- 35. Chowdhury E., Eedson R., Bisby L., Green M., Benichou N. Mechanical Characterization of Fibre Reinforced Polymers Materials at High Temperature // Fire Technol. 2011. Vol. 47. Pp. 1055–1063.
- 36. Bisby L., Green M. Fire Performance of FRP Systems for Infrastructure. A State-of-the-Art Report NRC Publications Archive. 2005. 59 p. doi:10.4224/20377587.
- 37. Mallick P.K. Fibre-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design. Marcel Dekker Inc. New York. 1988.
- 38. Katz A. Bond mechanism of FRP rebars to concrete // Materials and Structures. 1999. Vol. 32. Pp. 761–768.
- 39. Kodur V., Baingo D. Fire resistance of FRP reinforced concrete slabs. National Research Council of Canada. 1998. 758 p.
- 40. Fib bulletin 14 Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report. 2000.
- 41. Foster S., Bisby L. Fire Survivability of Externally Bonded FRP Strengthening Systems // J. Compos. Constr. 2008. Vol. 12. Pp. 553–561.
- 42. Barnes R., Fidell J. Performance in Fire of Small-Scale CFRP Strengthened Concrete Beams // J. Compos. Constr. 2006. Vol. 10. Pp. 503–508.
- 43. Williams B., Kodur V., Green M., Bisby L. Fire Endurance of Fiber-Reinforced Polymer Strengthened Concrete TBeams // ACI Structural Journal. 2008. Vol. 105. Pp. 60–67.
- 44. Adelzadeh M., Green M., Benichou N. Behaviour of fibre reinforced polymer-strengthened Tbeams and slabs in fire // Struct. Build. 2012. Vol. 165. Pp. 361–371.
- 45. Firmo J., Correia R., Bisby L. Fire behaviour of FRP strengthened reinforced concrete structural elements // A state-of-the-art review Composites Part B. 2015. Vol. 80. Pp. 198–216.
- 46.Ahmed A., Kodur V. The experimental behavior of FRP-strengthened RC beams subjected to design fire exposure // Eng. Struct. 2011. Vol. 33. Pp. 2201–2211.
- 47. Firmo J., Correia R., França P. Fire behaviour of reinforced concrete beams strengthened with CFRP laminates // Protection systems with insulation of the anchorage zones Composites Part B: Engineering. 2012. Vol. 43. Pp. 1545–1556.
- 48. Barros J., Fortes A. Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits // Cement Concr Compos. 2006. Vol. 27. Pp. 471–480.
- 49. Yu B., Kodur V. Fire behavior of concrete T-beams strengthened with near-surface mounted FRP reinforcement // Eng. Struct. 2014. Vol. 80. Pp. 350–361.
- 50. Palmieri A., Matthys S., Taerwe L. Experimental investigation on fire endurance of insulated concrete beams strengthened with near surface

mounted FRP bar reinforcement // Compos. Part B. 2012. Vol. 43. Pp. 885–895.

51. Burke P. Low and high temperature performance of near surface mounted FRP strengthened

concrete slabs: the degree of Master of Science (Engineering). Queen's Univ., Kinston, ON, Canada, 2008. 193 p.

#### Информация об авторах

Смоляго Геннадий Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: tpk-psv@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Обернихина Яна Леонидовна**, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: yana.ishuk@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 28.10.2019 г.

© Смоляго Г.А., Обернихина Я.Л., 2021

#### Smolyago G.A., \*Obernikhina Y.L.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov \*E-mail: yana.ishuk@yandex.ru

### REVIEW OF THE EFFICIENCY OF REINFORCEMENT BY FIBER REINFORCED POLYMER MATERIALS. FIRE RESISTANCE OF STRUCTURES

Abstract. Fiber reinforced polymer (FRP) are rapidly gaining popularity in various fields of civil engineering. For decades, these materials have been used to strengthen structures that are not exposed to fire, such as bridges. To apply this reinforcement method to increase the bearing capacity of structures of buildings and structures, fire resistance is an important feature for any material. Due to the small amount of research in this area, there is no technical documentation for these structures that regulates the coupling properties and mechanical characteristics at elevated temperatures necessary for design. There is also a need to develop a simple method for calculating the fire resistance and thickness of an insulating material for a reinforced structure. This article combines existing studies of the operation of fibers and a binder reinforcement system at high temperatures. The article also presents experimental results and numerical studies at elevated temperatures of various authors for isolated and non-insulated reinforced concrete structures reinforced with polymer composite materials. In addition, a comparison of the fire resistance of two main methods of reinforcing polymer composite materials is given: an externally bonded reinforcement and a near surface mounted method. Strengthening structures by near surface mounted method has great advantages compared to strengthening by externally bonded reinforcement.

**Keywords:** reinforced concrete structures, reinforcement, fire resistance, carbon fiber, polymer composite materials, externally bonded reinforcement, near surface mounted.

#### **REFERENCES**

- 1. Bokarev S.A., Nerovnykh A.A., Smerdov D.N. Resistance of bending reinforced concrete structures reinforced with composite materials based on carbon fiber to negative and positive temperatures [Stojkost' izgibaemyh zhelezobetonnyh konstrukcij, usilennyh kompozicionnymi materialami na osnovanii uglerodnogo volokna, k vozdejstviyu otricatel'nyh i polozhitel'nyh temperatur]. International scientific and practical conference dedicated to the 80th anniversary of the Siberian State University of Communications. Conference abstracts. Part I. Novosibirsk. 2012. Pp. 127–128. (rus)
- 2. Bokarev S.A., Kostenko A.N., Smerdov D.N., Nerovnykh A.A. Experimental studies at low and high temperatures of reinforced concrete specimens reinforced with polymer composite materials [Eksperimental'nye issledovaniya pri ponizhennyh i

- povyshennyh temperaturah zhelezobetonnyh obrazcov, usilennyh polimernymi kompozicionnymi materialami]. Naukovedenie Internet journal. 2013. No. 3 (16). Pp. 1–9. (rus)
- 3. Bokarev S.A., Smerdov D.N. Nonlinear analysis of reinforced concrete bending structures reinforced with composite materials [Nelinejnyj analiz zhelezobetonnyh izgibaemyh konstrukcij, usilennyh kompozitnymi materialami]. Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2010. No. 2. Pp. 113–125. (rus)
- 4. Bokarev S.A., Smerdov D.N., Ustinov V.P., Yashnov A.N. Strengthening of span structures using composite materials [Usilenie proletnyh stroenij s ispol'zovaniem kompozitnyh materialov]. Path and track economy. 2008. No. 6. Pp. 30–31. (rus)

- 5. Bokarev S.A., Vlasov S.M., Nerovnykh A.A., Smerdov D.N. Reliability factors for composite materials used to strengthen reinforced concrete elements of bridge structures [Koefficienty nadezhnosti dlya kompozicionnyh materialov, primenyaemyh dlya usileniya zhelezobetonnyh elementov mostovyh konstrukcij]. Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2012. No. 2. Pp. 222–229. (rus)
- 6. Bokarev S.A., Smerdov D.N., Nerovnykh A.A. Methodology for calculating the strength of sections of exploited reinforced concrete spans reinforced with composite materials [Metodika rascheta po prochnosti sechenij, ekspluatiruemyh zhelezobetonnyh proletnyh stroenij, usilennyh kompozitnymi materialami]. Izvestiya vuzov. Construction. 2010. No. 2. Pp. 63–64. (rus)
- 7. Bokarev S.A., Smerdov D.N., Nerovnykh A.A. Evaluation of the endurance of bent reinforced concrete structures reinforced with composite materials [Ocenka vynoslivosti izgibaemyh zhelezobetonnyh konstrukcii, usilennyh kompozitnymi materialami]. Far East. Highways and traffic safety. International collection of scientific papers. Khabarovsk. 2010. Pp. 287–294. (rus)
- 8. Bykov A.A., Rumyantsev S.D., Birin A.S. Experimental study of the strength and deformation characteristics of reinforced concrete beams reinforced with carbon fiber [Eksperimental'noe issledovanie prochnostnyh i deformacionnyh harakteristik zhelezobetonnyh balok, usilennyh ugleplastikom]. Vestnik PNRPU. 2016. No. 2 (22). Pp. 112–126. (rus)
- 9. Grigorieva Ya.E. The strength and deformability of reinforced concrete beams, reinforced with carbon fiber at a stage close to the exhaustion of the bearing capacity [Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya vneshnego armirovaniya izgibaemyh zhelezobetonnyh balok uglevoloknom na prochnost' i zhestkost' konstrukcij]. Vestnik of the Moscow State University of Civil Engineering Moscow. 2011. No. 8. Pp.181–184. (rus)
- 10. Mikhub A., Polskoy P.P. Strength, deformability and crack resistance of bent reinforced concrete elements reinforced with composite materials [Opytnye znacheniya shiriny raskrytiya normal'nyh treshchin zhelezobetonnyh balok, usilennyh kompozitnymi materialami]. Rostov-on-Don. 2013. No. 2 (25). 104 p. (rus)
- 11. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. Analysis of experimental studies on the reinforcement of reinforced concrete structures with polymer composite materials. Part 1. Domestic experiments under static loading [Analiz eksperimental'nyh issledovanij po usileniyu zhelezobetonnyh konstrukcij polimernymi kompozitnymi materialami. CH.1. Otechestvennye

- eksperimenty pri staticheskom nagruzhenii]. Naukovedenie Internet magazine. Vol. 8. No. 3 (2016). http://naukovedenie.ru/PDF/ (free access). (rus)
- 12. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. Analysis of experimental studies on the reinforcement of reinforced concrete structures with polymer composite materials. Part 2. Influence of temperature [Analiz eksperimental'nyh issledovanij po usileniyu zhelezobetonnyh konstrukcij polimernymi kompozitnymi materialami. CH.2. Vliyanie temperatury]. Online magazine "Science". 2016. Vol. 8. No. 4 http://naukovedenie.ru/ PDF / 01TVN416.pdf (free access). (rus)
- 13. Smerdov M.N., Smerdov D.N., Klementyev A.O. Experimental studies of the strength and deformability of bending reinforced concrete elements reinforced in a compressed and stretched zone with non-metallic composite reinforcement [Eksperimental'nye issledovaniya prochnosti i deformativnosti izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov, armirovannyh v szhatoj i rastyanutoj zone nemetallicheskoj kompozicionnoj armaturoj]. Transport of the Urals. 2014. No. 4. Pp. 49–54. (rus)
- 14. Smerdov M.N., Nevolin D.G., Klement'ev A.O., Smerdov D.N. Calculation method for flexible concrete elements reinforced with polymer composite materials [Metodika rascheta izgibaemyh betonnyh elementov, armirovannyh polimernymi kompozicionnymi materialami]. Transport of the Urals. 2015. No. 3. Pp. 98–101. (rus)
- 15. Smerdov M.N., Smerdov D.N., Selivanova E.O. On the issue of durability of bent reinforced concrete elements reinforced with polymer composite materials [K voprosu dolgovechnosti izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov, usilennyh polimernymi kompozicionnymi materialami]. Materials of the international scientific-practical conference "Modernization and research in the transport complex". Permian. 2015. Pp. 490–493. (rus)
- 16. Smerdov M.N., Smerdov D.N., Selivanova E.O. Domestic experience in experimental studies of the durability of reinforced concrete elements reinforced with polymer composite materials [Otechestvennyj opyt eksperimental'nyh issledovanij dolgovechnosti zhelezobetonnyh elementov, usilennyh polimernymi kompozicionnymi materialami]. Innovative transport. 2015. No. 2. Pp. 60–63. (rus)
- 17. Smolyago G.A., Ischuk Ya.L., Cherednichenko A.P. Reinforcement of bent reinforced concrete elements with carbon fiber taking into account the history of loading [Usilenie izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov uglevoloknom s uchetom istorii nagruzhenij]. Science and innovations in construction: Collection of reports of the International Scientific and Practical Conference (to

- the 165th anniversary of the birth of V.G. Shukhov). Belgorod. 2018. Pp. 120–124. (rus)
- 18. Shilin A.A., Pshenichny V.A., Kartuzov D.V. External reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials [Vneshnee armirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami]. Moscow: Stroyizdat, 2007. 180 p. (rus)
- 19. Yushin A.V. To the calculation of inclined sections of reinforced concrete elements reinforced with composite materials [K raschetu naklonnyh sechenij elementov zhelezobetonnyh konstrukcij, usilennyh kompozitnymi materialami]. Bulletin of civil engineers. 2013. No. 4 (39). Pp. 83–91. (rus)
- 20. Yushin A.V., Morozov V.I. Analysis of the stress-strain state of two-span reinforced concrete beams reinforced with composite materials along an inclined section, taking into account nonlinearity [Analiz NDS dvuhproletnyh zhelezobetonnyh balok, usilennyh kompozitnymi materialami po naklonnomu secheniyu, s uchetom nelinejnosti]. [Electronic resource]. Modern problems of science and education. 2014. No. 6. Access mode: http://www.science-education.ru. (rus)
- 21. Yushin A.V., Morozov V.I. Experimental studies of two-span reinforced concrete beams reinforced with composite materials along an inclined section [Eksperimental'nye issledovaniya dvuhproletnyh zhelezobetonnyh balok, usilennyh kompozitnymi materialami po naklonnomu secheniyu]. Bulletin of civil engineers. 2014. No. 5 (46). Pp. 77–84. (rus)
- 22. Polish P.P., Mayilyan D.R. Composite materials as the basis of efficiency in construction and reconstruction of buildings and structures [Kompozitnye materialy kak osnova effektivnosti v stroitel'stve i rekonstrukcii zdanij i sooruzhenij]. Engineering Bulletin of the Don. 2012. No. 4 (part 2) URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307. (rus)
- 23. Khishmah M., Polskoy P.P., Mihub A. On the deformability of beams made of heavy concrete, reinforced with fiberglass and combined reinforcement [K voprosu o deformativnosti balok iz tyazhelogo betona, armirovannyh stekloplastikovoj i kombinirovannoj armaturoj]. El. journal "Engineering Bulletin of the Don". 2012. No. 4. Pp. 163–166. (rus)
- 24. Polskoy P.P., Mayilyan D.R., Mervat K., Kurgin K.V. On the deformability of bending elements made of heavy concrete with a two-row arrangement of carbon fiber and combined reinforcement [O deformativnosti izgibaemyh elementov iz tyazhelogo betona pri dvuhryadnom raspolozhenii ugleplastikovoj i kombinirovannoj armatury]. Engineering Bulletin of Don. 2013. No. 4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2094. (rus)

- 25. Polish P.P., Georgiev S.V. Research issues of compressed reinforced concrete elements reinforced with various types of composite materials [Voprosy issledovaniya szhatyh zhelezobetonnyh elementov, usilennyh razlichnymi vidami kompozitnyh materialov]. Engineering Bulletin of the Don. 2013. No. 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2134. (rus)
- 26. Mayilyan D.R., Polish P.P. Strength and deformability of beams reinforced with composite materials under various variable factors [Prochnost' i deformativnost' vnov' usilennyh kompozitnymi materialami balok, pri razlichnyh var'iruemyh faktorah]. Electronic scientific journal. Engineering Bulletin of Don. 2013. No. 2. Access mode: ivdon@ivdon.ru. (rus)
- 27. Mayilyan D.R., Polskoy P.P., Georgiev S.V. Methods of CFRP reinforcement and testing of short and flexible struts [Metodiki usileniya ugleplastikom i ispytaniya korotkih i gibkih stoek]. Scientific Review. 2014. No. 10. Part 2. Pp. 415–418. (rus)
- 28. Klyuev S.V. Strengthening and restoration of structures using composites based on carbon fiber [Usilenie i vosstanovlenie konstrukcij s ispol'zovaniem kompozitov na osnove uglevolokna]. Concrete and reinforced concrete. 2012. No. 3. Pp. 23–26. (rus)
- 29. Klyuev S.V., Guryanov Yu.V. External reinforcement of bent fiber-reinforced concrete products with carbon fiber [Vneshnee armirovanie izgibaemyh fibrobetonnyh izdelij uglevoloknom]. Engineering and construction journal. 2013. No. 1 (36). Pp. 21–26. (rus)
- 30. Klyuev S.V., Rubanov V.G., Pavlenko V.I., Guryanov Yu.V., Ginzburg A.V. Calculation of building structures reinforced with carbon fiber [Raschet stroitel'nyh konstrukcij usilennyh uglevoloknom]. Vestnik BGTU named after V.G. Shukhov. 2013. No. 5. Pp. 54–56. (rus)
- 31. Kodur V., Baingo D. Fire resistance of FRP reinforced concrete slabs. National Research Council of Canada. 1998. 758 p.
- 32. Mallick P. K. Fiber-Reinforced Composites. CRC Press. 2007. 584 p.
- 33. Sen R., Mariscal D., Shahawy M. Durability of Fiberglass Prestensioned Beams. ACI Structural Journal. 1993. Vol. 90. Pp. 525-533.
- 34. Gates T. Effects of Elevated Temperature on the Viscoelastic Modeling of Graphite. Polymeric Composites. NASA Technical Memorandum. 1991. Pp. 104–160.
- 35. Chowdhury E., Eedson R., Bisby L., Green M., Benichou N. Mechanical Characterization of Fiber Reinforced Polymers Materials at High Temperature. Fire Technol. 2011. Vol. 47. Pp. 1055–1063.

- 36. Bisby L., Green M. Fire Performance of FRP Systems for Infrastructure. A State-of-the-Art Report NRC Publications Archive. 2005. 59 p. DOI: 10.4224 / 20377587.
- 37. Mallick P.K. Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design. Marcel Dekker Inc. New York, 1988.
- 38. Katz A. Bond mechanism of FRP rebars to concrete. Materials and Structures. 1999. Vol. 32. Pp. 761–768.
- 39. Kodur V., Baingo D. Fire resistance of FRP reinforced concrete slabs. National Research Council of Canada. 1998. 758 p.
- 40. Fib bulletin 14 Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report. 2000.
- 41. Foster S., Bisby L. Fire Survivability of Externally Bonded FRP Strengthening Systems. J. Compos. Constr. 2008. Vol. 12. Pp. 553–561.
- 42. Barnes R., Fidell J. Performance in Fire of Small-Scale CFRP Strengthened Concrete Beams. J. Compos. Constr. 2006. Vol. 10. Pp. 503-508.
- 43. Williams B., Kodur V., Green M., Bisby L. Fire Endurance of Fiber-Reinforced Polymer Strengthened Concrete TBeams. ACI Structural Journal. 2008. Vol. 105. Pp. 60–67.
- 44. Adelzadeh M., Green M., Benichou N. Behavior of fiber reinforced polymer-strengthened Tbeams and slabs in fire. Struct. Build. 2012. Vol. 165. Pp. 361–371.
- 45. Firmo J., Correia R., Bisby L. Fire behavior of FRP strengthened reinforced concrete structural

- elements. A state-of-the-art review Composites Part B. 2015. Vol. 80. Pp. 198–216.
- 46.Ahmed A., Kodur V. The experimental behavior of FRP-strengthened RC beams subjected to design fire exposure. Eng. Struct. 2011. Vol. 33. Pp. 2201–2211.
- 47. Firmo J., Correia R., França P. Fire behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP laminates. Protection systems with insulation of the anchorage zones Composites Part B: Engineering. 2012. Vol. 43. Pp. 1545–1556.
- 48. Barros J., Fortes A. Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits. Cement Concr Compos. 2006. Vol. 27. Pp. 471–480.
- 49. Yu B., Kodur V. Fire behavior of concrete T-beams strengthened with near-surface mounted FRP reinforcement. Eng. Struct. 2014. Vol. 80. Pp. 350–361.
- 50. Palmieri A., Matthys S., Taerwe L. Experimental investigation on fire endurance of insulated concrete beams strengthened with near surface mounted FRP bar reinforcement. Compos. Part B. 2012. Vol. 43. Pp. 885–895.
- 51. Burke P. Low and high temperature performance of near surface mounted FRP strengthened concrete slabs: the degree of Master of Science (Engineering). Queen's Univ., Kinston, ON, Canada, 2008. 193 p.

Information about the authors

**Smolyago, Gennadiy A.** DSc, Professor. E-mail: tpk-psv@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Obernikhina, Yana L.** Postgraduate student. E-mail: yana.ishuk@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 28.10.2019

#### Для цитирования:

Смоляго Г.А., Обернихина Я.Л. Обзор эффективности усиления полимеркомпозитными материалами. Огнестойкость конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 15–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-15-27

#### For citation:

Smolyago G.A., Obernikhina Y.L. Review of the efficiency of reinforcement by fiber reinforced polymer materials. Fire resistance of structures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 2. Pp. 15–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-15-27

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-28-37

#### \*Чуйкина А.А., Лобода А.В., Сотникова О.А.

Воронежский государственный технический университет \*E-mail: a.a.chuykina@mail.ru

#### ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ТРУБОПРОВОДНОЙ ТРАССЫ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ

Аннотация. Одной из основополагающих задач при проектировании систем теплоснабжения является выбор оптимальной трассы трубопровода. При этом аналитическое решение такой задачи практически невозможно в связи с наличием множества взаимозависящих факторов, влияющих на конечное решение. В статье рассматривается один из возможных методов определения ограниченного количества наиболее выгодных вариантов трассировки тепловой сети, базирующийся на решении многокритериальной оптимизационной задачи с помощью системного анализа. Предлагаемый метод позволяет получить ограниченное число выгодных вариантов трассировки при отсутствии необходимости проведения экспертного оценивания нескольких критериев оптимальности. В работе приводятся основные укрупненные параметры тепловой сети, позволяющие решать рассматриваемую оптимизационную задачу на начальном этапе проектирования систем теплоснабжения, при отсутствии полного конструктивного расчета рассматриваемых схем и с учетом качественных, и количественных показателей оптимизации. Для наглядности, результаты ограничения заведомо невыгодных вариантов трубопроводной трассы приводятся в графической форме. Предлагается при наличии большого количества критериев оптимальности геометрическую наглядность рассмотрений в плоскости заменить исследованием таблицы или матрицы характеристик. Суть этого исследования состоит в последовательном рассмотрении всевозможных пар строк из составленной матрицы.

**Ключевые слова:** тепловые сети, многокритериальная оптимизация, системный анализ, теплоснабжение, трубопроводы.

Введение. Выбор оптимальной трассы трубопровода системы теплоснабжения является одной из основополагающих задач при проектировании рассматриваемых систем. Аналитическое решение данной задачи практически невозможно из-за влияния на него множества факторов, не зависящих напрямую друг от друга [1]. Например, не представляется возможным найти связь между параметрами качества теплоносителя у потребителя и временем строительства тепловой сети, причем как один, так и другой параметры могут являться определяющими при выборе трассы в зависимости от технического задания на проектирование. В этой связи, как отмечается в работах [2, 3] большое распространение получает метод выбора наиболее предпочтительного варианта, основывающийся на многокритериальном анализе. При этом, как отмечается в работах [3-6] большое значение приобретает этап выбора критериев (параметров) по которым будут оцениваться варианты трассировки. На начальном этапе проектирования, как указано в работе [7], наиболее удобно пользоваться укрупненными характеристиками систем теплоснабжения, определение которых не требует большого числа исходных данных.

Поскольку при проектировании тепловых сетей наблюдается значительный объем работы по инженерным вычислениям, традиционные методы выбора наиболее выгодного варианта трассировки, основывающиеся на профессиональном

опыте проектировщика, являются трудоемкими и требуют значительных временных затрат. По этой причине, представляется актуальным разработка такой методики проектирования, которая основывались бы на автоматизированном методе, позволяющем сократить трудоемкость расчета, время на его проведение и его точность. Таким образом, целью данной работы, является предложение методики проектирования трассы тепловой сети, основывающейся на решении многокритериальной оптимизационной задачи. В соответствии с поставленной целью, необходимо решить следующие задачи:

- 1) определить перечень укрупненных параметров тепловой сети, отражающих ее качественные и количественные характеристики, для применения их в качестве критериев оптимальности;
- 2) исследовать существующие методики автоматизированного проектирования и выявить их недостатки;
- 3) предложить методику определения ограниченного количества наиболее выгодных вариантов трассировки тепловой сети, базирующуюся на решении многокритериальной оптимизационной задачи с помощью системного анализа.

В качестве примера, рассмотрим вариант проектирования оптимальной трубопроводной трассы тепловой сети на основании количественных характеристик, таких как тепловые потери и

материалоемкость, и качественных характеристик – надежность системы и распределение температуры у потребителя.

Материалы и методы. Некоторые характеристики (параметры) тепловой сети. Для определения температуры в любой точке водяной тепловой сети, а, следовательно, и у абонента рекомендуется применять методику, приведенную в работах [8]. При этом считается, что потери теплоты по всей длине участка не изменяются. Согласно данным положениям, может быть записано уравнение теплового баланса при транспортировании теплоты

$$G \cdot c \cdot (T_1 - T_2) = q \cdot l \cdot (I + \beta) \tag{1}$$

где G — расход теплоносителя на рассматриваемом участке, кг/ч; c — теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·°С);  $T_1$  и  $T_2$  — температуры теплоносителя в начале и конце рассматриваемого участка, °С; q — удельные тепловые потери в трубопроводе, Вт/м; l — длина участка, м;  $\beta$  — поправочный коэффициент, учитывающий потери теплоты в местных сопротивлениях и определяемый по соотношению  $\beta$ = $l_3/l$  ( $l_3$  = a/l — эквивалентная длина, м, где a — коэффициент, учитывающий долю падения давления в местных сопротивлениях по отношению к падению давления на трение).

Пользуясь равенством (1), можно получить выражение для определения температуры теплоносителя в любой точке рассматриваемого участка трубопровода [7]

$$T_2 = T_1 - (q \cdot l \cdot (l + \beta))/(G \cdot c). \tag{2}$$

Практическое применение массива значений температуры теплоносителя у каждого потребителя в качестве критерия оптимальности затруднительно. По этой причине его предлагается заменить (например) показателем, характеризующим равномерность распределения температур у каждого потребителя теплоснабжаемого района. В качестве такого показателя может быть выбрана смещенная оценка дисперсии D (или среднего выборочного отклонения  $\sigma = D^{1/2}$ ), которая определяется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left( T_{1i}^{n} - \overline{T_{1}} \right)^{2}} , \qquad (3)$$

где  $T_{Ii}$  — температура теплоносителя у потребителя;  $\overline{T}_1$  — выборочное среднее значение температуры теплоносителя, определяемое по формуле

$$\overline{T_1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} T_{1i}^n \ . \tag{4}$$

Можно считать, что, чем меньше величина смещенной оценки дисперсии, тем равномернее распределяется температура.

Материальная характеристика тепловой сети, характеризующая материалоемкость системы, определяется по формуле [7, 8]:

$$M = \sum_{i=1}^{n} D_{\text{\tiny GHI}} l_i \,, \tag{5}$$

где  $D_{\text{вні}}$  — внутренний диаметр трубопровода на участке тепловой сети;  $l_i$  — длина участка тепловой сети; n — количество участков тепловой сети.

На начальной стадии проектирования, когда гидравлический расчет не проведен, данную величину можно определить с помощью заданного закона распределения тепловой нагрузки, без детального гидравлического расчета. Таким образом, материальная характеристика участка трубопровода с постоянным расходом может быть найдена по формуле

$$M = E \cdot G^{0,38} \cdot l, \tag{6}$$

где G — расход теплоносителя в магистрали, кг/с; E — критерий определяемый по формуле E =  $A^d_{\mathscr{O}}/R_{\pi}^{0,19}$ ;  $R_{\pi}$  — удельное линейное падение давления, кг/(м²м);  $A^{\mathscr{G}}_{d}$  — коэффициент отнесенный к диаметру трубопровода, зависящий от шероховатости трубы.

Аналогично дисперсии температуры, чем меньше величина материальной характеристики, тем выгоднее тот или иной вариант трассировки.

То же самое относится и к годовым тепловым потерям, которые на начальной стадии проектирования могут определяться по приближенной зависимости

$$Q_{m.n} = q \cdot M_{yc}, \tag{7}$$

где  $M_{yc}$  — условная материальная характеристика теплосети, рассчитанная по наружной поверхности изоляции, м<sup>2</sup>; q — удельные годовые теплопотери, отнесенные к 1 м<sup>2</sup> условной материальной характеристики теплосети,  $\Gamma$ кал/(год $\cdot$ м<sup>2</sup>)

$$M_{vc} = M + 0.15 \Sigma l, \tag{8}$$

где  $\Sigma l$  – суммарная длина трубопровода, м.

$$q = 3.6 \cdot \pi \cdot k \cdot (\tau_{cp} - t_0) \cdot (1 + \beta) \cdot n \cdot 10^{-6}, \quad (9)$$

где k — коэффициент теплопередачи теплопровода с учетом толщины и материала изоляции, канала и вида грунта, отнесенный условно к наружной поверхности изоляции,  $\mathrm{Bt/(m^2.°C)}$ ;  $\tau_{cp}$  — среднегодовая температура теплоносителя, °C;  $t_0$  — среднегодовая температура грунта или окружающей среды, °C;  $\beta$  — коэффициент местных тепловых потерь; n — число часов работы тепловой сети в год.

Надежность тепловой сети принято оценивать показателем надежности, который должен быть не ниже установленного уровня, чем он выше, тем надежнее система. Таким образом, этот очередной критерий оптимизации примет вил

$$R_{cucm}(t) = \frac{Q(t)}{Q_0} = 1 - \sum_{j=1}^{j=l} \frac{\Delta Q_j}{Q_0} \frac{\omega_i}{\sum \omega_i} \left( 1 - e^{-\sum \omega_i t} \right), (10)$$

где  $Q_0$  – расчетный расход теплоты;  $\Delta Q_j$  – недоподача теплоты; Q(t) – математическое ожидание характеристики качества функционирования системы; t – время;  $\omega_i$  – параметр потока отказов.

Как указывалось в работе [5], для удобства расчетов естественно свести поиск экстремума по каждому из критериев к единообразию: поскольку большинство введенных критериев (три первых из четырех) минимизируются, критерий надежности также удобно привести к виду, при

котором производится поиск минимального значения. Наиболее простым вариантом является рассмотрение обратной величины, то есть величины  $R^{o\delta}_{cucm} = 1/R_{cucm}$ .

В то же время переход к величинам, обратным к минимизируемым, позволяет обсуждать задачу многокритериальной оптимизации с точки зрения желаемой максимизации всех таких величин. Идейно два таких подхода взаимозаменяемы, и речь может идти лишь об относительных удобствах одного из них. К таким удобствам можно отнести, например, желание обсуждать лишь ограниченные области изменения формальных параметров. Ниже, как и в работе [5], мы обсуждаем задачу одновременной максимизации нескольких параметров.

В качестве примера рассмотрим несколько (девять) вариантов трассировки двухтрубной централизованной сети теплоснабжения (рис. 1).

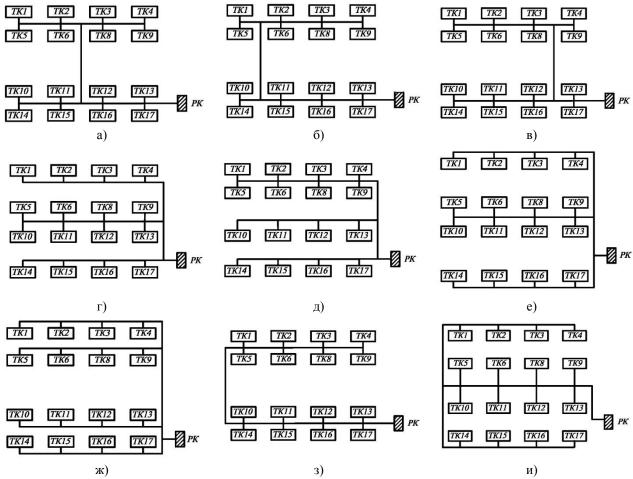


Рис. 1. Схемы рассматриваемых трассировок трубопроводов системы теплоснабжения

Исходные данные: источником теплоснабжения является районная котельная; прокладка трубопроводов бесканальная; расчетная тепловая нагрузка каждой тепловой камеры (ТК) — 25 Гкал/ч; удельное линейное падение давления — 50 Па/м; коэффициент теплопередачи — 1; среднегодовая температура теплоносителя —

60 °C; среднегодовая температура грунта – 5 °C; коэффициент местных тепловых потерь – 0,3; число часов работы тепловой сети в год – 196 час; температуры теплоносителя в начале рассматриваемого участка – 150 °C; поправочный коэффициент, учитывающий потери теплоты в местных

сопротивлениях — 1,1; теплоемкость теплоносителя — 4185 Дж/(кг.°С); коэффициент  $A^d_{\ \ g}$  — 0,0723; расчетный расход теплоты — 465 МВт; время t — 0,56.

В таблице представлены значения четырех параметров, упомянутых выше: дисперсии тем-

пературы у потребителя, материальной характеристики, тепловых потерь и показателей надежности тепловых сетей для вариантов трассировки, представленных на рисунке 1. Так же для удобства приведены значения величин, отнесенных к их максимальному значению.

Таблица 1

№ п/п	Схема	σ	M	Q	$R_{cucm}$	$R^{o\delta}_{cucm}$		σ	M	Q	$R_{cucm}$	$R^{o\delta}_{cucm}$
1	1a	3,45	498	4855	0,87	1,149		0,546	0,587	0,640	0,956	1,046
2	1б	5,32	532	5067	0,70	1,428	сенные к значению	0,843	0,627	0,668	0,769	1,300
3	1в	4,74	486	4780	0,90	1,111	енные	0,751	0,573	0,630	0,989	1,011
4	1г	4,49	644	6767	0,72	1,388	(1)	0,711	0,759	0,893	0,791	1,264
5	1д	4,15	625	6460	0,69	1,449	ы, о	0,657	0,737	0,852	0,758	1,319
6	1e	4,83	701	6854	0,72	1,388	Величины, отн максимальному	0,765	0,826	0,904	0,791	1,264
7	1ж	4,82	732	7252	0,91	1,098	Зели	0,763	0,863	0,957	1,000	1,000
8	13	4,44	606	5673	0,61	1,639	I W	0,703	0,714	0,748	0,670	1,492
9	1и	6,31	848	7576	0,65	1,538		1,000	1,000	1,000	0,714	1,400

Основная часть. Постановка формализованной задачи многокритериальной оптимизации. Решение задачи оптимизации трассы тепловой сети по нескольким критериям (параметрам) предпочтения можно осуществлять с помощью нескольких подходов, наибольшее распространение из которых получил метод нелинейного программирования [1, 2, 3, 4]. В общем виде задача многокритериальной оптимизации записывается в виде

$$min_{(x \in R)}F_1(x), ..., min_{(x \in R)}F_n(x),$$
 (11)

$$R = \{x | g_i(x) \ge 0, i = 1, k\},$$
 (12)

При решении задачи (11) — (12) важное значение имеет качественная информация о множестве частных критериев [3]. Среди методов использующих данную информацию выделяют: 1) метод лексикографического упорядочения критериев; 2) метод выделения главного критерия; 3) метод последовательных уступок; 4) метод свертывания векторного критерия; 5) метод «идеальной» точки.

В работе [3] отмечается, что для первого метода оптимизация по k-тому параметру производится после получения минимальных значений предыдущих параметров (k-i), в связи с чем, зачастую уже после оптимизации по первому или второму критерию, решение вырождается в точку, а учет оставшихся критериев не производится. Для второго метода осуществляется минимизация наиболее важного параметра, а оставшиеся не должны превышать пороговой величины, которая вычисляется с помощью специального

метода, что может привести к появлению дополнительных ошибок. Третий метод является усовершенствованным лексикографическим методом, в котором на каждом шаге преобразования вводят уступку, которая характеризует допустимое отношение, какого—либо параметра от минимального значения. Данные методы характеризуются наличием подавляющего (более важного) критерия, который зачастую трудно определить или же его и вовсе не существует.

Для пятого метода характерно наличие дополнительной информации, так называемой идеальной точки, при этом решения осуществляют по обобщенному критерию по признакам однокритериальной задачи, с условием максимального приближения к идеальному решению [1]. Однако, в связи с особенностями рассматриваемого объекта исследования (тепловой сети), задать идеальный вариант трассы, обоснованной с практической точки зрения, не представляется возможным, по этой причине его применение не целесообразно.

Отмеченные трудности применения приведенных выше методов способствовали большему распространению метода свертывания векторного критерия [2, 5]. Данный метод учитывает важность частных параметров за счет построения скалярной функции S, которая является обобщенным критерием векторного критерия F(x)

$$min_{(x \in R)}S(p, F(x)), \tag{13}$$

где  $p = (p_1, ..., p_n)$  – вектор весов частных критериев [2, 5].

Обобщенный критерий может быть свернут в функцию различного вида. В работах [1, 5] приводятся аддитивный, мультипликативный, обобщенный логический, обобщенный среднестепенной критерии. Наибольшее распространение получил аддитивный критерий

$$S_{\Sigma}(p, F(x) = \sum_{i=1}^{n} (p_i F_{i,i}(x)), \qquad (14)$$

который и будет рассматриваться в данной работе

Далее следует отметить, что определение веса каждого критерия представляет собой отдельную задачу [8–15], в которой, как правило, определяется численное значение веса критерия, даются точные численные значения, либо сравниваются друг с другом по важности отдельные параметры. При этом разные методы определения весов дают разные значения, а величина весов остается постоянной на всей области допустимых решений R.

Назначение веса критерия, как правило, осуществляется экспертом, который может не точно задать значения этой величины. В данном случае, как отмечается в работе [3], вес можно считать не контролируемым фактором, а, следовательно, использовать принцип гарантированного результата, тогда модель (13) при аддитивном критерии оптимальность примет вид

$$\min_{(x \in R)} \{ \max_{p \in Rpi} \sum_{i=1}^{n} (p_i F_i, (x)) \}, \qquad (15)$$

Если область допустимых решений  $R_{pi}$  остается постоянной, вес  $p_i$  является функцией от x, а задача многокритериальной, оптимизация принимает вид

$$\min_{(x \in R)} \{ S(p(x), F(x)) \}, \tag{16}$$

поскольку

$$p(x) = argmax_{(x \in R)} \{ S(p, F(x)) \}, \tag{17}$$

**Постановка задач.** В рамках многокритериальной оптимизации, связанной с нахождением наилучшего варианта сети, мы обсуждаем следующую формализованную задачу:

Задача 1. Из множества точек (векторов), расположенных в положительном октанте n-мерного пространства требуется выбрать точку (или точки) с наибольшей суммой

$$S = x_1 \cdot p_1 + ... + x_n \cdot p_n,$$
 (18)

где  $x_1, ..., x_n$  – координаты отдельной точки (значения различных критериев);  $p_1, ..., p_n$  – координаты весового вектора (или вектора предпочтений).

Весовой вектор обычно считается фиксированным. В то же время, его координаты могут изменяться в силу различных причин, и тогда возникает еще одна задача.

Задача 2. Описать формулами (или наглядным образом) возможные изменения оптимальной точки из заданного множества (облака) при изменениях весового вектора.

Отметим, что используя компьютерные технологии, можно организовать достаточно быстрый перебор огромных объемов информации (включающих сотни и тысячи вариантов типа различных трассировок). Это возможно, в том числе, и в задачах многокритериальной оптимизации. Желательно, тем не менее, иметь возможность сужения до разумных величин начального множества вариантов и, тем самым, исследования оптимизационных задач на более обозримых множествах, содержащих не тысячи, а, например, один или несколько десятков различных вариантов.

Некоторые приемы упрощения задачи и изучения условий оптимальности. Ниже предлагаются некоторые несложные идеи такого сужения, а также выделения областей в пространстве весовых параметров, в которых оптимальными оказываются те или иные варианты из начального множества.

Замечание о «внутренних прямоугольниках». Пусть в облаке точек имеется две интересующие нас точки  $A(x_1, ..., x_n)$  и  $B(y_1, ..., y_n)$ , и имеется неравенство  $x_1 < y_1, ..., x_n < y_n$ .

Ясно тогда, что каков бы ни был весовой вектор  $p=(p_1, ..., p_n)$  с положительными координатами, для каждой отдельной i-ой координаты в обсуждаемом n-мерном пространстве выполняется неравенство  $x_i p_i < y_i p_i$ . Но тогда и интересующие нас суммы связаны неравенством

$$S(A) < S(B). \tag{19}$$

Это означает, что точка A имеет меньшее значение суммарного критерия, чем точка B, а потому (при поиске максимума суммы (18)) точка A не может быть оптимальной в заданном облаке точек. Подчеркнем, что это утверждение остается верным при любых весах.

Наглядная трактовка этого замечания является вполне прозрачной на плоскости (в случае оптимизации по двум критериям): имея произвольную точку  $A(x_1, x_2)$  можно связать с ней прямоугольник, образованный проекциями этой точки на оси и отрезками самих осей (см. Рис. 2)

Точки, попадающие во внутренний прямоугольник, порожденный точкой A, не могут претендовать на оптимальность ни при каких весовых векторах.

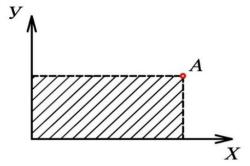


Рис. 2. Внутренний прямоугольник, порождаемый точкой первого квадрата

Аналогично, в случае числа критериев, по которым проводится оптимизация, превышающего 2, можно рассматривать многомерные внутренние параллелепипеды соответствующей размерности, отвечающие отдельным точкам из числа обсуждаемых. Внутренние точки из таких параллелепипедов не могут быть оптимальными (ни при каких весовых векторах), если вершина параллелепипеда (все координаты которой положительны) принадлежит обсуждаемому облаку заданных точек. Здесь геометрическую наглядность рассмотрений в плоскости можно заменить исследованием таблицы или матрицы характеристик. Пример обработки приведенной выше таблицы мы рассмотрим в конце статьи.

Как следствие, получаем простой наглядный способ существенного уменьшения количества точек, обсуждаемых на предмет возможной оптимальности (см. Рис. 3).

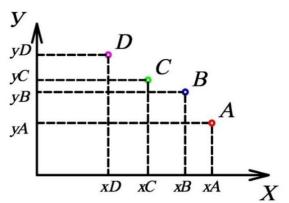


Рис. 3. Внутренние прямоугольники, порождаемые несколькими точками, выводят из обсуждений оптимальности точки, лежащие в объединении этих квадратов

Рисунок 3 показывает малое граничное множество точек, которые можно оставить для нахождения оптимальной точки. Отметим, что это «граничное» множество не зависит от весового вектора.

Сравнение двух точек в плоскости. Пусть имеется две точки (два варианта) в плоскости двух критериев. На вопрос о преимуществе одной из них перед другой при изменяющемся наборе весов имеется достаточно простой

наглядный ответ. Чтобы его сформулировать, уточним, что веса мы понимаем не в традиционной вероятностной нормировке (при которой  $\Sigma_i p_i = 1$ ), а в евклидовой, так что  $\Sigma_i p_i^2 = 1$ . При такой нормировке значение суммы (18) равно длине проекции обсуждаемой точки (вектора) A на весовой вектор p. Тогда из двух точек A и B, расположенных в первом квадрате и удовлетворяющих перекрестному условию

$$x_A < x_B, y_A > y_B$$
 (20)

на координаты, большее значение суммы (18) имеет точка с более длинной проекцией на весовой вектор. Как следствие, перпендикуляр к отрезку AB (или его продолжению), проведенный из начала координат, представляет собой компромиссное положение весового вектора, при котором обе точки A и B имеют одинаковое значение суммы (18).

Отклонение этого вектора в одну или в другую сторону от перпендикулярного к AB положения отдает приоритет в значении суммы (18) соответствующей точке (рис. 4).

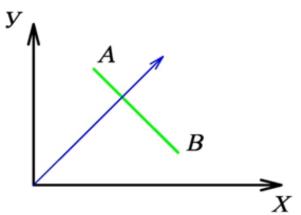


Рис. 4. Перпендикуляр к отрезку AB из начала координат делит первый квадрат на области доминирования двух точек A и B в смысле большего значения суммы (18)

Как следствие из этого простого соображения получаем следующий способ выделения в плоскости (в случае оптимизации по двум критериям) областей, обеспечивающих оптимальность точек, попадающих в них, в зависимости от расположения весового вектора.

Уточним, что, обсуждая большое, но конечное облако точек в (первом квадрате) плоскости, мы удаляем из обсуждения значительную их часть по соображениям внутренних прямоугольников. Конкретные обсуждения теперь касаются лишь граничных точек облака, являющихся вершинами некоторой выпуклой ломаной и удовлетворяющих в каждом звене ломаной перекрестному условию (20). Для такой ломаной нужно провести перпендикуляр к ее каждому звену из

начала координат. Этими перпендикулярами весь первый квадрат разбивается на угловые сектора в количестве, равном количеству вершин ломаной (т.е. количеству граничных точек облака). В каждом из секторов попадание весового вектора в конкретный k-сектор (при нумерации слева направо) означает, что оптимальной для данного набора координат весового вектора будет именно k -ая «граничная» точка при упорядочении x1< x2< ...< xk < ....<xn.

На рис. 5 показано такое разбиение первого квадрата в плоскости на секторы, отвечающие четырем отдельным граничным точкам большого исходного облака.

Уточним, что ломаная, образованная четверкой точек, содержит три звена. Соответственно к этим звеньям проведены три перпендикуляра. Они разбивают первый октант на 4 сектора. В целом для п точек возникает (n-1)-звенная ломаная, а (n-1) перпендикуляров разбивают первую четверть на п угловых секторов.

Интересно отметить также, что отдельная точка может не попасть в порождаемый ею оптимальный сектор, как это происходит на рис. 5 с точками A1 и A2.

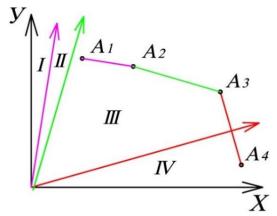


Рис. 5. Области оптимальности, соответствующие четырем точкам

#### Пример исследования Таблицы.

Допустим, что (как в этом примере) каждый из (четырех) обсуждаемых параметров нужно минимизировать. Для уменьшения количества вариантов, рассматриваемых по существу, предлагается матричное обобщение замечания о внутренних прямоугольниках.

Таблица 2 Выбор ограниченного числа вариантов трассировки при матричном обобщении

№ п/п	σ	M	Q	$R^{o\delta}_{cucm}$	№ п/п	σ	M	Q	$R^{o\delta}_{cucm}$
1	0,546	0,587	0,640	1,046	1	0,546	0,587	0,640	1,046
2	0,843	0,627	0,668	1,300	-	-	-	-	-
3	0,751	0,573	0,630	1,011	3	0,751	0,573	0,630	1,011
4	0,711	0,759	0,893	1,264	-	-	-	-	-
5	0,657	0,737	0,852	1,319	-	-	-	-	-
6	0,765	0,826	0,904	1,264	-	-	-	-	-
7	0,763	0,863	0,957	1,000	7	0,763	0,863	0,957	1,000
8	0,703	0,714	0,748	1,492	-	-	-	-	-
9	1,000	1,000	1,000	1,400	-	-	-	-	-

Смысл этого обобщения (с учетом минимизации, а не максимизации) состоит в последовательном рассмотрении всевозможных пар строк из приведенной матрицы. Если все четыре позиции в одной (первой) из двух таких строк содержат величины, строго большие соответствующих величин второй строки из рассматриваемой пары (первая строка мажорирует вторую, является для нее мажорантой), то первую строку можно исключить из поиска оптимальных вариантов.

#### Результаты и выводы.

1. Несложно убедиться, что каждая из строк с номерами 4, 5, 8 и 9 является мажорантой по отношению к строке с номером 1 нашей таблицы. Аналогично строки 2 и 6 являются мажорантами строки 3. Других мажорирований в таблице нет.

В частности, не имеет мажорант (а потому остается в списке претендентов на оптимальность) 7-я строка таблицы.

Это означает, что вместо 9 предложенных вариантов достаточно рассматривать задачу оптимизации на множестве из 3-х вариантов (приведенных в исправленной таблице). Для такого усеченного набора вариантов задача весовой оптимизации существенно упрощается.

Рассматривая линейную функцию от четырех весов

$$S = p_1 \cdot \sigma + p_2 \cdot M + p_3 \cdot Q + p_4 \cdot R$$

при фиксированных весах, легко ответить на вопрос об оптимальном варианте трассы из трех оставшихся. Несложно также определить обла-

сти 4-мерного пространства весов, гарантирующего оптимальность того или иного из этих вариантов.

Если, например, веса четырех параметров  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ,  $p_4$  имеют соотношение 1:1:1:1, то минимальное значение суммы S достигается на первом варианте. Для набора весов, пропорциональных 1:2:3:10, оптимальным является второй вариант. Третий вариант будет оптимальным при четвертом весе, значительно превосходящем первые три.

- 2. Выбранные критерии оптимальности позволяют учитывать надежность проектируемой сети, равномерность распределения температуры у потребителей, материалоемкость сети и ее возможные тепловые потери.
- 3. Разобранный метод оптимизации позволяет определить ограниченный набор вариантов трассы теплой сети, то есть отбросить заведомо невыгодные, без применения весовых значений критериев оптимальности. Это позволяет сократить время выбора наиболее выгодного решения и трудоемкость расчетов при определении веса определенного критерия, например, путем экспертных оценок.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Mel'kumov V.N., Chujkin S.V., Papshickij A.M., Sklyarov K.A. Modelling of structure of engineering networks in territorial planning of the city // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2015. № 4. C. 33–40.
- 2. Melkumov V.N., Kuznetsov I.S., Kobelev V.N. Choosing a mathematical model of heat supply network route // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2012. № 1 (13). C. 17–23.
- 3. Дилигенский Н.В., Немченко В.И., Посашков М.В. Методы системного анализа для многокритериального оценивания и повышения энергетической эффективности объектов и систем децентрализованного теплоснабжения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4. С. 949–956.
- 4. Андреев А.М., Штуца И.М. Подход к многокритериальной оптимизации на основе генетического алгоритма // Интеллектуальные системы в производстве. 2008. № 2 (12). С. 16–21.
- 5. Гвишиани Д.М., Емельянова С.В. Многокритериальные задачи принятия решений. М.: Машиностроение. 1978. 191 с.
- 6. Батищев Д.И., Шапошников Д.Е. Многокритериальный выбор с четом индивидуальных предпочтений. Н.Новгород: ИПФ РАН. 1994. 92 с.

- 7. Loboda A.V., Chuikina A.A. About the alignment design of heat supply systems on the basis of system analysis // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2020. № 3 (47). C. 35–45.
- 8. Melkumov V.N., Tulskaya S.G., Chuykina A.A., Dubanin V.Yu. Solving the multi-criteria optimization problem of heat energy transport // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. T. 1258. C. 3–10.
- 9. Чуйкина А.А. Укрупненные параметры тепловой сети при выборе оптимальной трассы трубопроводов // Наука и образование 2019. Материалы всероссийской научно-практической конференции. Мурманск. 2020. С. 323–331.
- 10. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: МЭИ, 2001. 472 с.
- 11. Чуйкина А.А., Бохан А.Р., Благовестная Е.О., Панин А.В. Многокритериальная оценка при выборе оптимальной трассы тепловой сети // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2020. №4 (21). С. 23–27.
- 12. Bürkner P., Schwabe R., Holling H. Optimal designs for the generalized partial credit model // British Journal of Mathematical and Statistical Psychology. Vol. 72, Issue 2, May 2019. Pp. 271–293.
- 13. Sasaki Y. Rationalizability in multicriteria games // International Journal of Game Theory. Vol. 48, Issue 2, 1 June 2019. Pp. 673–685.
- 14. Deng T., Fu J., Zheng Q., Wu J., Pi Y. Performance-Based Wind-Resistant Optimization Design for Tall Building Structures // Journal of Structural Engineering (United States). Vol. 145, Issue 10, 1 October 2019, Номер статьи 04019103.
- 15. Chen D.D., Lin Y.C. A Particle Swarm Optimization-Based Multi-level Processing Parameters Optimization Method for Controlling Microstructures of an Aged Superalloy During Isothermal Forging // Metals and Materials International. Vol. 25, Issue 5, 6 September 2019, Pp. 1246–1257.
- 16. Tkachuk A., Pilipaka L., Azizova A. Optimization of city water supply networks on their structural and functional analysis base // International Journal of Engineering and Technology (UAE). 2018. Vol.. 7. Issue 3. Pp. 680–685.
- 17. Terekhov S.M., Nemtinov V.A., Kornilov K.S. Model of the Connecting Optimal Number of Heat Consumers // Modeling and Analysis of Information Systems. 2018. Issue 25(2). Pp. 217–231.
- 18. Stennikov V., Mednikova E., Postnikov I., Penkovskii A. Optimization of the effective heat supply radius for the district heating systems // Environmental and Climate Technologies. 2019. Vol. 23. Issue 2. C. 207–221.

Информация об авторах

**Чуйкина Анастасия Александровна**, ассистент кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела. E-mail: a.a.chuykina@mail.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронежская обл., г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

**Лобода Александр Васильевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной математики и механики. E-mail: lobvgasu@yandex.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронежская обл., г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

**Сотникова Ольга Анатольевна**, доктор технических наук, заведующая кафедрой проектирования зданий и сооружений им. Н.В. Троицкого. E-mail: hundred@vgasu.vrn.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронежская обл., г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

Поступила 26.01.2021 г.

© Чуйкина А.А., Лобода А.В., Сотникова О.А., 2021

# \*Chuykina A.A., Loboda A.V., Sotnikova O. A.

Voronezh State Technical University \*E-mail: a.a.chuykina@mail.ru

## DESIGN OF THE OPTIMAL PIPELINE ROUTE OF THE HEAT NETWORK

Abstract. The choice of the optimal pipeline route is one of the fundamental tasks in the design of heat supply systems, the analytical solution of which is almost impossible due to the presence of many interdependent factors affecting the final solution. The article considers one of the possible methods for determining a limited number of the most profitable options for tracing a heat network, based on solving a multi-criteria optimization problem using system analysis. The proposed method provides a limited number of profitable tracing options in the absence of the need for expert evaluation of several optimality criteria. The paper presents the main enlarged parameters of the heat network that allow to solve the optimization problem under consideration at the initial stage of designing heat supply systems, in the absence of a complete constructive calculation of the schemes under consideration and taking into account qualitative and quantitative optimization indicators. The results of limiting the obviously unprofitable options of the pipeline route are presented in graphic form for clarity. It is proposed that in the presence of a large number of optimality criteria, the geometric visibility of the considerations in the plane should be replaced by the study of a table or matrix of characteristics. The essence of this study consists in the sequential consideration of all possible pairs of rows from the compiled matrix.

**Keywords:** heat networks, multi-criteria optimization, system analysis, heat supply, pipelines.

## REFERENCES

- 1. Mel'kumov V.N., Chujkin S.V., Papshickij A.M., Sklyarov K.A. Modelling of structure of engineering networks in territorial planning of the city. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2015. Issue 4. Pp. 33–40.
- 2. Melkumov V.N., Kuznetsov I.S., Kobelev V.N. Choosing a mathematical model of heat supply network route. Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2012. Issue 1. Pp. 17–23.
- 3. Diligensky N. V., Nemchenko V. I., Pososhkov M. V. Methods of system analysis for multi-criteria evaluation and improvement of energy efficiency of objects and systems of decentralized heat supply [Metody sistemnogo analiza dlya mnogokriterial'nogo ocenivaniya i povysheniya energeticheskoj effektivnosti ob"ektov i sistem decentralizovannogo teplosnabzheniya]. Proceedings of the

- Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2011. Vol. 13. Issue 4. Pp. 949–956. (rus)
- 4. Andreev A.M., Shtutsa I. M. Approach to multi-criteria optimization based on a genetic algorithm [Podhod k mnogokriterial'noj optimizacii na osnove geneticheskogo algoritma]. Intelligent systems in production. 2008. No. 2 (12). pp. 16–21. (rus)
- 5. Gvishiani D.M., Emelyanova S.V. Multicriteria problems of decision-making [Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya reshenij]. Moscow: Mashinostroenie. 1978. 191 p. (rus)
- 6. Batishchev D.I., Shaposhnikov D.E. Multicriteria choice taking into account individual preferences [Mnogokriterial'nyj vybor s chetom individual'nyh predpochtenij]. N. Novgorod: IPF RAS. 1994. 92 p. (rus)
- 7. Loboda A.V., Chuikina A.A. About the alignment design of heat supply systems on the basis of

system analysis. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2020. Issue 3 (47). Pp. 35–45.

- 8. Melkumov V.N., Tulskaya S.G., Chuykina A.A., Dubanin V.Yu. Solving the multi-criteria optimization problem of heat energy transport. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Issue. 1258. Pp. 3–10.
- 9. Chuykina A. Integrated thermal parameters of the network when choosing the optimal route for the pipeline [Ukrupnennye parametry teplovoj seti pri vybore optimal'noj trassy truboprovodov]. Science and education 2019. Materials of the All-Russian scientific and practical conference. Murmansk. 2020. Pp. 323–331. (rus)
- 10. Sokolov, E.Ya. Heat supply and heat networks [Teplofikatsiya i teplovye seti]. M.: MEI. 2001, 472 p. (rus)
- 11. Chuikina A. A., Bohan A. R., Blagovestnaya E. O., Panin A.V. Multi-criteria assessment when choosing the optimal route of the thermal network [Mnogokriterial'naya ocenka pri vybore optimal'noj trassy teplovoj seti]. Urban planning. Infrastructure. Communications. 2020. Issue. 4 (21). Pp. 23–27. (rus)
- 12. Bürkner P., Schwabe R., Holling H. Optimal designs for the generalized partial credit model // British Journal of Mathematical and Statistical

- Psychology. Vol. 72, Issue 2, May 2019. Pp. 271–293.
- 13. Sasaki Y. Rationalizability in multicriteria games. International Journal of Game Theory. Vol. 48, Issue 2, 1 June 2019. Pp. 673–685.
- 14. Deng T., Fu J., Zheng Q., Wu J., Pi Y. Performance-Based Wind-Resistant Optimization Design for Tall Building Structures. Journal of Structural Engineering (United States). Vol. 145, Issue 10, 1 October 2019, 04019103.
- 15. Chen D.D., Lin Y.C. A Particle Swarm Optimization-Based Multi-level Processing Parameters Optimization Method for Controlling Microstructures of an Aged Superalloy During Isothermal Forging. Metals and Materials International. Vol. 25, Issue 5, 6 September 2019, Pp. 1246–1257.
- 16. Tkachuk A., Pilipaka L., Azizova A. Optimization of city water supply networks on their structural and functional analysis base. International Journal of Engineering and Technology (UAE). 2018. Vol. 7. Issue 3. Pp. 680–685.
- 17. Terekhov S.M., Nemtinov V.A., Kornilov K.S. Model of the Connecting Optimal Number of Heat Consumers. Modeling and Analysis of Information Systems. 2018. Issue 25(2). Pp. 217–231.
- 18. Štennikov V., Mednikova E., Postnikov I., Penkovskii A. Optimization of the effective heat supply radius for the district heating systems. Environmental and Climate Technologies. 2019. Vol. 23. Issue 2. Pp. 207–221.

Information about the authors

**Chuykina, Anastasia A.** Assistant. E-mail: a.a.chuykina@mail.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya Str., 84.

**Loboda, Alexander V.** DSc, Professor. E-mail: lobvgasu@yandex.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya Str., 84.

**Sotnikova Olga A.** DSc, Head of the Department of Design of Buildings and Structures named after N. V. Troitsky. Email: hundred@vgasu.vrn.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya Str., 84.

Received 26.01.2021

## Для цитирования:

Чуйкина А.А., Лобода А.В., Сотникова О.А. Проектирование оптимальной трубопроводной трассы тепловой сети // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 27–37. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-28-37

#### For citation:

Chuykina A.A., Loboda A.V., Sotnikova O.A. Design of the optimal pipeline route of the heat network. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 2. Pp. 28–37. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-28-37

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-38-48

# <sup>1</sup>Шашин А.В., <sup>1,\*</sup>Шепс Р.А., <sup>2</sup>Семиненко А.С., <sup>2</sup>Минко В.А.

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет <sup>2</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова \*E-mail: romansheps@yandex.ru

# МЕСТНАЯ ВЫТЯЖНАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ С ЭЖЕКТИРОВАНИЕМ ВЗРЫВООПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ И РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ОЧИЩЕННОГО ВОЗДУХА

Аннотация. Системы вытяжной вентиляции на промышленных предприятиях и объектах с применением вредных веществ в значительной мере определяют воздухообмен на рабочих местах для обеспечения нормируемых санитарно-гигиенических условий и эксплуатационных затрат. Особую значимость эффективного воздухообмена в таких помещениях представляет местная вытяжная вентиляция взрывоопасных вредных веществ, поскольку к их локализации, отсосу и транспортированию предъявляются повышенные требования. В работе представлены результаты аналитических и экспериментальных исследований режима работы комплексного местного вытяжного устройства с газовым эжектором для отсоса из укрытий взрывоопасных вредных химических веществ, обеспечивающего их эффективную локализацию, очистку и рециркуляцию воздуха. Приведены граничные условия и допущения расчета характеристик процессов эжекции газовых потоков, очистки технологических выбросов и рециркуляции очищенного газового потока, определенные на основе анализа ранее выполненных исследований и экспериментальных работ. Определены условия рациональных соотношений параметров устройства отсоса источников вредных выделений веществ, параметров эжектора и устройства очистки выбросов, при которых достигается экономическая и экологическая эффективность применения установки и исключается взрывоопасная ситуация на химически опасных предприятиях и объектах.

**Ключевые слова:** местная вытяжная вентиляция, взрывоопасные вещества, эжектор, рециркуляция, энергоэффективность систем вентиляции, расчет эжекции.

Введение. Системы вытяжной вентиляции на промышленных предприятиях и объектах с применением вредных веществ в значительной мере определяют воздухообмен на рабочих местах для обеспечения нормируемых санитарногигиенических условий и эксплуатационных затрат [1–5]. Особую значимость эффективного воздухообмена в таких помещениях представляет местная вытяжная вентиляция взрывоопасных вредных веществ, поскольку к их локализации, отсосу и транспортированию предъявляются повышенные требования [6-9]. В выбрасываемом вентиляционном выбросе в атмосферу их содержание не должно превышать 30 % нижнего концентрационного предела взрываемости (НКПВ) [6], а на рабочих местах в производственном помещении – не более 10 % [1].

Главными факторами, определяющими расход местного вытяжного и приточного воздуха, являются конструктивная схема отсоса взрывоопасных вредных веществ (ВВВ) из технологического источника и средства их удаления, при которых сочетания неблагоприятных воздействий производственных и случайных факторов не приведут к возникновению взрывоопасной ситуации, подтверждение которых желательно с использованием CFD моделирования [10–11].

Для предотвращения взрыва транспортируемой газовой смеси применяются вентиляторы во

взрывобезопасном исполнении для многократного разбавления ВВВ у места их образования с подсосом воздуха из помещения. Однако газовые эжекторы являются наиболее надежными, поскольку не имеют вращающихся элементов в газовом тракте и способны обеспечить производительность отсоса, во много раз превышающую производительность используемого вентилятора для выработки активного газа. Ограниченное их применение обусловлено преимущественно сравнительно меньшим, в 1,5-2 раза, коэффициентом полезного действия по сравнению с вентилятором. Повысить к.п.д. газового эжектора возможно за счет применения вместо вентилятора компрессора с давлением до 1 МПа, однако в реальных условиях это не всегда осуществимо. Находят применение вихревые вакуумные насосы, работа которых основана на принципе работы трубки Ранка [12], однако для их работы также требуется давление воздуха более 0,2 МПа.

Кроме этого, средства локализации и удаления ВВВ должны обеспечить безопасность при отсосе паров веществ, способных конденсироваться в холодный период года в воздуховодах или в выбросной шахте, а также при вентилировании канализационных и газовых систем. Наиболее эффективными являются закрытые и полузакрытые местные отсосы, обладающие ря-

дом преимуществ по сравнению с другими видами, среди которых наиболее значимыми являются:

-значительная локализация выделяемых паров вредных веществ (BB);

-обеспечивается строго направленное перемещение объема BB;

-достигаются наименьшие удельные энергетические затраты на удаление BB;

-снижается расход приточного воздуха, поскольку подобные укрытия позволяют с высокой эффективностью улавливать выбросы ВВ из источника.

Несмотря на протекание подавляющего числа технологических процессов вне области воспламенения ВВВ, возможна вероятность возникновения условий для образования взрывоопасных концентраций и поэтому при обращении с ними требуются высоконадежные системы удаления и обезвреживания технологических выбросов [6].

Для обеспечения безопасного удаления ВВВ используются газовые эжекторы, обладающие способностью в несколько раз увеличивать расход отсасываемой газовоздушной смеси с укрытий выделения ВВВ относительно производительности вентилятора, позволяющие достичь значительных разрежений. Ранее выполненные

исследования [1–3] и практическая их реализация применения газовых эжекторов были направлены на достижение на выходе из эжектора концентрации ВВВ в воздухе ниже нижнего концентрационного предела их взрываемости с воздухом.

Целью данной работы является определение состава и режима работы эжекторно-очистной установки с рециркуляцией очищенных вентиляционных выбросов, обеспечивающей снижение энергетических затрат на эксплуатацию местной вытяжной и приточной вентиляции при повышенной безопасности отвода ВВВ.

Методы исследования. Для достижения снижения удельного энергопотребления при работе местной вытяжной и общеобменной вентиляции в производственном помещении были выполнены теоретические исследования и схемные решения по обеспечению снижения выделения из источника ВВВ, эффективного и безопасного отсоса ВВВ, обезвреживанию химически опасных выбросов и рециркуляцию очищенных выбросов для снижения отсоса воздуха из помещения.

Принципиальная схема такой комплексной установки и характер изменения параметров газовоздушной смеси на различных участках газового тракта установки представлена на рис. 1.

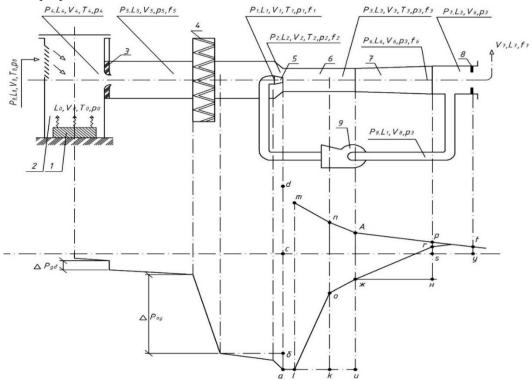


Рис. 1. Эжекторно-очистная установка локализации взрывоопасных выделений вредных веществ, их обезвреживания и рециркуляции очищенных выбросов

1 – источник выделения взрывоопасных веществ, 2 – укрытие, 3,8 – дросселирующие устройства, 4 – очистное устройство, 5 – сопловой насадок активного газа, 6 - смесительная камера, 7 – диффузор, 9 – вентилятор

Приняты следующие обозначения параметров: P – давление, L – расход, V – скорость, T –

температура,  $\rho$  — плотность вентиляционного воздуха, f — площадь сечения; нижние индексы: в —

параметры воздуха, поступающего в укрытие, 0 – параметры конвективного потока в укрытии источника ВВВ, 1 – параметры на выходе из насадка эжектора, 2 – перед смесительной камерой эжектора, 3 – на выходе из камеры эжектора, 4 – на выходе из диффузора, 5 – на выходе из укрытия (перед очистным устройством), 7 – смесь, поступающая в окружающую среду, 8 – очищенная смесь, поступающая в вентилятор, следует отметить, что  $V_3$  – скорость после завершения смешения,  $V_3$  скорость смешиваемых потоков в начале смесительной камеры, при этом  $V_3$  >  $V_3$ .

На рис.1 введены следующие обозначения эпюры давления газовых потоков:

 $\Delta P_{\partial p}$  — гидравлическое сопротивление дросселирующего устройства;  $\Delta P_{\partial y}$  — гидравлическое сопротивление очистного устройства; c-d — полное давление, развиваемое вентилятором; (l-m) — динамическое давление активного и отсасываемого газов на участке их смешивания, равное  $\rho_3 \cdot (V_3^{'})^2/2$ ;  $(a-\delta)$  — динамическое давление поступающего отсасываемого газа в смесительную камеру и создающее дополнительное разрежение на входе в смесительную камеру, равное  $\rho_2 \cdot (V_2)^2/2$ ;  $(u-\varkappa c)$  — повышение статического давления по длине смесительной камеры, равное

$$\Delta P_{cM} - \rho_3 \cdot V_3 (V_3' - V_3) - \xi \cdot \rho_3 \cdot V_3' / 2;$$

 $(n-\varkappa c)$  — величина динамического давления на выходе из смесительной камеры, равная  $P_{c_M}=\rho_3\cdot V^2{}_3/2;$  (h-r) — повышение статического давления в диффузоре, равное  $\Delta P_{\partial u \phi}=(1-\xi_{\mu u \phi})\cdot \rho_3\cdot V^2{}_3/2;$  (a-c) — величина разрежения у среза сопловой насадки.

**Основная часть.** Способность эжектора создавать значительное разрежение при отсосе газа позволяет на его входе применить очистное

устройство с эффективностью, достаточной для рециркуляции очищенной газовой смеси.

Для эффективного побуждения отсоса ВВВ с применением энергетически эффективной эжекторно-очистной установки потребовалась разработка математических зависимостей, позволяющих увязать характеристики процессов эжектирования газовых потоков, очистки технологических выбросов и рециркуляции очищенного газового потока. Для этого необходимо было определить ограничения и допущения при определении их параметров. Такими граничными условиями, определенных на основе анализа ранее выполненных исследований и экспериментальных работ, являются следующие положения.

- 1. В системе локализующей вентиляции скорость поступающего воздуха в укрытие через проем должна быть равна или больше минимальной скорости, препятствующей выносу вредностей из укрытия.
- 2. В укрытии должны реализоваться такие скорости воздуха над поверхностью вещества и разрежения при отсосе ВВВ, которые не интенсифицировали бы процесс испарения ВВВ с их источника. Изменение удельной скорости парообразования веществ  $m_n$ ,  $\kappa z/m^2 c$ , может быть определено по зависимости [8]:

$$m_n = 10^{-6} \cdot k_u \cdot P_s \cdot \sqrt{M} \,, \tag{1}$$

где M — молекулярная масса испаряющегося вещества;  $P_s$  — давление насыщенного пара, кПа;  $k_u$  — коэффициент испаряемости вещества, зависящий от скорости воздушного потока над поверхностью ВВВ или его раствором. Значения коэффициента  $k_u$  при различных температурах испаряющегося вещества приведены в таблице 1 [8].

Таблица 1 Значения коэффициента при различных температурах испаряющегося вещества

Скорость воздуха, $V_{s}$ , $M/c$	Коэффициент испаряемости $k_u$ при температурах, °C:						
	10	15	20	30	35		
0	1	1	1	1	1		
0,1	3,0	2,6	2,4	1,8	1,6		
0,5	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2		
1,0	10	8,7	7,7	5,6	4,6		

3. Влияние величины разрежения на испаряемость вредного вещества определяется коэффициентом испарения  $k_p$ , зависящим от давления паров на поверхности испарения  $P_{st}$  и разрежения в укрытии  $P_p$ . Осредненное значение коэффициента испарения  $k_p$ ,  $\kappa \epsilon / M^2 \cdot v$  по экспериментальным данным [12] приведено в таблице 2.

Полученные данные свидетельствуют о преимущественном влиянии скорости воздуха над поверхностью испарения по сравнению с влиянием создаваемого разрежения в укрытии при отсосе газа эжектором, поскольку испаряемость существенно зависит от разности между давлением паров на поверхности испаряющегося вещества и на удалении от неё.

Температура Коэффициент Температура Скорость Давление окружа-Температура веокружающей удельного испаиспарения ведвижения ющей среды, щества, °С щества, °С среды, °С воздуха, м/с мм. рт. ст. рения,  $\kappa \epsilon / M^2 \cdot q$ 20 1,7 750 2,2 20 0,7 750 18 18 1,6 750 17 16 0,7 1,5 70 25 20 0,0 650 2,0 30 20 0,0 550 2,8 40 20 0,0 460 3,5 20 7,2 40 0,0 370 20 1,9 750 10 6,0 18 18 1,7 750 8,0 15 20 650 25 16 0,0 460 220 16 20 0,0

0,0

Таблица 2 Осредненное значение коэффициента испарения экспериментальным данным

4. Скорость конвективного (теплового) потока газа из источника выделения ВВВ в укрытии и поток газовой смеси не должны быть существенно трансформированы поступающим в укрытие воздухом из помещения. Их можно определить по выражениям [15]:

16

$$V_o = 0.136(Q/z)^{1/3}, \, \text{m/c}$$
 (2)

20

$$L_o = 19(Q/z^5)^{1/3}, \, M^3/c,$$
 (3)

где Q ,  $\kappa \kappa a n/q$ , — выделяемый источником тепловой поток, z, m, — расстояние от поверхности источника BBB.

5. Скорость поступающего воздуха для большинства видов укрытий составляет  $0.7 - 1.5 \ m/c$ . Поступающий расход воздуха в проем укрытия источника выделения BBB должен удовлетворять определенным требованиям, к примеру, при окрасочных работах [8] должен соответствовать условиям:

$$L_o \ge \sqrt[3]{0.1Q \cdot h \cdot F^2} , \qquad (4)$$

$$L_o \ge \frac{2 \cdot m_o \cdot k}{C_{HK\Pi B}} , \qquad (5)$$

425

где  $m_o$  — массовый расход выделяющихся ВВВ,  $\varepsilon/u$ ,  $C_{HK\Pi B}$  — нижний концентрационный предел взрываемости вещества,  $\varepsilon/m^3$ , коэффициент k=2 при температуре ВВВ  $t \le 90$  °С и k=5 при t=200 °С. Для других веществ коэффициент t=200 иным.

370

- 6. При одновременном выделении в укрытии нескольких взрывоопасных веществ объем воздухопритока определяется по веществу с наименьшей температурой взрываемости [4].
- 7. При установлении режима воздухообмена в укрытии следует учитывать влияние температуры на скорость восходящих потоков ВВВ. В таблице 3 приведены значения скорости восходящих потоков  $V_z$  в зависимости от расстояния до поверхности выделения тепловых потоков [4].

Таблица 3 Зависимость скорости восходящих потоков от расстояния до поверхности выделения тепловых потоков

Высота, г, м	Скорость восходящих потоков $V_o$ , м/с, при температуре источника, ${}^{o}$ С:						
	20	30	40	50	60	70	80
0,05	0,3	0,34	0,4	0,43	0,45	0,5	0,67
0,15	0,34	0,38	0,45	0,5	0,55	0,6	0,74
0,25	0,38	0,43	0,5	0,56	0,6	0,68	0,8
0,35	0,4	0,46	0,54	06	0,66	0,73	0,86
0,45	0,4	0,46	0,55	0,63	0,7	0,77	0,9
0,55	0,36	0,45	0,57	0,66	0,73	0,8	0,93
0,65	0,34	0,44	0,58	0,68	0,75	0,82	0,96
0,75	0,32	0,44	0,58	0,69	0,77	0,85	0,98

Из приведенных данных следует, что температура источника определяет скорость подъема вредных выделений, градиент которой увеличивается с удалением от поверхности источника. Горизонтальная составляющая скорости воздуха, подтекающей к факелу ВВВ, равна [4]:

$$V_x = 0.026/r \cdot (Q/z^2)^{1/3}, \tag{6}$$

где r — радиус источника, M, Q — тепловой поток источника,  $\kappa \kappa \alpha n/c$ .

8. Для обеспечения рекомендуемой скорости поступления воздуха в укрытие  $V_6$  (см. п. 5) скорость отсоса смеси эжектором из укрытия  $V_4$  определяется зависимостью [4]:

$$\frac{V_{_{g}}}{V_{_{4}}-V_{_{g}}}=0,8\cdot(a/A)^{-1,4}$$
 при  $a/A\leq 2$ 

И

$$\frac{V_{_{g}}}{V_{_{4}}-V_{_{e}}}=0.8\cdot(a/A)^{-1.7}$$
 при а/A> 2, (7)

где, a — расстояние от воздушного проема укрытия до отверстия отсоса смеси,  $A = F/\Pi$  — гидравлический радиус отверстия отсоса из укрытия.

9. Поступающий в укрытие воздушный поток не должен нарушать факел выделения ВВВ, поэтому расстояние оси входной щели проема должно быть на расстоянии от поверхности источника  $h_o$  не менее высоты разгона струи в поджатом состоянии, равного двум эквивалентным диаметрам поверхности источника ВВВ [4]. Высота факела в поджатом с парами выделяющихся веществ над поверхностью испарения составляет 50...200 *мм* при температуре 20–50 °C, на больших высотах факел начинает размываться.

Предпочтительней является применение щелевой подачи воздуха в укрытие с расходом

$$L_{\scriptscriptstyle 6} \ge 473 \cdot l \cdot a \cdot V_{\scriptscriptstyle 6}^2 / V_{\scriptscriptstyle 4} \,, \tag{8}$$

$$L_1 \cdot \rho_1 V_1 + L_2 \cdot \rho_2 \cdot V_2 - (L_1 + L_2) \rho_3 V_3 = P_3 f_3 - P_1 f_1 - P_2 f_2 . \tag{10}$$

В смесительной камере максимальная скорость газа, реализуемая в области интенсивного смешивания активного и отсасываемого газов,  $V_{3}^{1}$  по мере стабилизации потока скорость снижается до значения  $V_3$  и при этом будет происходить повышение давления на величину  $\Delta P_{cm} = (1 \xi_{\kappa}$ )· $V_3$ ·(  $V_3^1 - V_3$ ) $\rho_3$ , где  $\xi_{\kappa}$  – коэффициент потерь в камере смешения. В диффузоре также будет происходить повышение давления на величину  $\Delta P_{\partial u\phi} = (1 - \xi_{\partial u\phi}) \cdot \rho_3 V_3^2 / 2$ , где  $\xi_{\partial u\phi}$  – коэффициент потерь в диффузоре. С учетом потребного разрежения для преодоления сопротивлений дросселя  $1 - \Delta P_{\partial pl}$ , очистного устройства –  $\Delta P_{oy}$  и создания разрежения в укрытии –  $(P_6 - P_4)$  общее повышение давления с учетом превышения давления перед выбросом расхода смеси  $L_7$  из эжекторнопри обеспечении скорости струи, не разрушающей разгонную часть факела ВВВ,

$$V_{y} \le \frac{3.7 \cdot V_{s} \cdot \sqrt{b}}{\sqrt{y}} \tag{9}$$

при критерии Архимеда:

$$Ar = \frac{g \cdot y \cdot (T_o - T_e)}{V_e^2 \cdot T_o} \ge 0.884$$

где l — длина щели, m;  $V_{e}$  — скорость в проеме укрытия, m/c;  $V_{4}$  — скорость газа в отсасывающем отверстии укрытия, m/c; b — ширина щели, m; y — расстояние от отверстия поступления воздуха в укрытие до оси факела выделения ВВВ;  $T_{o}$  — температура источника выделения ВВВ, K;  $T_{e}$  — температура входящего воздуха, K.

Представленные математические зависимости, описывающие основные газодинамические процессы формирования выбросов в укрытии, их эжектирование и рециркуляцию, основаны на базовых уравнениях количества движения [13–15], баланса энергетических потоков [15–16] и баланса давлений в замкнутой системе с учетом исследуемой схемы эжекторно-очистной установки [17–18].

Уравнение количества движения газового потока для данной установки имеет вид:

очистной установки над атмосферным давлением –  $\Delta P_{\partial p2} = (P_7 - P_6)$  должно быть равно  $\Delta P_3 = \Delta P_{cM} + \Delta P_{\partial u\phi} + \Delta P_{\partial p2}$ . (11)

Плотность смеси в укрытии равная  $\rho_{\rm \scriptscriptstyle CM} = \frac{\rho_{\rm \scriptscriptstyle G} + L_{\rm \scriptscriptstyle o} \, / \, L_{\rm \scriptscriptstyle G} \cdot \rho_{\rm \scriptscriptstyle o}}{1 + L_{\rm \scriptscriptstyle o} \, / \, L_{\rm \scriptscriptstyle G}} \, , \ \rm гдe \ L_{\rm \scriptscriptstyle o} - \ \rm конвективный \ по-$ 

ток ВВВ. Плотность газа в смесительной камере будет равна  $\rho_3 = \frac{\rho_2 + L_2 \, / \, L_1 \cdot \rho_1}{1 + L_2 \, / \, L_1} \cdot$ 

Полное давление, развиваемое побудителем, должно быть не менее полного сопротивления газового тракта перед смесительной камерой установки и обеспечения превышения давления перед дросселем над атмосферным давлением с учетом повышения давления в смесительной камере и диффузоре, то есть:

$$P_{ln} = (1 + \xi_{H}) \rho_{1} \cdot V_{1}^{2} / 2 - \Delta P_{\partial pl} - \Delta P_{\partial y} + \rho_{2} \cdot V_{2}^{2} / 2 + \Delta P_{\partial p2}, \tag{12}$$

где  $\xi_{H}$  — коэффициент потерь давления в сопловом насадке.

Следовательно, развиваемое давление вентилятором должно преодолеть сопротивление дросселя на выходе из укрытия -  $\Delta P_{\partial p1}$ , сопротивление очистного устройства -  $\Delta P_{\partial y}$ , потерю давле-

ния, обусловленную взаимодействием смешиваемых двух упругих тел за счет их удара —  $\Delta P_{cm}$ , создания разрежения в укрытии для предотвращения утечек BBB в помещение и обеспечить превышение давления  $P_7$  над давлением окружающей среды.

Таблица 4

Для составления уравнения баланса энергии введем ряд определений.

Энергия в выходном сечении насадки с учетом преодоления сопротивлений дроссельного и очистного устройств, создания движения отсасываемой газовой смеси и разрежения в укрытии —  $(Pe-P_4)$  равна:

$$E_1 = L_1(\rho_1 \cdot V^2_1/2 - \rho_2 \cdot V^2_2/2). \tag{13}$$

Энергия, затрачиваемая на преодоление сопротивлений перед эжектором:

$$E_2 = L_2[\Delta P_{\partial p1} + \Delta P_{oy} + (P_6 - P_4)]. \tag{14}$$

Энергия, затрачиваемая в смесительной камере и теряемая в диффузоре при коэффициентах потерь в них  $\xi_{\text{см}}$ ,  $\xi_{\text{диф}}$ , обозначив  $L_{1+}$   $L_2 = L_3$ :

$$E_{\kappa.\partial.} = (\xi_{cM} + \xi_{\mu} + \xi_{\mu}) L_3 \cdot \rho_3 \cdot V^2 / 2.$$
 (15)

Потеря энергии при смешивании потоков за счет удара активного газа и отсасываемого:

$$E_{cM} = L_1 \cdot \rho_1 (V^2_1 - V^2_3) / 2 + L_2 \cdot \rho_2 (V^2_2 - V^2_3) / 2. \tag{16}$$

Энергия, теряемая во всасывающем воздуховоде вентилятора:

$$E_{ec} = (L_3 - L_7) \cdot P_7 + L_1 \cdot \rho_3 \cdot V^2_8 / 2. \tag{17}$$

Уравнение баланса энергии для исследуемой схемы газовых потоков имеет вил:

$$L_{1}[\rho_{1}\cdot V^{2}_{1}/2 - \rho_{2}\cdot V^{2}_{2}/2] = L_{2}[\Delta P_{\partial p_{1}} + \Delta P_{oy} + (P_{6} - P_{4})] + (\xi_{cM} + \xi_{\mu\nu\phi}) \cdot L_{3} \cdot \rho_{3} \cdot V^{2}_{3}/2 + L_{1} \cdot \rho_{1}(V^{2}_{1} - V^{2}_{3})/2 + L_{2} \cdot \rho_{2}(V^{2}_{2} - V^{2}_{3})/2 + (L_{3} - L_{7}) \cdot (P_{7} - P_{6}) + L_{1} \cdot \rho_{3} \cdot V^{2}_{8}/2.$$

$$(18)$$

Скорость газа в смесительной камере определяется по зависимости [6]

$$V_{3} = 1.41 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{\partial p1} + \Delta P_{oy} + (P_{g} - P_{4})}{\eta_{\partial u\phi} \cdot \rho_{3} - (n_{9\phi})^{2} \cdot \rho_{2}}}, \quad (19)$$

где  $n_{3\phi}$  - наиболее выгодное значение отношения скоростей  $n_{3\phi} = V_2/V_3$ , которые представлены в таблице 4 в зависимости от отношения  $\beta = L_2/L_1$ . В ней также представлены зависимости от величины  $\beta$  наиболее предпочтительные отношения площадей сопловой насадки  $f_1$ , площади проходного сечения отсасываемого газа  $f_2$  и площади

смесительной камеры  $f_3$ , а также отношение скоростей газа на входе в смесительную камеру и на выходе из неё  $V_2/V_3$ . Приведенные в таблице 4 данные соответствуют наиболее эффективному к. п. д. смесительной камеры и диффузора, равных  $\eta_{\scriptscriptstyle CM}=0.85,\;\eta_{\scriptscriptstyle \partial u\phi}=0.85\;[8].$ 

Знание площади поперечного сечения смесительной камеры позволяет определить по диаметру камеры  $d_3$  длину диффузора  $l_{\partial u \phi} = (6-8) \ d_3$ , приняв угол раскрытия образующих диффузора  $\alpha = 8-10$  °.

Предпочтительные режимные параметры установки

β	0,5	0,8	1,0	2,0	4,0	6,0	10
$n_{i\phi}$	0,46	0,526	0,551	0,61	0,664	0,717	0,75
$f_3/f_2$	1,38	1,18	1,1	0,955	0,87	0,835	0,825
$f_3/f_1$	2,19	2,83	3,28	5,76	12,1	19,8	39,81
$V_2/V_3$	0,52	0,585	0,613	0,688	0,736	0,767	0,793

Скорость газа на выходе из соплового насадка равна:

$$V_1 = V_3 [1 + \beta (1 - V_2/V_3)]. \tag{20}$$

Статический коэффициент полезного действия эжектора в составе рассматриваемой установки равен:

$$\eta_{cm} = \frac{L_2 \left[ \Delta P_{\partial pl} + \Delta P_{oy} + (P_e - P_4) + \Delta P_7 \right]}{L_1(\rho_1 \cdot V_1^2 / 2 - \rho_2 \cdot V_2^2 / 2)}. \quad (21)$$

Из зависимости (21) следует, что определяющим фактором, влияющим на достигаемый коэффициент полезного действия, является гидравлическое сопротивление очистной установки, поэтому при выборе способа очистки выбросов от химически вредных веществ следует это учитывать. Разница давлений  $P_7$  -  $P_8$  должна быть минимальной, но одновременно обеспечивать выброс расхода смеси из установки в атмосферный воздух  $L_7$ , равный поступившему воздуху в укрытие  $L_6$ .

**Результат.** При использовании разработанного алгоритма на основе приведенных выше зависимостей полученные характеристики эжекторно-очистной установки, представленные на рис. 2-4, позволяют для различных режимов работы определить наиболее рациональное решение.

Экономическая эффективность эжекторноочистной установки с рециркуляцией очищенной смеси не может определяться только коэффициентом полезного действия газового эжектора. Следует учитывать снижение потребляемой энергии за счет снижения требуемой величины приточного воздуха на величину уменьшенного выброса в помещение ВВВ из укрытия и уменьшенного потребления отсасываемого воздуха из помещения в укрытие за счет внедрения рециркуляции воздуха [19-21].

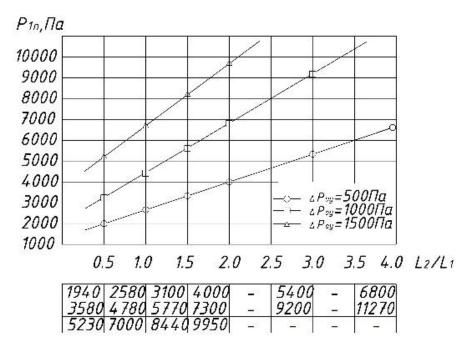


Рис. 2. Зависимость полного давления вентилятора от отношения расходов отсасываемого и активного газа

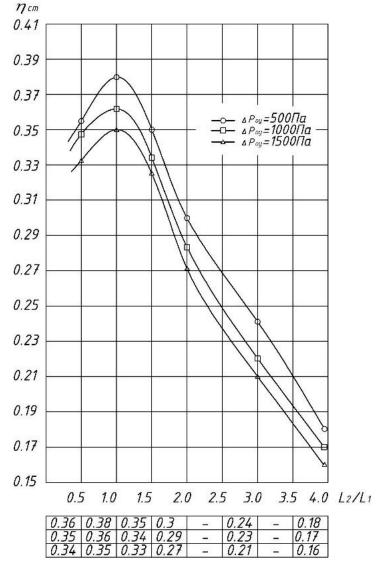


Рис. 3. Зависимость КПД эжектора от отношения расходов отсасываемого и активного газа

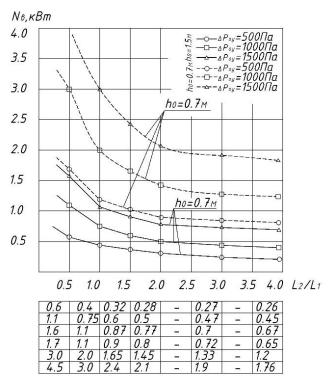


Рис. 4. Зависимость мощности вентилятора от отношения расходов отсасываемого и активного газа при различной высоте движения воздуха  $h_0$  над поверхностью испарения BBB

Кроме этого, следует сопоставить мощность, потребляемую вентилятором без эжектора при разбавлении выделяемых выбросов до концентрации не выше 30 % НКПВ с мощностью вентилятора, подающего активный воздух в эжектор и работающий в режиме рециркуляции очищенного активного газа.

Если, к примеру, для отсоса выделяемых BBB с расходом конвективного потока  $L_o = 0.2$  $m^3/c$  при длинах всасывающего и напорного воздуховодов по 5 м, скорости газа  $V_2 = 25 \, \text{м/c}$ , тогда потребная производительность вентилятора при разбавлении выбросов не менее чем на 30 % НКПВ составит не менее  $L_2 = 0.66 \, \text{м}^3/c$ . Развиваемое вентилятором давление без эжектора должно быть равно  $P_1 = (P_B - P_4) + +(1 + \xi)\rho_2 \cdot V^2 / V^2$ 2 = 520 Па при  $(P_6 - P_4) = 50$  Па. Мощность вентилятора составит 0,5 кВт. Для подачи активного газа в эжектор с параметрами  $\beta = 1$ ,  $V_2/V_3 = 0.613$ (см. табл. 4),  $V_1 = 1,387 \ V_3$  (из зав. 20),  $V_3 = 40,8$ M/c, тогда  $V_1 = 56,6 \, M/c$  и давление, развиваемое вентилятором, составит величину  $P_1 = 1369 \text{ Па}$ при расходе газа  $L_1 = 0.2 \, \text{м}^3/c$ . С учетом гидравлического сопротивления воздуховодов длиной до 2 м потребная мощность вентилятора составит 0,42 кВт. Более достоверное определение экономического преимущества рассматриваемой установки определяется для конкретного воздухообмена помещения.

**Выводы.** В результате выполненных аналитических исследований и использования результатов ранее выполненных экспериментальных

работ показано преимущество применения эжекторной установки вместо вентилятора во взрывобезопасном исполнении при применении в её составе очистной установки. Применение на взрывоопасных предприятиях эжекторно-очистной установки позволяет обеспечить экономию энергетических ресурсов в системах местной и приточной вентиляции, а также безопасность и нормируемые экологические показатели.

**Источник финансирования.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10025).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Шепс Р.А., Шашин А.В., Жерлыкина М.Н., Шичкин В.В. Определение энергетической эффективности механической вентиляции помещений с выделением вредных веществ // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2019. № 2 (9). С. 62–68.
- 2. Kireev V.M., Goltsov A.B., Seminenko A.S., Ovsyannikov Y.G. Creation of a new energy-efficient design of the dustexhaust system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 552(1). 012021.
- 3. Sheremet E.O., Seminenko A.S., Goltsov A.B., Podporinov B.F. Efficiency of dust separating devices in ventilation emission cleaning systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. № 327(4). 042081.
- 4. Батурин М.В. Основы промышленной вентиляции. М.: Профиздат, 1990. 446с.

- 5. Логачёв И.Н., Логачёв К.И., Аверкова О.А. Энергосбережение в аспирации. Теоретические предпосылки и рекомендации // Москва, Ижевск, 2013.
- 6. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка, предупреждение. М.: "Химия", 1991. 431 с.
- 7. Rickenbacker H.J., Collinge W.O., Hasik V. et al. Development of a framework for indoor air quality assessments in energy conservation districts // Sustainable Cities and Society. 2020. 52. 101831
- 8. Бромлей М.Ф., Щеглов В.П. Проектирование отопления и вентиляции. М.: Издательство по строительству, 1965. 257 с.
- 9. Каменев П. Н. Отопление и вентиляция. Часть 2 Вентиляция. М.: Издательство по строительству, 1964. 470 с.
- 10.Logachev K.I., Averkova O.A., Tolmacheva E.I., Logachev A.K., Dmitrienko V.G. Modeling of Air and Dust Flows in the Range of Action of a Round Suction Funnel Above an Impermeable Plane. Part 1. A Mathematical Model and Algorithm for its Computer Implementation, Refract. Ind. Ceram. 2016. № 56. Pp. 679–683.
- 11.Pietrowicz S., Kolasiński P., Pomorski M. Experimental and numerical flow analysis and design optimization of a fume hood using the CFD method. Chemical Engineering Research and Design 2018. 132. Pp. 627–643.
- 12. Скрыпник А.И. Исследование условий образования и распространения выбросов при испытании ЖРД. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук Воронеж, КБХА, 1969. 150 с.
- 13. Yang Y., Wang Y., Song B., Fan J., Cao Y. Stability and accuracy of numerical investigation of droplet motion under local ventilation airflow, Build. Environ. 2018. № 140. Pp. 32–42.
- 14.Jeong S.-H., Kwon H.-M., Ahn S.-J., Yang J.-H. A Study on the Improvement of Ventilation

- Rate Using Air-flow Inducing Local Exhaust Ventilation System, J. Asian Archit. Build. Eng. 2016. №15. Pp. 119–126.
- 15.Эльтерман В.М. Вентиляция химических производств. М.: "Химия", 1980. 197 с.
- 16.Шашин А.В. Влияние геометрических характеристик укрытия шкафного типа местной вытяжной вентиляции на эффективность работы по удалению ВХВ // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 1 (26). С. 165–171.
- 17.Kireev V.M., Buryanov I.A., Minko V.A., Seminenko A.S., Goltsov A.B. Determination of the height of aspiration shelter funnel // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. № 8(4). pp. 22538–22544
- 18. Лобанов Д.В., Шепс Р.А., Портнова Н.В. Экспериментальные исследования энергоэффективности работы систем климатизации в офисном помещении // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 3. С. 71–79.
- 19.Zhou B., Wei P., Tan M., Xu Y., Ding L., Mao X., Zhao Y., Kosonen R. Capture efficiency and thermal comfort in Chinese residential kitchen with push-pull ventilation system in winter-a field study, Build. Environ. 2019. № 149. Pp. 182–195.
- 20.Huang Y., Wang Y., Liu L., Nielsen P.V., Jensen R.L., Yan F. Reduced-scale experimental investigation on ventilation performance of a local exhaust hood in an industrial plant, Build. Environ. 2015. № 85. Pp. 94–103.
- 21. Jaremenko S.A., Garmonov K.V., Sheps R.A. Research of air pollution by dust aerosols during construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2017). 2017. 012189.

#### Информация об авторах

**Шашин Алексей Викторович**, кандидат технических наук, доцент кафедры жилищно-коммунального хозяйства. E-mail: ingvent@mail.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20 летия Октября, д. 84.

**Шепс Роман Александрович**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры жилищно-коммунального хозяйства. E-mail: romansheps@yandex.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20 летия Октября, д. 84.

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

**Минко Всеволод Афанасьевич**, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: va.minko@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 28.07.2020 г.

© Шашин А.В., Шепс Р.А., Семиненко А.С., Минко В.А., 2021

# <sup>1</sup>Shashin A.V., <sup>1</sup>\*Sheps R.A., <sup>2</sup>Seminenko A.S., <sup>2</sup>Minko V.A.

<sup>1</sup>Voronezh state technical University <sup>2</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov \*E-mail: romansheps@yandex.ru

# LOCAL EXHAUST VENTILATION WITH EJECTION OF EXPLOSIVE SUBSTANCES AND RECIRCULATION OF PURIFIED AIR

Abstract. Exhaust ventilation systems in industrial enterprises and facilities with the use of harmful substances largely determine the air exchange in the workplace to ensure normalized sanitary and hygienic conditions and operating costs. Local exhaust ventilation of explosive harmful substances is of particular importance for effective air exchange in such rooms, since their localization, suction and transportation are subject to increased requirements. The paper presents the results of analytical and experimental studies of the operation mode of a complex local exhaust device with a gas ejector for extraction explosive harmful chemicals from shelters, ensuring their effective localization, purification and recirculation of air. The boundary conditions and assumptions for calculating the characteristics of the processes of gas flow ejection, purification of technological emissions and recirculation of the purified gas flow, determined on the basis of the analysis of previously performed studies and experimental work, are given. The conditions of rational ratios device settings of extraction of emissions sources of substances that parameters of the ejector and cleaning device emission, which is achieved economic and environmental efficiency of the installation and excludes the volatile situation on the threat of chemical enterprises and objects.

**Keywords:** local exhaust ventilation, explosive substances, ejector, recirculation, energy efficiency of ventilation systems, ejection calculation.

#### REFERENCES

- 1. Sheps R.A., Shashin A.V., Zherlykina M. N., Shichkin V. V. Determination of the energy efficiency of mechanical ventilation of premises with the release of harmful substances [Opredelenie energeticheskoj effektivnosti mekhanicheskoj ventilyacii pomeshchenij s vydeleniem vrednyh veshchestv]. Housing and communal infrastructure. 2019. No. 2 (9). Pp. 62–68.
- 2. Kireev V.M., Goltsov A.B., Seminenko A.S., Ovsyannikov Y.G. Creation of a new energy-efficient design of the dustexhaust system. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. No. 552(1). 012021.
- 3. Sheremet E.O., Seminenko A.S., Goltsov A.B., Podporinov B.F. Efficiency of dust separating devices in ventilation emission cleaning systems. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. No. 327(4). 042081.
- 4. Baturin M. V. Fundamentals of industrial ventilation [Osnovy promyshlennoj ventilyacii]. Moscow: Profizdat, 1990. 446 p.
- 5. Logachov I.N., Logachov K.I., Averkova O.A. Energy saving in aspiration. Theoretical background and recommendations [Energosberezhenie v aspiracii. Teoreticheskie predposy`lki i rekomendatcii]. Moskva, Izhevsk, 2013.
- 6. Beschastnov M.V. Industrial explosions. Assessment, warning [Promy`shlenny`e vzry`vy`. Ocenka, preduprezhdenie]. M.: "Chemistry", 1991. 431 p.

- 7. Rickenbacker H.J., Collinge W.O., Hasik V. et al. Development of a framework for indoor air quality assessments in energy conservation districts. Sustainable Cities and Society. 2020. 52. 101831
- 8. Bromley M.F., Shcheglov V.P. Design of heating and ventilation [Proektirovanie otopleniia i ventiliatcii]. Moscow: publishing house on construction, 1965. 257 p.
- 9. Kamenev P.N. Heating and ventilation. Part 2-Ventilation [Otoplenie i ventiliatciia. Chast` 2 Ventiliatciia.]. Moscow: publishing house for construction, 1964. 470 p.
- 10.Logachev K.I., Averkova O.A., Tolmacheva E.I., Logachev A.K., Dmitrienko V.G. Modeling of Air and Dust Flows in the Range of Action of a Round Suction Funnel Above an Impermeable Plane. Part 1. A Mathematical Model and Algorithm for its Computer Implementation, Refract. Ind. Ceram. 2016. No. 56. Pp. 679–683.
- 11.Pietrowicz S., Kolasiński P., Pomorski M. Experimental and numerical flow analysis and design optimization of a fume hood using the CFD method. Chemical Engineering Research and Design 2018. 132. Pp. 627–643.
- 12.Skrypnik A.I. Research of conditions of formation and distribution of emissions during testing of the liquid-gas engine [Issledovanie uslovii` obrazovaniia i rasprostraneniia vy`brosov pri ispy`tanii ZHRD]. Dissertation for the degree of candidate of technical Sciences Voronezh, KBHA, 1969. 150 p.

13. Yang Y., Wang Y., Song B., Fan J., Cao Y. Stability and accuracy of numerical investigation of droplet motion under local ventilation airflow, Build. Environ. 2018. No. 140. Pp. 32–42.

14.Jeong S.-H., Kwon H.-M., Ahn S.-J., Yang J.-H. A Study on the Improvement of Ventilation Rate Using Air-flow Inducing Local Exhaust Ventilation System, J. Asian Archit. Build. Eng. 2016. No. 15. Pp. 119–126.

15.Elterman V.M. Ventilation of chemical production [Ventiliatciia himicheskikh proizvodstv]. Moscow: "Chemistry", 1980. 197 p.

16.Shashin A.V. Influence of geometric characteristics of the Cabinet-type shelter of local exhaust ventilation on the efficiency of work to remove vxv [Vliianie geometricheskikh harakteristik ukry`tiia shkafnogo tipa mestnoi` vy`tiazhnoi` ventiliatcii na e`ffektivnost` raboty` po udaleniiu VKHV]. Bulletin of the Tomsk state University of architecture and construction. 2010. No. 1 (26). Pp. 165–171.

17.Kireev V.M., Buryanov I.A., Minko V.A., Seminenko A.S., Goltsov A.B. Determination of the height of aspiration shelter funnel. International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. No. 8(4). Pp. 22538–22544

18.Lobanov D.V., Sheps R.A., Portnova N.V. Experimental studies of energy efficiency of climate control systems in office premises [E`ksperimental`ny`e issledovaniia e`nergoe`ffektivnosti raboty` sistem climatizatcii v ofisnom pomeshchenii]. Bulletin of the Voronezh state technical University. 2018. Vol. 14, No. 3. Pp. 71–79.

19.Zhou B., Wei P., Tan M., Xu Y., Ding L., Mao X., Zhao Y., Kosonen R. Capture efficiency and thermal comfort in Chinese residential kitchen with push-pull ventilation system in winter-a field study, Build. Environ. 2019. No. 149. Pp. 182–195.

20.Huang Y., Wang Y., Liu L., Nielsen P.V., Jensen R.L., Yan F. Reduced-scale experimental investigation on ventilation performance of a local exhaust hood in an industrial plant, Build. Environ. 2015. No. 85. Pp. 94–103.

21. Jaremenko S.A., Garmonov K.V., Sheps R.A. Research of air pollution by dust aerosols during construction. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2017). 2017. 012189.

Information about the authors

**Shashin, Alexey V.** PhD. E-mail: ingvent@mail.ru. Voronezh state technical University associate Professor of the Department of housing and communal services. Russia, 394006, Voronezh, ul. 20 letiya Oktyabrya, d. 84.

**Sheps, Roman A.** Senior lecturer. E-mail: romansheps@yandex.ru. Voronezh state technical University. Russia, 394006, Voronezh, ul. 20 letiya Oktyabrya, d. 84.

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

**Minko Vsevolod A.** DSc, Professor. E-mail: va.minko@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 28.07.2020

## Для цитирования:

Шашин А.В., Шепс Р.А., Семиненко А.С., Минко В.А. Местная вытяжная вентиляция с эжектированием взрывоопасных веществ и рециркуляцией очищенного воздуха // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 38–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-38-48

## For citation:

Shashin A.V., Sheps R.A., Seminenko A.S., Minko V.A. Local exhaust ventilation with ejection of explosive substances and recirculation of purified air. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 2. Pp. 38–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-38-48

# DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-49-59

# \*Швецова-Шиловская Е.А., Ильвицкая С.В.

Государственный университет по землеустройству \*E-mail:LizaSh-Sh@list.ru

# ПРИНЦИПЫ РЕКОНСТРУКЦИИ И РАЗВИТИЯ ПРАВОСЛАВНЫХ МОНАСТЫРЕЙ РУССКОГО СВЕВЕРА

Аннотация. При реконструкции и развитии православных монастырей Русского Севера в современных условиях увеличения числа паломников и туристов возник ряд проблем с восстановлением традиционных и появлением новых функций монастырских комплексов. В настоящей работе предложены и обоснованы четыре общих принципа реконструкции православных монастырей в современных условиях: принцип разделения монастырского комплекса на функциональные зоны, принцип максимально доступности территорий и зданий монастырских комплексов лицам с ограниченными возможностями, принцип сохранения и восстановления объемно-пространственной композиции архитектурного ансамбля, а также принцип сохранения и использования природного ландшафта монастырских территорий. Проанализированы примеры применения разработанных принципов к ряду монастырей Русского Севера. Показано, что реализация этих принципов позволит сформировать доступную многофункциональную архитектурно-пространственную среду монастырских комплексов с зонированием их территории и сохранением ансамбля как архитектурной композиции, так и окружающего ландшафта. В результате будут созданы оптимальные условия взаимодействия монастырской общины и посетителей монастыря. Предложенные в работе принципы планируется использовать для разработки детальных рекомендаций по реконструкции и развитию православных монастырских комплексов.

**Ключевые слова:** православные монастырские комплексы, зонирование территории, архитектурно-пространственная композиция, многофункциональная среда, паломники и туристы.

Введение. В течение последних десятилетий в российском обществе отмечается рост интереса к православию. Многие монастырские комплексы, использовавшиеся в период после революции 1917 г. не по прямому назначению, были возвращены Русской Православной Церкви. Все это привело к резкому увеличению числа людей, посещающих православные монастыри: паломников, посещающих обители с религиозными целями, и туристов, совершающих познавательные поездки. Очевидно, что присутствие в монастыре большого числа посторонних людей может серьезно нарушить повседневную жизнь монастыря, затруднить монахам их служение [1]. Кроме того, пребывание в монастыре на протяжении нескольких дней паломников и туристов вызывает необходимость обустройства гостиниц, пунктов питания, стоянок транспорта, а также помещений, реализующих целый комплекс других функций [2]. Инфраструктура для приезжих должна обеспечивать комфорт, обладать удобством и удовлетворять необходимым санитарно-гигиеническим условиям. Музейная функция монастырей, т.е. возможность осмотра хранящихся в монастырях художественных ценностей, также требует выделения специальных помещений, которые могут обеспечить необходимые условия экспонирования этих ценностей и их охрану. В настоящий момент большинство монастырских комплексов

не справляется ни с большим количеством посетителей, ни с множеством проблем, связанных с развитием их инфраструктуры.

Особенно остро эти проблемы стоят в монастырях Русского Севера [3]. За несколько веков существования северных монастырей с момента основания в XIV-XVII вв. и до закрытия в 20–30 гг. XX в. формирование их архитектурных комплексов происходило постепенно, вместе с ростом населения севера России. Обители, получавшие большую поддержку укреплявшегося Великого княжества Московского, а затем Российской Империи, возводили новые здания и расширяли свои территории. Монастыри, не получавшие значительной поддержки, продолжали строительство зданий, но оставались в прежних границах [4]. В обоих случаях изменения функционального использования зданий монастырей происходили постепенно, по мере развития монастырских комплексов.

Основная монастырская функция, т.е. культовая, оставалась неизменной, но наряду с ней возникали и развивались жилая, социально-бытовая, и производственная функции [5]. Другие функции, например, такие как сторожевая, возникали, но со временем теряли свою актуальность. Возникновение этой функции связано с тем, что зачастую люди стекались под защиту монастырей. Действительно, монастыри часто были окружены посадами и более удаленными поселе-

ниями. По той же причине возникла и развивалась гостевая функция монастырей. Если в XVII в. странноприимные дома в монастырях еще только появлялись, то к XIX в. странноприимные дома и монастырские гостиницы были построены уже во многих монастырях. Также развивались функция обслуживания паломников, лечебная и учебно-просветительская функции.

Постепенно в монастырях образовались коллекции рукописных книг, картин, и других предметов искусства [6], благодаря чему у монастырей появилась и музейная функция. Действительно, первые церковные музеи возникают к концу XIX в., а к началу Первой мировой войны в России насчитывалось уже около 50 церковных музеев [7, 8].

Постепенное развитие монастырей нарушали социальные потрясения, такие, как войны или секуляризационная реформа Екатерины II, из-за которых многие обители были доведены до разорения, а некоторые уничтожены. Драматические события XX в. нанесли сильнейший удар по всем монастырям России. После закрытия монастырей в 20-е и 30-е годы и приведения их церквей в «некультовый вид», т.е. уничтожения крестов и глав, в монастырях размещаются фабрики, исправительные колонии, психиатрические лечебницы, детские дома и прочие учреждения, никак не соответствующие духовной и культурной ценности монастырских комплексов [9]. Использование монастырских зданий под склады, гаражи и цеха фабрик губительно сказывалась на состоянии зданий [10].

В лучшем положении оказались монастыри, переданные краеведческим и художественным музеям, например, монастырские комплексы Вологодской обл.: Спасо-Прилуцкий, Кирилло-Белозерский, и Ферапонтов. Их здания сохранялись, а в послевоенные годы проводилась и научная реставрация этих монастырских комплексов. В результате, эти монастыри становятся объектами познавательного туризма. Концепция проектов реставрации монастырей, выполнявшихся в послевоенный период и до 1990-х гг. основывалась на однофункциональной - музейной трактовке монастырских комплексов. При восстановлении монастырей принималось во внимание исключительно композиционное единство архитектурного комплекса, художественные особенности главных его зданий, воспринимавшихся как объекты показа [11]. Интерьеры всех зданий, включая церкви, приспосабливались под музейную экспозицию. Не подлежала восстановлению главная функция монастыря – культовая: полностью игнорировались функциональная структура

монастырских комплексов, сложившаяся в течение нескольких веков, и группы помещений, необходимые для ее восстановления.

В настоящее время вопросы реконструкции и развития православных монастырей в условиях увеличения числа паломников и туристов остаются недостаточно изученными. Это в особенности относится к монастырям Русского Севера. Хотя монастырям севера России посвящено значительное число работ, большая их часть носит исторический или описательный характер (см, например, [3-6, 9,10]). Принципам современной реабилитации монастырских комплексов Вологодской области посвящены работы И. К. Белоярской [12, 13]. И. К. Белоярская выделяет шесть различных групп современного использования монастырских ансамблей: от использования в качестве исторических и краеведческих музеев и возвращения монастырям их первоначальной функции до использования зданий монастырей под складские помещения, гаражи, жилье и т.д. В работе [12] показано, что большинство современных функций монастырских комплексов не соответствует архитектурно-планировочной структуре и композиционной организации ансамбля и губительно сказывается на состоянии монастырских построек. На примере монастырей Вологодской области И. К. Белоярской был разработан ряд принципов архитектурно-градостроительной реконструкции монастырских комплексов Русского Севера. В первую очередь, эти принципы учитывают степень сохранности монастыря, а также его ценностные характеристики, к числу которых относятся историческая, градостроительная, архитектурно-эстетическая и др. [12].

Работы С. В. Ильвицкой [14–16], посвященные исследованию архитектуры православных монастырских комплексов балканских стран, ввели в архитектурную типологию большой объем теоретических и практических данных по формированию архитектуры монастырей. С. В. Ильвицкой впервые разработана функциональная типология применительно к религиозным архитектурным объектам. На основе установленных типологических закономерностей формирования архитектуры монастырей в работе [14] была сформулирована универсальная структурно-функциональная прогностическая модель организации православного монастырского ансамбля. Эта модель представляет собой научнопрактическую предпосылку для реконструкции и нового строительства монастырей на Балканах и в России.

Проблемам, возникающим при функционировании монастырей в современных условиях расширения паломничества, посвящены работы Л. А. Федотовой [2, 17–18]. В работе [2] была

предложена концепция исторического комплекса паломнического туризма как системы взаимосвязанных зданий и сооружений, находящихся в территориальной доступности друг от друга. Л. А. Федотовой сформулирована теоретическая функционально-пространственная модель исторического комплекса паломнического туризма, центральным ядром которого является храм. Архитектурная организация таких комплексов была исследована в работах [2, 17] на примере Коломенского района Московской области. Также Л. А. Федотовой предложены модель паломнической гостиницы нового типа и типология гостиничных номеров [2].

Таким образом, проблемы, связанные с восстановлением традиционных и появлением новых функций православных монастырей Русского Севера при их возрождении в современных условиях, требуют дальнейшего изучения. Очевидно, что как воссоздание традиционных, так и развитие новых монастырских функций требует формирования доступной многофункциональной архитектурно-пространственной среды монастырей с зонированием их территории и сохранением ансамбля архитектурной композиции и окружающего ландшафта. Такая среда может быть создана на основе новых принципов формирования архитектуры монастырских комплексов Русского Севера, учитывающих увеличение числа посетителей монастырей. Поэтому целью настоящей работы является разработка ряда новых принципов формирования архитектуры православных монастырей. К этим принципам относятся: 1) принцип разделения монастырского комплекса на функциональные зоны, 2) принцип максимальной доступности территории и зданий монастырских комплексов лицам с ограниченными возможностями, 3) принцип сохранения и восстановления объемно-пространственной композиции архитектурного ансамбля, и 4) принцип сохранения и использования природного ландшафта монастырских территорий.

Объектом исследования данной работы являются православные монастырские комплексы Русского Севера и входящие в них здания. Поставленная в работе цель определила основные задачи исследования: теоретическое обоснование сформулированных принципов формирования архитектуры монастырей, выработка конкретных архитектурных приемов и мер, направленных на реализацию предлагаемых принципов, а также анализ ожидаемых результатов применения этих приемов и мер к ряду монастырей Русского Севера.

**Методология.** Выполненное в данной работе исследование основано на комплексном подходе, включающем анализ исторического и

современного опыта архитектурной теории и практики строительства монастырей. Применяемый комплексный подход базируется на целом ряде различных методов исследования. К этим методам относятся: 1) анализ и обобщение российского и зарубежного опыта реставрации и архитектурной организации монастырских комплексов; 2) изучение и систематизация исторических данных, проектных материалов и действующих нормативных документов; 3) проведение фотофиксации и натурных обследований ряда православных монастырей Архангельской и Вологодской областей; 4) комплексная оценка предлагаемых проектных решений и ожидаемых результатов их реализации.

Основная часть. Первым из предлагаемых в настоящей работе принципов является принцип разделения монастырского комплекса на функциональные зоны. Данный принцип определяет разновидности основных функциональных зон, формулирует требования к этим зонам и формирующим их зданиям. Он заключается в разделении монастырских территорий на шесть функциональных зон: 1) зону монастырской братии, 2) зону обслуживания паломников и туристов, 3) хозяйственную зону, 4) рекреационную зону, 5) музейно-туристическую зону, и 6) сакральную зону. Разделение на перечисленные зоны должно производиться на основе анализа современной архитектурной организации монастырей.

Очевидно, что архитектурная среда зоны проживания насельников монастыря должна создавать условия быта монахов и послушников, соответствующие правилам и традициям монастыря. Прежде всего, необходимо добиться обособленности жизни монастырской братии. Монахи и послушники не должны сталкиваться с туристами ни в келейных корпусах, ни во время трапезы, ни при исполнении трудовых послушаний. Лишь во время церковных служб братия монастыря объединяется с паломниками. Безусловно, бытовые условия братии должны удовлетворять необходимым гигиеническим потребностям современного человека. Кроме того, должны быть обеспечены и условия для духовного роста каждого члена монастырской общины. Необходимо предусмотреть помещения для чтения благословленной настоятелем литературы и просмотра фильмов, возможность проведения братских собраний, бесед, и лекций наставников. Эти требования относятся к обустройству коллективной жизни монахов и послушников. Для удовлетворения всех перечисленных потребностей жизни и церковного служения, зона монастырской братии должна обладать зданиями жилой, социально-бытовой, и культурно-просветительской функций:

- 1) келейными корпусами (братским и настоятельским),
  - 2) братской трапезной с церковью,
  - 3) кухней и просфорной,
- 4) библиотекой, помещениями многопрофильного использования для проведения лекций, просмотра кинофильмов, и т.д.
  - 5) медицинским пунктом и богадельней.

Также к зоне монастырской братии относится скит, представляющий собой уединенное жилище монаха-отшельника (схимника), либо самостоятельное, либо каким-то образом структурно выделенное в монастыре. Строительство скита (см., например, [19, 20]) на удаленной монастырской территории представляет собой самую радикальную из тех архитектурных мер, которые могут быть приняты в связи с увеличением количества людей, посещающих монастырь.

Зона обслуживания паломников и туристов совмещает несколько необходимых групп помещений, которые реализуют жилую, социальнобытовую, культурно-просветительскую и торговую функции монастырских комплексов. Очевидно, что паломники и туристы представляют собой две совершенно разные группы посетителей. Распорядок дня паломников подчинен совершаемым в монастыре службам, в то время как туристы, посещающие монастырь, более свободны в своих действиях. Даже вопрос питания решается для паломников и туристов совершенно по-разному. Питание у паломников чаще всего централизовано: они едят либо в трапезной, либо в близлежащем кафе, но все вместе. При этом пища готовится в традициях монастырской братской кухни с соблюдением церковного устава [21]. Очевидно, что организовывать такой же порядок для туристов нецелесообразно и едва ли возможно. Поэтому монастырю желательно иметь две разные гостиницы для каждой из этих групп посетителей. Более того, опыт воссоздания Антониево-Сийского монастыря показал, что в монастыре целесообразно наличие даже не двух, а четырех типов разных жилья для посетителей (см. работу [22]):

- 1) паломнической гостиницы,
- 2) туристической гостиницы,
- 3) гостиницы для семейного отдыха,
- 4) лагеря для размещения молодежи и студентов,

Вопрос о необходимости хозяйственной зоны должен решаться индивидуально для каждого монастыря, в зависимости от конкретных хозяйственных нужд, а также от количества находящихся в нем послушников и трудников.

Рекреационная зона, предназначенная для отдыха посетителей в отдалении от сакральной

зоны монастыря, зачастую отсутствует из-за неимения участка, пригодного для использования в этом качестве. Такая зона существует в Валдайском Иверском монастыре. Эта зона используется как объект экологического туризма: на ее территории устроены места для организованного отдыха на природе, спортивные площадки и места купания. В концепции развития Антониево-Сийского монастыря для организации рекреационной зоны предлагается участок западного берега Михайловского озера. Расположение рекреационной зоны на значительном расстоянии от монастыря позволит организовать на этой территории спортивные площадки, места для отдыха молодежи, и места для купания в озере, не нарушая уклада монастырской жизни. Рекреационная зона Кирилло-Белозерского монастыря (см., например, монографию [23] должна иметь другое назначение. На свободной территории, расположенной вдоль северной ограды монастыря, предлагается проводить праздники, фестивали, и ярмарки. В настоящее время эти мероприятия проводятся Кирилловским музеем-заповедником на территории самого монастырского комплекса. Высота и массивность стены ограды монастыря в достаточной степени защитит его от шума.

Музейно-туристическая зона выделяется в том случае, когда действующая община монастыря и государственный музей совместно владеют монастырским комплексом. Эта зона представляет собой территорию, сохраненную в собственности музея с зданиями, обладающими музейной функцией. Из-за невозможности передачи монастырям многих исторических зданий, функциональные группы помещений, необходимые для действующих монастырей, возможны только в перепрофилированных или во вновь возводимых зданиях. Здания церквей на территории музейно-туристической зоны не должны использоваться в некультовых целях, и, следовательно, они могут принадлежать только действующей монастырской общине. Ясно, что совместное владение архитектурным комплексом музеем и действующим монастырем представляет собой непростое сотрудничество с разделением между совладельцами обязанностей по сохранению зданий и обслуживанию посетителей. Целесообразно выделить музейно-туристическую зону в Кирилло-Белозерском и Ферапонтовом монасты-

Сакральная зона включает все культовые сооружения монастыря: церкви, часовни, крещальни, колокольни разных периодов постройки [24]. Объекты сакральной зоны могут составлять компактные группы или быть рассредоточенными на территории монастыря. Элементы са-

кральной зоны интересны разным категориям посетителей, например, туристам, специалистам, интересующимся культовыми зданиями: архитекторам, художникам, реставраторам и т.д. Но в первую очередь сакральная зона является целью прибытия верующих людей, т.е. паломников. Паломники посещают сакральную зону как во время службы, так и в перерыве между службами. Для монастырской братии сакральная зона является местом служения и смыслом пребывания в монастыре. Смысл выделения сакральной зоны определяется религиозно-этическим аспектом. Главное предназначение сакральной зоны быть местом молитвы (в рамках общего ритуала или индивидуальной). Поэтому использование церквей и часовен для иных функций, в том числе в качестве лекционных залов, помещений музейной экспозиции и т.п., недопустимо. Поскольку в восприятии верующего человека весь монастырь в целом является сакральной зоной, использование его территории для проведения шумных праздничных мероприятий (как, например, в Кириллово-Белозерском монастыре) также неприемлемо.

Вторым предлагаемым в настоящей работе принципом является принцип максимальной доступности территории и зданий монастырских комплексов лицам с ограниченными возможностями. Стандартное современное требование к проектам зданий в «миру» – доступность зданий для лиц с ограниченными возможностями (в соответствии со сводом правил СП 35-101-2991) превращается в нелегкую проблему при проектировании монастырских комплексов. Очевидно, что здания монастырей не задумывались так, чтобы удовлетворять этому требованию. Даже их главная функциональная группа, т.е. церкви, располагающиеся в северных монастырях на высоких подклетах, зачастую недоступны лицам с ограниченными возможностями. При научной реставрации сохранившихся зданий с их первоначальным приспособлением чаще всего оказывается невозможным добиться доступной (безбарьерной) архитектурной среды. Это обусловлено необходимостью сохранения памятников архитектуры. В данной работе предлагается несколько основных приемов, направленных на реализацию принципа максимальной доступности:

- 1) перепланировка и оборудование реставрируемых зданий или их частей при перепрофилировании с целью создания доступной среды (увеличение дверных проемов и ширины дорожек, применение лифтов, подъемников и пандусов, а также специализированной мебели и санитарно-технического оборудования и т.д.);
- 2) устройство помещений социально-бытовой группы (трапезных, кафе для туристов) на

первых этажах при изменении их приспособления:

- устройство действующих приделов в подклетах церквей;
- 4) воссоздание утраченных частей и пристроек существующих исторических зданий с их перепланировкой, позволяющей устройство среды жизнедеятельности для лиц с ограниченными возможностями.
- 5) объединение исторических зданий в единые блоки с вновь возводимыми зданиями, оборудованными для лиц с ограниченными возможностями;
- 6) учет необходимости проезда инвалидных колясок при разработке планов дорожной системы (соблюдение уклонов и ширины дорог для проезда инвалидных колясок, устройство пандусов в местах перепада рельефа).

На Рис. 1 показан предлагаемый в настоящей работе вариант приспособления исторических зданий Спасо-Прилуцкого монастыря [25] в соответствии с принципом максимальной доступности. Предлагается приспособить башню ограды под музей с устройством перекрытий для размещения музейной экспозиции, доступной с помощью лестницы и лифта. При этом выход на галерею второго яруса стен ограды на втором этаже башни, используемый для продолжения экскурсии по «боевому ходу», доступен лицам с ограниченными возможностями.

На Рис. 2 изображены фрагменты фасадов и планы деревянной церкви Успения, перевезенной из Николо-Куштского монастыря в Спасо-Прилуцкий в качестве экспоната деревянного зодчества. В настоящей работе предлагается вернуть этой церкви ее первоначальную функцию. Это может быть сделано при следующих реставрационных работах в монастыре. Доступ лиц с ограниченными возможностями в церковь Успения будет осуществляться при помощи подъемника из подцерковья вверх на гульбище церкви.

Третьим предлагаемым принципом является учет сохранения и восстановления объемно-пространственной композиции архитектурного ансамбля. При реставрационных работах в архитектурных комплексах монастырей, проводившихся в 50-80-х гг. XX в., преобладала трактовка монастырских комплексов как монастырей-музеев под открытым небом. В соответствии с этим ставились задачи восстановления каждого здания в том его историческом облике, который наиболее полно способствует выявлению художественных особенностей данного здания и всего архитектурного комплекса в целом как объекта показа, а также задачи восстановления деталей декора фасадов и интерьеров, аутентичных строительных приемов, конструкций и материалов.

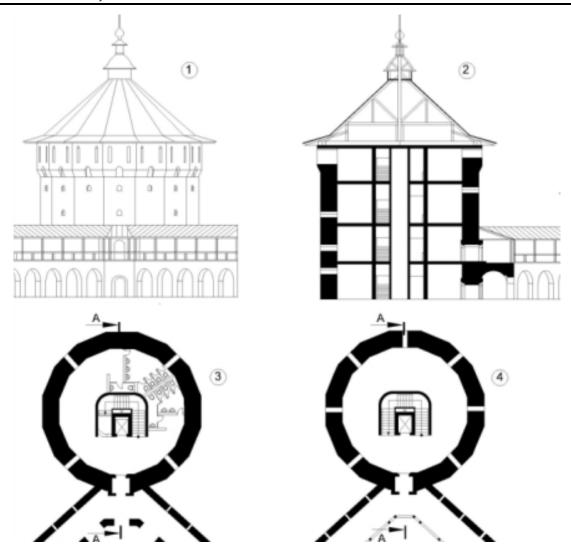


Рис. 1 (а) Фасад башни ограды Спасо-Прилуцкого монастыря. (б) Разрез башни ограды. (в) План на уровне первого яруса. Здесь находятся вестибюль и туалеты, приспособленные для лиц с ограниченными возможностями. (г) План на уровне второго яруса. На этом ярусе находятся зал музейной экспозиции и выход на второй ярус стен ограды.

Работы по возрождению монастырских комплексов преследуют цель восстановления не только главной, т.е. культовой, функции этих комплексов, но и всей их функциональной системы. Изменившийся подход к восстановлению монастырей вызывает необходимость не только реставрационных и восстановительных работ, но и возведения новых зданий на исторических территориях. Несмотря на специфику формирования архитектурно-планировочной среды монастырских комплексов в современных условиях, задача сохранения сокровищ древнего зодчества является одной из важнейших при возрождении монастырей. Воссоздание утраченных и строительство новых зданий не должны приводить к искажению объемно-пространственной композимонастырских комплексов. Одним из самых сложных и важных вопросов проектирования возрождающихся монастырских комплексов является обоснование воссоздания

утраченных зданий фоновой застройки монастырей и, особенно, нового строительства необходимых монастырям зданий. Это обусловлено тем, что архитектурные комплексы всех рассматриваемых в работе монастырей являются памятниками архитектуры Федерального значения и включены в список объектов Культурного наследия народов Российской Федерации.

Для решения вопроса о возведении того или иного здания необходимо доказать, что оно не приведет к искажению условий восприятия отдельных зданий монастыря, а также архитектурного ансамбля в целом. Кроме того, возводимое здание не должно перекрывать видовые точки на памятники архитектуры ни с дальних подступов, ни при приближении к монастырю. Наконец, возведение здания не должно приводить к разрушению какого-либо памятника архитектуры или его порче, т.е. оно не должно противоречить Федеральному закону «Об объектах культурного

наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» [26] (гл. VI. статья

34. п. 2 и статья 35. п. 2) и Инструкции по организации зон охраны недвижимых памятников истории и культуры СССР.

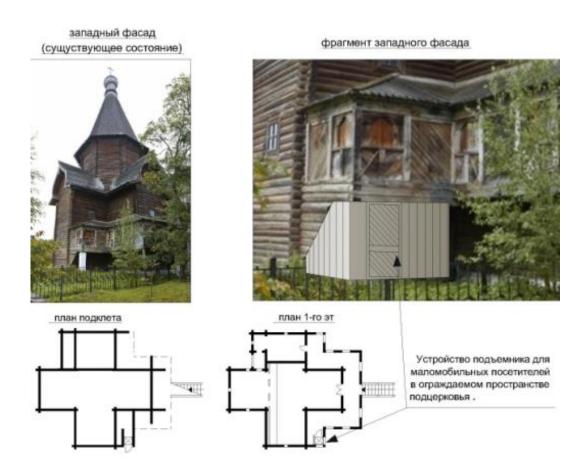


Рис. 2 (а) Западный фасад церкви Успения Спасо-Прилуцкого монастыря, современное состояние. (б) План подклета церкви Успения, современное состояние. (в) Фрагмент западного фасада. (г) План первого этажа церкви Успения

В то же время, при выполнении проектных работ по развитию монастырского комплекса может возникнуть проблема восстановления объемно-пространственной композиции в соответствии с замыслом создателей монастыря. Вопросы восстановления архитектурной композиции того или иного монастыря возникают в ходе проектных работ при условии:

- 1) утраты архитектурных доминант;
- 2) нарушения визуальной связи архитектурных объектов, связанных композиционными осями, из-за строительства зданий в более поздние строительные периоды;
- 3) утраты зданий, приводящие к нарушению единства объемной композиции, симметрии, или иных авторских замыслов зодчих.

Примером, иллюстрирующим утраты объемно-пространственной композиции и ее изменение, служит Антониево-Сийский монастырь (см. работу [27]).

Особенности ландшафта территорий, т.е., рельеф, группы деревьев, аллеи, «живые изгороди», и водоемы, издавна широко использовались в ансамблях монастырских комплексов. В соответствии с этой традицией, предлагаемый в данной работе четвертый принцип формирования архитектуры монастырей Русского Севера заключается в сохранении и использовании природного ландшафта монастырских территорий. Этот принцип направлен на комплексно-ансамблевый подход к развитию монастырей. Он преследует ту же цель, что и третий принцип, т.е. сохранение единого архитектурно-ландшафтного ансамбля монастырского комплекса. Поэтому реализация этого принципа должна основываться на тех же исследованиях, которые выполняются для изучения объемно-пространственной композиции архитектурного комплекса. Приведем ряд приемов использования элементов ландшафта при формировании архитектурно-планировочной структуры монастырей:

- 1. Использование рельефа территории при выборе участков для строительства зданий с тем, чтобы возводимые здания не просматривались с главных видовых точек и соответствовали высотной иерархии архитектурной композиции.
- 2. Использование водоразделов рельефа при сооружении стен внутренних оград, разделяющих территориальные зоны;
- 3. Использование источников подземных вод для восстановления и устройства колодцев и надкладезных часовен. Восстановление древней дренажной системы и водоотвода при производстве работ по благоустройству территории;
- 4. Формирование и восстановление аллей и «живых изгородей» для выделения осей объемно-пространственной композиции архитектурного ансамбля и визуальной изоляции келейных корпусов.

Примером, иллюстрирующим применение четвертого из приведенных здесь приемов, является березовая аллея, сохранившаяся в Кирилло-Белозерском монастыре от ворот Казанской башни до ворот Успенского монастыря (рис. 3). Эту аллею предлагается дополнить, т.е. восстановить группу деревьев и расчистить реку Свиягу для организации участка деревянного зодчества, см. рис. 4. Это позволит выделить в монастыре

основное направление движения к архитектур-

ной доминанте всего комплекса.

5. Использование элементов ландшафта для

организации мест отдыха на территории монастыря и рекреационной зоны на прилегающих

территориях.



Рис.3. Березовая аллея в Кирилло-Белозерском монастыре

Выводы. В настоящей работе предложен и обоснованы четыре общих принципа реконструкции православных монастырей Русского Севера в современных условиях увеличения числа посещающих монастыри паломников и туристов. К этим принципам относятся: принцип разделения монастырского комплекса на функциональные зоны, принцип максимально доступности территорий и зданий монастырских комплексов лицам с ограниченными возможностями, принцип сохранения и восстановления объемно-пространственной композиции архитектурного ансамбля, а также принцип сохранения и использования природного ландшафта монастырских территорий. Приведены конкретные примеры применения предложенных принципов к нескольким монастырям: Кирилло-Белозерскому, Ферапонтову, Валдайскому Иверскому, Спасо-Прилуцкому, и Антониево-Сийскому. Анализ этих примеров показал, что при реконструкции того или иного монастыря не следует пытаться применить все общие принципы одновременно. Вместо этого



Рис. 4. Участок деревянного зодчества и река Свияга (Кирилло-Белозерский монастырь)

необходимо выявить те из этих принципов, которые позволят решить актуальные проблемы реконструируемого монастыря. На основе предложенных в работе принципов планируется разработать детальные рекомендации по реконструкции и развитию ряда монастырских комплексов Русского Севера.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Ильвицкая С.В., Швецова-Шиловская Е.А. Спасение от паломников // Журнал Московской Патриархии. Храмоздатель: Приложение о церковном строительстве. 2013. № 2 (3). С. 48–56.
- 2. Федотова Л. А. Архитектурная организация исторических комплексов паломнического туризма: дисс...канд. архитектуры. М., 2013. С 22–63.
- 3. Brumfield W.C., Hensley H. Architecture at the end of the Earth: Photographing the Russian North, Duke University Press, Durham and London, 2015. 256 p.
- 4. Бусева-Давыдова И.Л. Русские православные монастыри до 1917 года // Монастыри:

Энциклопедический справочник, Москва: Республика. 2000, С. 380–412.

- 5. Brumfield W.C. A History of Russian Architecture, University of Washington Press, Seattle, 2003. 744 p.
- 6. Metropolitan Alfeyev. H. Orthodox Christianity. Volume III: The Architecture, Icons, and Music of the Orthodox Church, St. Vladimir's Seminary Press Yonkers, New York, 2014. 369 p.
- 7. Российская музейная энциклопедия [Электронный ресурс]. Системные требования: Google Chrome. URL: www.museum.ru/rme (дата обращения: 23.08.2020).
- 8. Кусова И.Г. Возрождение епархиальных древнехранилищ // Музей. 2010. №10. С. 58-63.
- 9. Штриккер  $\Gamma$ . Русская Православная Церковь в советское время (1917-1991), Москва: Пропилеи. 1995, 400 с.
- 10. Brumfield W.C. Lost Russia: Photographing the Ruins of Russian Architecture, Duke University Press, Durham and London, 1995. 130 p.
- 11. Михайловский Е.В. Реставрация памятников архитектуры. Развитие теоретических концепций, М.: Стройиздат. 1971, 192 с.
- 12. Древо. Открытая православная энциклопедия [Электронный ресурс]. Системные требования: Google Chrome. URL: www.drevo-ru (дата обращения: 23.08.2020).
- 13. Meinardus O.F.A. Two thousand years of Coptic Christianity, The American University in Cairo Press, Cairo and New York, 1999. 352 p.
- 14. Сергачев В. Монастырский минимум // Турбизнес. 2010. №4. [Электронный ресурс]. Системные требования: Google Chrome. URL:

http://www.tourbus.ru/article/1647.html (дата обращения: 23.08.2020).

- 15. Швецова-Шиловская Е.А, Ильвицкая С.В. Принципы формирования православных монастырских комплексов в современных условиях расширения паломничества, на примере Антониево-Сийского монастыря // IV Международная конференция молодых ученых и специалистов «Землеустройство, кадастр и геораспространенные технологии» Труды. Государственный Университет по Землеустройству. 2010. С. 294–301.
- 16. Кочетков И.А., Лелекова О.В., Подъяпольский С.С. Кирилло-Белозерский монастырь. Л.: Художник РСФСР, 1979. 184 с.
- 17. Cracraft J., Rowland D. (Editors). Architectures of Russian Identity, 1500 to the Present, Cornell University Press, New York, 2003. 264 p.
- 18. Спасо-Прилуцкий Димитриев Монастырь в Вологде, ООО Издательский дом Вологжанин: Вологда. 2007, 25 с.
- 19. Федеральный закон от 25 июня 2002 г. №73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации».
- 20. Швецова-Шиловская Е.А., Свято-Троицкий Антониево-Сийский монастырь: архитектура и особенности объемно-пространственной композиции // Архитектон: известия вузов. 2013. N241. С. 95–106.
- 21. Shvetsova-Shilovskaya E.A., Holy Trinity Antony of Siya monastery: Architecture and compositional features // Architekton: Proceedings of Higher Education. 2013. № 41. Pp. 95–106

Информация об авторах

**Швецова-Шиловская Елизавета Александровна**, аспирантка кафедры архитектуры. E-mail: LizaSh-Sh@list.ru. Государственный университет по землеустройству. Россия, 105064, г. Москва, ул. Казакова, д. 15.

**Ильвицкая Светлана Валерьевна**, доктор архитектуры, профессор, заведующая кафедрой архитектуры. E-mail: ilvitskaya@mail.ru. Государственный университет по землеустройству. Россия, 105064, г. Москва, ул. Казакова, д. 15.

Поступила 02.09.2020 г.

© Швецова-Шиловская Е.А., Ильвицкая С.В., 2021

# Shvetsova-Shilovskaya E.A., Ilvitskaya S.V.

State University of Land Use Planning. \*E-mail:LizaSh-Sh@list.ru

# PRINCIPLES OF RECONSTRUCTION AND DEVELOPMENT OF ORTHODOX MONASTERIES IN RUSSIAN NORTH

**Abstract.** Reconstruction of Orthodox monasteries in Russian North in modern conditions of increased number of tourists and pilgrims has faced a number of challenges. These challenges result from the restoration of traditional, as well as the emergence of new functions of the monastery complexes. Authors propose and

justify four main principles for reconstruction of Orthodox monasteries in modern conditions. Among these are: the principle of dividing of the monastery complex into functional zones, the principle of the maximum accessibility of the territories and buildings to persons with disabilities, the principle of preserving and restoring the volumetric-spatial composition, and the principle of preserving and using the landscape of the monastery territories. The examples of applications of the principles to a few monasteries in the Russian North are analyzed. Authors show that the implementation of these principles will allow to form an accessible multifunctional architectural environment of monastery complexes with territory zoning and preservation of both the architectural ensemble and the surrounding landscape. As the result, the optimal conditions for interaction between the monastery community and visitors will be provided. The proposed principles are planned to be used to develop specific recommendations for reconstruction and development of Orthodox monastery complexes.

**Keywords:** orthodox monastery complexes, territory zoning, architectural and spatial composition, multifunctional environment, pilgrims and tourists.

#### REFERENCES

- 1. Ilvitskaya S.V., Shvetsova-Shilovskaya E.A. Salvation from pilgrims. [Spasenie ot palomnikov]. Journal of the Moscow Patriarchate. Temple Maker: Church Building Appendix. 2013. No. 2 (3) Pp. 48–56. (rus)
- 2. Fedotova L. A. Architectural organization of historical complexes for pilgrim tourism. [Arhitekturnaya organizaciya istoricheskih kompleksov palomnicheskogo turizma: diss...kand. arhitektury]. Moscow, 2013. 211 p. (rus)
- 3. Brumfield W.C., Hensley H. Architecture at the end of the Earth: Photographing the Russian North. Duke University Press. Durham and London, 2015, 256 p.
- 4. Buseva-Davydova I.L. Russian orthodox monasteries before 1917 in Monasteries: The encyclopedic reference book [Russkie pravoslavnye monastyri do 1917 goda v Monastyri: Enciklopedicheskij spravochnik]. Moscow: Republic, 2000. 464 p. (rus)
- 5. Brumfield W.C. A History of Russian Architecture. University of Washington Press. Seattle, 2003. 744 p.
- 6. Metropolitan Alfeyev. H. Orthodox Christianity. Volume III: The Architecture, Icons, and Music of the Orthodox Church. St. Vladimir's Seminary Press Yonkers. New York, 2014. 369 p.
- 7. Encyclopedia of Russian Museums [Rossijskaya muzejnaya enciklopediya]. Google Chrome. URL: www.museum.ru/rme (date of treatment: 23.08.2020)
- 8. Kusova I.G. Renaissance of diocesan artefact depositories [Vozrozhdenie eparhial'nyh drevnekhranilishch], Museum. 2010. No. 10. Pp. 58-63 (rus)
- 9. Shtrikker G. Russian Orthodox Church in the Soviet Period (1917-1991). [Russkaya Pravoslavnaya Cerkov' v sovetskoe vremya (1917-1991)]. Moscow: Propilei, 1995. 400 p. (rus)
- 10.Brumfield W.C. Lost Russia: Photographing the Ruins of Russian Architecture. Duke University Press. Durham and London, 1995. 130 p.

- 11.Mikhailovskiy E.V. Restoration of architectural monuments: Development of theoretical concepts. [Restavraciya pamyatnikov arhitektury. Razvitie teoreticheskih koncepcij]. Moscow: Strojizdat, 1971. 192 p. (rus)
- 12. Drevo. Open orthodox encyclopedia [Drevo. Otkrytaya pravoslavnaya enciklopediya]. Google Chrome. URL: www.drevo-ru (date of treatment: 23.08.2020)
- 13. Meinardus O.F.A. Two thousand years of Coptic Christianity. The American University in Cairo Press. Cairo and New York, 1999. 352 p.
- 14. Sergachev V. Monastery minimum [Monastyrskij minimum]. Turbiznes. 2010. No. 4. Google Chrome. URL: http://www.tourbus.ru/article/1647.html (date of treatment: 23.08.2020).
- 15. Shvetsova-Shilovskaya E.A., Ilvitskaya S.V. Principles for the formation of orthodox monastery complexes in modern conditions of increasing pilgrimage, on the example of the Anthony-Siya monastery [Principy formirovaniya pravoslavnyh monastyrskih kompleksov v sovremennyh usloviyah rasshireniya palomnichestva, na primere Antonievo-Sijskogo monastyrya]. IV Mezhdunarodnaya konferenciya molodyh uchenyh i specialistov «Zemleustrojstvo, kadastr i georasprostranennye tekhnologii» Trudy. Gosudarstvennyj Universitet po Zemleustrojstvu. 2010. Pp. 294–301 (rus)
- 16. Kochetkov I.A., Lelekova O.V., Pod'yapolskiy S.S. Kirillo-Belozersky Monastery. [Kirillo-Belozerskij monastyr']. Leningrad: Hudozhnik RSFSR, 1979. 184 p. (rus)
- 17. Cracraft J., Rowland D. (Editors) Architectures of Russian Identity, 1500 to the Present, Cornell University Press. New York, 2003. 264 p.
- 18. Spaso-Prilutsky Dimitry Monastery in Vologda. [Spaso-Priluckij Dimitriev Monastyr' v Vologde]. Vologda: OOO Izdatel'skij dom Vologzhanin, 2007. 25 p. (rus)
- 19. Federal Law from June 25, 2002 No. 73-FZ «On objects of cultural heritage (historical and cultural monuments) of peoples of Russian Federation» [Federal'nyj zakon ot 25 iyunya 2002 g. №73-FZ «Ob

ob"ektah kul'turnogo naslediya (pamyatnikov istorii i kul'tury) narodov Rossijskoj Federacii».] Google Chrome. URL: http://www.consultant.ru/document/cons\_doc\_LAW\_37318/ (date of treatment: 23.08.2020)

20. Shvetsova-Shilovskaya E.A., Holy Trinity Antony of Siya monastery: Architecture and compositional features [Svyato-Troickij Antonievo-Sijskij monastyr': arhitektura i osobennosti ob"emno-prostranstvennoj kompozicii]. Architekton: Proceedings of Higher Education. 2013. No. 41. Pp. 95–106 (rus)

#### Information about the authors

**Shvetsova-Shilovskaya Elizaveta A.** Postgraduate student. E-mail: LizaSh-Sh@list.ru. State University of Land Use Planning. Russia, 105064, Moscow, st. Kazakova, 15.

**Ilvitskaya Svetlana V.** DSc, Professor. E-mail: ilvitskaya@mail.ru. State University of Land Use Planning. Russia, 105064, Moscow, st. Kazakova, 15.

Received 02.09.2020

# Для цитирования:

Швецова-Шиловская Е.А., Ильвицкая С.В. Принципы реконструкции и развития православных монастырей русского севера // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 49–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-49-59

## For citation:

Shvetsova-Shilovskaya E.A., Ilvitskaya S.V. Principles of reconstruction and development of orthodox monasteries in Russian North. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 2. Pp. 49–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-49-59

## DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-60-72

## Иголкин Н.В.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет Email: igolkin nikita@mail.ru

## АРХИТЕКТУРА МУРМАНСКА 1930-х – 1950-х гг.

Аннотация. Статья является продолжением исследования, посвящённого развитию пространственно-планировочной структуры города Мурманска в 1920-е – 1950-е гг. На основе анализа этапов развития городской структуры, исторически сложившейся градостроительной ситуации и архивных документов определены этапы развития архитектуры Мурманска, а также выявлена логика её исторического развития. Охарактеризована специфика и определены стилистические особенности мурманской архитектуры выявленных периодов на примере характерных зданий на отдельных отрезках главной городской магистрали – проспекта Ленина. Проведён краткий архитектурный анализ зданий, которые являются ценными элементами пространственно-планировочной структуры исторического центра Мурманска: пространственные, стилистические доминанты и акценты, пластические акценты. Рассматриваемые объекты формируют планировочные узлы, ритмику улицы и силуэт застройки, поэтому в них наилучшим образом отработаны основные композиционные решения. Для выявления специфики и ценностных характеристик мурманской архитектуры было проведено краткое сравнение композиционных приёмов и стилистики зданий Мурманска и Ленинграда 1930-х — 1950-х гг. Также был отмечен вклад ленинградских архитекторов в проектирование Мурманска и формирование его пространственно-планировочной структуры и архитектурного облика. В статье приводятся схемы-развертки отдельных отрезков застройки города, материалы фотофиксации, архивные снимки и документы.

**Ключевые слова:** пространственно-планировочная структура, этапы развития, доминанта, акцент, постконструктивизм, ретроспективизм.

Введение. Сегодня Мурманск играет значимую роль в экономическом развитии России. Город является крупным морским транспортным узлом, рыбопромышленным центром и базой ледокольного флота страны. Мурманск — незамерзающий порт, что даёт ему преимущество среди северных портов — круглогодичный выход в океан, благодаря чему объём грузоперевозок в зимнее время не спадает. Мурманск является ключевой площадкой в освоении ресурсов арктического шельфа. Подобный стратегический интерес может дать толчок строительной деятельности, и возможные вмешательства могут затронуть структуру исторической части города.

Исторический центр Мурманска теряет первозданный вид. Отсутствие надлежащей государственной охраны развязывает руки собственникам. Деятельность частных предпринимателей и агрессивность рекламы подвергают исторические здания изменениям, что в результате приводит к утрате их аутентичного облика. Также некачественные капитальные работы приводят к деградации и без того не столь значительного архитектурного наследия города. Подобный сценарий развития ситуации делает актуальной задачу выявления историко-культурной ценности архитектуры исторического центра Мурманска.

Тема исторического развития архитектуры северных городов в середине XX столетия подробно рассматривается в зарубежных исследованиях [1–5]. Также становится всё более популярной и вызывающей научный интерес тема истории отечественной архитектуры 1930-х гг. [6–8], в том числе и её региональных вариаций [9–12].

Детального исследования по теме истории архитектуры и градостроительства Мурманска и городов Кольского Заполярья ранее не проводилось. Тема затрагивалась мало, в основном в краеведческой литературе [13, 14], в кратких обзорах местной прессы [15–17], в научных отчётах и в проектных работах ленинградских проектных организаций [18–20]. Обзор архитектуры Мурманска был представлен в работах И. А. Неруша [21, 22], в прошлом главного архитектора города (1968-1969 гг.) и области (1969-1988 гг.). В результате представляется необходимым изучение исторического архитектурного наследия Мурманска. Кроме всего прочего, тема актуальна, как неизменно актуальны без исключения все исторические исследования.

Нижняя хронологическая граница исследования — 1930-е гг., связана со временем активного архитектурно-градостроительного развития Мурманска и началом капитального строительства в городе. Верхняя граница — конец 1950-х гг., обусловлена переходом к новому этапу развития отечественной архитектуры — индустриальному домостроению.

Географические границы обусловлены территорией исторического центра Мурманска

(ограниченной зоной порта на западе, улицей Капитана Буркова и улицей Папанина на востоке, улицей Книповича на юге и улицей Папанина на севере). В статье используются современные наименования улиц.

Сформулированные положения определяют предмет исследования: ценностные характеристики исторической архитектуры Мурманска. Определена цель работы: выявить ценностные характеристики исторической архитектуры Мурманска.

Объект исследования — мурманские здания 1930-х — 1950-х гг., расположенные в историческом центре города.

Предмет и цель определили задачи исследования:

- определить этапы развития архитектуры исторического центра Мурманска в период 1930-х 1950-х гг.;
- на примере характерных объектов 1930-х 1950-х гг. дать краткий архитектурный анализ, на его основе выявить характерные черты мурманской архитектуры 1930-х 1950-х гг.;
- обобщить результаты исследования в виде заключения и кратких выводов.

Методы и материалы исследования. Методом решения поставленных в статье цели и задач являются анализ архивных документов, сравнительный анализ фотоматериалов и материалов натурного обследования. Для характеристики архитектурной ценности объектов использован метод сопоставления мурманских и ленинградских зданий рассматриваемого временного периода.

Основная часть. Возникновение за Полярным кругом такого крупного города, как Мурманск, стало следствием строительства стратегического морского порта и железной дороги на Кольском Севере в годы Первой мировой войны. Более десятилетия (1916 — 1920-е гг.) город развивался как группа рабочих посёлков стихийной застройки [23, с. 101], и только в 1930-е гг. получил первый крупный толчок к формированию архитектурного облика.

Целое десятилетие, с 1927 по 1938 гг., Кольское Заполярье входило в состав Ленинградской области, что позволило наладить между Мурманском и Ленинградом тесные культурные и экономические связи. Промышленному и экономическому развитию Севера в годы индустриализации содействовал 1-й секретарь Ленинградского обкома С. М. Киров, который осознавал стратегическое значение края [24, с. 64].

Процесс резкого роста числа городов на Кольском Севере и их архитектурноградостроительное развитие прежде всего связаны с развитием морского порта и

горнопромышленного комплекса, а также увеличением военного присутствия в регионе. В 1930-е гг. возникли новые индустриальные центры региона — Хибиногорск (Кировск) и Мончегорск. В то же время в Мурманске активно развивается рыбная промышленность, увеличивается объём грузоперевозок в порту. Как следствие, в 1938 г. город получает статус областного центра [21, с. 13].

Быстрое протекание индустриализации региона создало условия для роста застройки молодого города и стало причиной ускорения культурных процессов, что и впоследствии определило архитектурный облик города. Однако на тот момент не располагал Мурманск ресурсами, большими поэтому заказы разработку архитектурных и градостроительных проектов поступали в проектные институты Ленинграда [21, с. 13]. Именно представители ленинградской архитектурной школы являются авторами многих знаковых сооружений города (ДК им. Кирова, ДОМ специалистов, «капитанские» дома и др.).

Активный архитектурно-градостроительный процесс в Мурманске выпал на 1930-е -1950-е гг., когда культурное развитие региона централизованной протекало рамках В государственной политики. Начало 1930-х гг. было временем творческой перестройки на позиции партийных требований в области архитектуры [8, с. 81]. С середины 1930-х и до конца 1950-х гг. направление ретроспективизма становится главенствующим В архитектуре. Как и большинство городов СССР Мурманск проектировался согласно последним архитектурным тенденциям того времени. Таким архитектура образом, советского ретроспективизма стала определяющей в облике исторической части города.

По причине отсутствия развитой материально-технической базы в довоенное десятилетие в Мурманске в кирпиче строятся только номенклатурные дома и общественные здания. Капитальная застройка города велась неравномерно: среди массовой деревянной застройки появлялись точечные включения каменных зданий. Капитальное строительство велось преимущественно вдоль центральной улицы города – современного проспекта Ленина [23, с. 101 – 102].

Первый этап развития архитектуры можно отнести к концу 1920-х – первой половине 1930-х гг. – времени конструктивизма. Поскольку капитальное строительство в Мурманске началось в период смены господствующего стиля, конструктивизм здесь не получил большого распространения и представлен лишь

единичными постройками, большая часть которых к нашему времени оказалась утрачена либо реконструирована с изменением облика. В этот короткий промежуток времени появилось несколько общественно значимых сооружений, в том числе ДК им. Кирова (архитектор Н. А. Митурич, 1932 г., реконструирован в конце 1940-х гг.) и Мурманский рыбопромышленный техникум (1932 г.).

Второй этап развития мурманской архитектуры можно отнести ко второй половине 1930-х гг., связанной с переходным стилем от конструктивизма к монументальной архитектуре постконструктивизму. Этот стиль просуществовал недолго (до 1941 г.), однако осталось большое количество проектов зданий, реализованная часть которых сопоставима с архитектурным наследием авангарда [8, с. 110]. Проектирование и застройка Мурманска в довоенный период связаны с именами таких выдающихся ленинградских архитекторов, как Е. А. Левинсон, А. М. Соколов, Н. А. Митурич, В. Д. Голли, В. Ф. Овчинников, С. Е. Бровцев.

Мурманским зданиям довоенного десятилетия характерны следующие черты: преимущественно плоские и вытянутые фасады, благодаря чему активнее выявлено их горизонтальное членение, акцентуация угла здания крупным вертикальным объёмом или

элементами фасадной пластики. В декоративном оформлении фасадов использовалась небольшая обойма упрощённых классических безордерных элементов: развитые карнизы, горизонтальные пояса, аттиковый этаж, вертикали пилястр, малое количество балконов с балясинами, рустовка [24, с. 65]. В декоративном оформлении превалируют простота и ясный геометризм деталей.

Каменные здания второй половины 1930-х стали объектами, обогатившими ΓΓ. пространственную структуру проспекта Ленина. Магистраль была выделена в застройке города акцентными элементами в узловых точках [25, с. 10]. Для создания парадного облика проспекта застройку на отдельных отрезках формировали по зеркальному принципу. В итоге к концу 1930х гг., несмотря на ограниченность средств капитального строительства, архитекторам удалось задать масштаб и монументальный облик застройки проспекта.

До 1941 года проспект Ленина застраивался 5—7-этажными жилыми зданиями. Остальной город формировался как малоэтажная деревянная застройка с редкими включениями каменных зданий. Малоэтажное каменное жильё не возводили ввиду ограниченности удобных для застройки территорий [26, л. 3, 6].

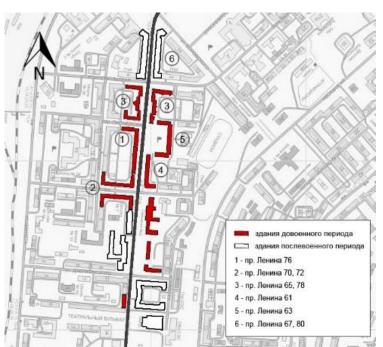


Рис. 1. Историческая застройка южного отрезка проспекта Ленина

Характерным участком довоенной застройки в исторической части города является южный отрезок (рис. 1) проспекта Ленина (между улицами Дзержинского и Комсомольской), где появились первые каменные постройки главной магистрали. Здесь были

отработаны основные композиционные приёмы, которые нашли своё применение в пространственной структуре проспекта и в послевоенное десятилетие [24, с. 65].

Первым капитальным зданием на проспекте Ленина был 5-этажный жилой дом № 76 (1934 г.)

(рис. 2). Г-образное в плане пятиэтажное здание задало масштаб всей будущей застройке проспекта и центральных кварталов города. В архитектурном решении здания ещё прослеживается сильное влияние конструктивизма. Простой, практически лишённый декора фасад усложнён пластикой конструктивных элементов: ризалиты чередуются с вертикалями балконов и лоджий [24, с. 65], угловая часть здания, выходящая на перекрёсток, акцентирована вертикальным рядом крупных лоджий.





Рис. 2. Дом № 76 и дома-пропилеи (№№ 70, 72) на пр. Ленина

Впервые приём зеркального расположения зданий в Мурманске был использован на южном отрезке проспекта при возведении «капитанских» домов (пр. Ленина, 70, 72; 1935 – 1936 гг., архитектор В. Ф. Овчинников) (Рис. 2). Композиция каждого дома построена сочетании врезанных друг в друга двух объёмов разной длины и этажности. Повышенные объёмы небольшой протяжённости установлены одной стороне проспекта, благодаря чему расположенные перекрёстке на здания одновременно играют роль доминант пропилеев - символичного парадного въезда в портовую часть города. Длинные фасады меньшей этажности организуют фронт улицы Егорова. В архитектурном решении здания заметно отличаются своей активной фасадной пластикой: балконы, размещённые в шахматном выделяют порядке, выгодно пространственной структуре проспекта. Высота доминантных зданий подчёркнута частым

вертикальным членением – пилястрами практически на всю высоту фасада [24, с. 65–66].

Другая пара домов «пропилейного» типа (пр. Ленина 65, 78; 1939 г., архитектор В. М. Оленёв) (Рис. 3), расположенных по обе стороны проспекта, составляет парадную часть застройки перед въездом на центральную площадь (пл. Пять углов) [23, с. 104]. Эти протяжённые здания, занимающие ширину целого квартала, отличаются фасадной пластикой в виде двух боковых ризалитов. Имеющиеся отступы создают зрительный эффект брандмауэрной застройки, тем самым перекликаясь с соседними кварталами. Плоские вытянутые фасады зданий разрезаны на несколько частей горизонтальными поясами и зубчатым карнизом. Нижние этажи, отданные под общественную функцию, отмечены по всей длине фасада рядом колонн и полуколонн упрощённого ордера. Лёгкую пластику плоским фасадам придают небольшие ряды французских балконов.



Рис. 3. Дом № 78 на пр. Ленина. ГАМО. Ф. Р-1342. Д. 5508

Наиболее характерным образцом архитектуры довоенного десятилетия в Мурманске является дом № 61, также известный как «дом специалиста» (1935 г.), построенный по проекту архитектора Е. А. Левинсона (рис. 4). Тяжеловесное здание обладает характерной конструктивистской композицией: акцент сделан с помощью мощной угловой лоджии с аттиком на пересечении двух прямых объёмов [27, с. 80].

Горизонталь протяжённого фасада подчёркнута широким поясом, отделяющим первый этаж, и мощным антаблементом с выраженным карнизом. Горизонтальное членение также подчёркнуто глухими ограждениями угловых лоджий, а редкие вертикали балконов создают спокойный ритм по всей длине фасада, обращённого к проспекту [24, с. 66].





Рис. 4. Дом № 61 и дом № 63 на пр. Ленина

Подхватывает масштаб «дома специалиста» расположенный по соседству дом горсовета (проспект Ленина, 63; 1937 г.) (рис. 4, 5). Даже при практическом отсутствии оформления на плоском фасаде, своей симметричной композицией и П-образной формой плана дом отсылает к классическим образцам архитектуры в переосмысленной трактовке. Стилистическое единство домов №№ 61 и 63 создаётся благодаря горизонтальным декоративным элементам фасада, условно переходящих с одного здания на другое.

Благодаря композиции трёх домов (№№ 61, 63, 65), решённой в виде прямоугольного пространственная курдонёра, структура проспекта обогатилась небольшой площадью (рис. 4, 5). Подобный стилистически единый локальный ансамбль создал контраст открытого пространства И расположенной напротив брандмауэрной застройки, а также объединяющим центром застройки проспекта довоенного десятилетия [23, с. 102]. В 1950-е гг. завершил композицию площади памятник В. И. Ленину (скульптор Н. В. Томский).



Рис. 5. Площадь-сквер на пр. Ленина. Развёртка

В довоенное десятилетие северный отрезок проспекта Ленина (Рис. 6) также был отмечен акцентами – домом Главсевморпути (№ 77, 1937 г., архитектор А. И. Суслов) и зданием военного госпиталя (№ 73, 1939 г.) (Рис. 7). Композиции зданий схожи и состоят из трёх разновысотных объёмов с акцентом на угловую башню.

В довоенное десятилетие акцентными элементами были отмечены другие улицы центра Мурманска. Самым заметным объектом за пределами пр. Ленина и нетипичным в мурманской архитектуре 1930-х гг. можно назвать кинотеатр «Родина» (ул. Ленинградская, 26; 1939 г.) (рис. 8). Здание представляет собой аналог одноимён-

ного кинотеатра в Москве (оба построены по проектам архитектора В. П. Калмыкова). Начатое незадолго до войны здание отличается от объектов довоенной архитектуры активной пластикой и богатством декоративного оформления. Главный фасад кинотеатра выделяется крупным геометричным декорированным порталом между двумя массивными башнями лестничных клеток. Боковые фасады горизонтально разбиты на три этажа. Нижний этаж был устроен высоким остеклением, разделённым опорами на секции. Второй этаж украшен восьмиугольными оконными проёмами с наличниками, на третьем устроена открытая терраса, оформленная колоннами восьмиугольного сечения. Богатство декоративного оформления делает мурманскую «Родину» самым близким из существующих аналогов столичного ки-

нотеатра. Столь активный силуэт и архитектурное решение делают здание стилистическим и пластическим акцентом в рядовой застройке городского центра.

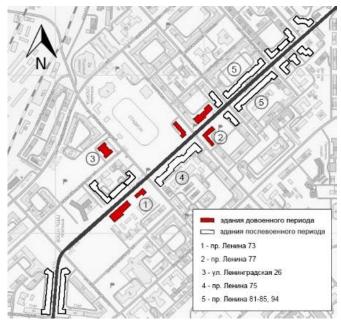


Рис. 6. Историческая застройка северного отрезка проспекта Ленина



Рис. 7. Дом № 77 и № 73 на пр. Ленина

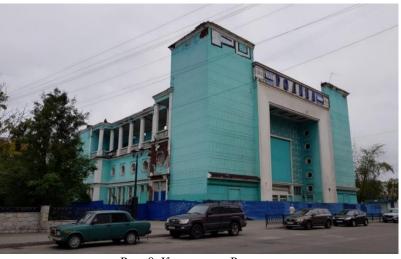


Рис. 8. Кинотеатр «Родина»

В период послевоенного десятилетия (1945 – 1955 гг.) в Мурманске развернулись масштабные восстановительные работы. Наравне с ленинградскими специалистами весомый вклад в формирование архитектурного облика исторической части города внесли местные проектные организации и архитекторы. Регулярная застройка Мурманска к концу периода постепенно обогатилась образцами неоклассической архитектуры. Новые здания сформировали рядовую застройку исторического центра, единичные объекты стали играть роль новых акцентных элементов в пространственной структуре города.

Также, как и у зданий 1930-х гг. фасады послевоенных объектов плоские и не отличаются активной пластикой, оформление минималистично, но отличается чуть большей проработкой деталей и изяществом. Набор декоративных элементов становится немного шире, на фасадах точечно появляются детали неоклассического характера: фигурные наличники, замковые камни, рустовка углов, кронштейны, сандрики, профилированные карнизы, аттики.

В проекте генерального плана 1946 г. (архитекторы А. М. Соколов, С. Е. Бровцев) особое внимание уделялось архитектурному облику Мурманска. Основой решения было использование отличительного архитектурного декора и смелого введения цвета. Такой подход был обусловлен спецификой заполярного региона: суровость климатических условий и скудность местного пейзажа. Первоначальным ориентиром в отношении архитектурных форм и цветового решения должны были стать московское зодчество XVII – XVIII вв. и элементы северно-русской архитектуры, но в современной трактовке [18, л. 100]. Однако по экономическим соображениям от этой задумки отказались: чтобы восстановить город в кратчайшие сроки, зачастую применялись типовые проекты жилых и общественных

зданий. Застройка городского центра выполнялась в неоклассических формах. Единственное решение концепции генерального плана, которое архитекторы взяли на вооружение — применение активного цветового решения фасадов.

К концу 1950-х гг. в исторической части Мурманска средняя этажность застройки установилась в пределах 4-5 этажей. Изменения были связаны с эксплуатационными расходами [26, л. 20]. Осуществлялась регулярная периметральная квартальная застройка, которая оказалась оптимальным решением в полярных условиях [26, л. 5а]. Активно велись работы по застройке северного отрезка проспекта Ленина и прилегающих кварталов. В северной части исторического центра высота застройки понижается до 2-3 этажей, поскольку жилые кварталы выполнялись по первым проектам повторного применения [26, л. 6].

На отдельных участках проспекта и основных городских улицах на неоклассических зданиях имеются редкие выступающие за плоскость фасада элементы (эркеры, балконы, реже портики и пилястры). Подобные пластические акценты увеличивает значимость объекта в структуре улицы. «Излишества» в проектировании для Мурманска не имели выраженного характера [26, л. 22], поскольку их применение считалось непрактичным в условиях Крайнего Севера.

Характерным примером такого решения могут служить два зеркально поставленных дома на южном отрезке проспекта Ленина (№ 67, № 80; 1951 г.) (рис. 9). На протяжённых фасадах создан спокойный ритм вертикалей балконов (дом № 67) и эркеров (дом № 80). Вогнутые торцевые фасады, оформленные балконами, замкнули южный конец центральной площади. С противоположного конца углы зданий решены тяжеловесными повышенными объёмами, благодаря чему проспект получил новые акценты, продолжающие тему парадного въезда на площадь.



Рис. 9. Дома №№ 67, 80 на пр. Ленина. Вид со стороны площади Пять Углов. 1957 г. ГАМО. Ф. Р-1310. Д. 2711.

Пластические акценты использовались и на северном отрезке проспекта Ленина. На перекрёстке пр. Ленина и ул. Володарского расположены дома (№ 94 и № 81-85; 1952 – 1953 гг.) (Рис. 10), где снова был использован зеркальный принцип. Несмотря на идентичное симметричное членение фасадов, вытянутые на всю длину квартала

здания имеют декоративные различия. Для преодоления монотонности протяжённые фасады дома усложнены небольшой пластикой — арочными порталами по центральной оси, а также ризалитами и вертикальными элементами (эркеры на доме 94 и балконы на доме 81-85), придающих отдельному отрезку проспекта сдержанную ритмику.



Рис. 10. Дом № 94 на пр. Ленина

Декоративное оформление отдельных послевоенных объектов отличается большей деталировкой и изяществом, что является скорее исключением. Наиболее значимым объектом проспекта стал Дом Советов (№ 75; 1949 г., архитектор А. В. Баранский) (Рис. 11). Здание выстроено по классической трёхчастной схеме и своей композицией напоминает дворцовые сооружения XIX столетия. По центру главного фасада находится ризалит с высоким аттиком, боковые ризалиты значительно ниже. Вместе со зданиями госпиталя и Главсевморпути Дом Советов создал практически симметричную композицию (Рис.

12), чем обогатил силуэт проспекта [23, с. 105]. Фасад насыщен пластическими и декоративными элементами: портиками по центральной оси каждого ризалита, пилястрами, лопатками, лепным декором. Протяжённость фасада подчёркнута несколькими поясами. Подобная деталировка делает Дом Советов стилистической доминантой северного отрезка проспекта. Также здание выделяется в окружающей застройке за счёт массивных объёмов: тяжелые пропорции с обилием декора формируют образ монументального административного сооружения.



Рис. 11. Здание Дома Советов



Рис. 12. Развёртка по пр. Ленина. Дома №№ 73, 75, 77

Применение пластических редких пространственных акцентов на главных широтных улицах города (ул. К. Маркса, ул. Профсоюзов, ул. Володарского, ул. Октябрьская, ул. Егорова) и улицах-дублёрах проспекта Ленина (ул. Шмидта, ул. Челюскинцев, ул. С. Перовской) наглядно демонстрирует иерархию магистралей в структуре города. К концу 1950-х гг. главная широтная ось Мурманска – улица Воровского, получила завершение перспективы с северного конца в виде важной стилистической доминанты и пространственного ориентира – здания железнодорожного вокзала (ул. Коминтерна, 14; 1954 г., архитекторы Н. Ф. Шимбаревич и Л. И. Коган) [23, с. 103] (Рис. 13). Малоэтажное здание на фоне высокой нейтральной жилой застройки выделяется лёгкой фасадной пластикой, заданной строгим рядом полуколонн, и симметричной композицией: центральная ось подчёркнута тройной аркадой портала и завершением в виде купола со шпилем.



Рис. 13. Вид на железнодорожный вокзал от площади Пять Углов. ГАМО. Ф. Р-1310. Д. 1762

Сравнение архитектуры Мурманска и Ленинграда в исследуемый период. Как отмечалось ранее, проектирование Мурманска велось в содействии с ленинградскими проектными организациями, и поэтому в пространственно-планировочной структуре Мурманска и Ленинграда 1930-х — 1950-х гг. имеются определённые сходства [23, с. 106—107].

Но несмотря на то, что архитектура Мурманска 1930-х – 1950-х гг. тесно связана с деятельностью ленинградских специалистов, она имеет существенные различия с архитектурой Ленинграда. Очевидно, что разница в первую очередь связана со статусом городов. При всей своей монументальности ленинградские здания (застройка Московского пр., пр. Стачек, Ивановской ул.) обладают более лёгкими пропорциями. Это связано с тем, что в архитектурном решении больший упор делался на вертикальном членении фасадов, активнее

применялась фасадная пластика (балконы, эркеры, ниши, портики, креповка). Благодаря разнообразию применяемых материалов фасады имеют более выраженную фактурность и нейтральные «земляные» цвета. Чаще применялся лепной декор с тонкой проработкой деталей.

В сравнении с Ленинградом архитектурное решение мурманских объектов, выполненных по индивидуальным проектам, выглядит сдержанно достаточно просто: фасады плоские, декоративные и выступающие за фасадную плоскость элементы не имеют ярко выраженного характера [26, л. 22]. Некоторые элементы декора (ограждения, балясины) имеют явно «типовой» характер, применение лепных декоративных вставок - скорее исключение. Менее активно применяется вертикальное членение и креповка, акцент больше сделан на горизонтальном делении, отсюда пропорции зданий кажутся тяжелее. Подобные простые архитектурные объяснить трудностью решения можно зданий эксплуатации классических недолговечностью декоративных элементов в северном климате. Применение ярких цветов в отделке штукатурных фасадов является острой необходимостью условиях «шветового голодания».

**Выводы.** В ходе краткого исследования были выделены этапы развития исторической архитектуры Мурманска:

- 1) Начальный этап (конец 1920-х начало 1930-х гг.) период появления единичных конструктивистских зданий в деревянной застройке города.
- 2) Этап постконструктивизма (середина 1930-х 1941 гг.) в этот период появляются характерные и наиболее значимые объекты в пространственной структуре Мурманска. В архитектуре города (как и СССР в целом) начинается путь освоения классического наследия, однако всё ещё остаётся сильным влияние композиционных приёмов и эстетики конструктивизма.
- 3) Послевоенный этап (1945 конец 1950-х гг.) время восстановления разрушенной в годы войны застройки и окончательного перехода к неоклассическим формам и композиционным приёмам в архитектуре города. За этот период сформировался облик исторической части Мурманска за счёт новых акцентных объектов, а также появления рядовой капитальной застройки. Столь быстрое восстановление городского центра во многом связано с использованием первых проектов повторного применения.

В статье обозначена роль ленинградских архитекторов в проектировании и строительстве Мурманска, которая заключалась прежде всего в создании оптимального и грамотного генерального плана, а также формировании парадного центра и монументального облика молодого города, соответствующего веяниям того времени.

На основе краткого архитектурного анализа характерных объектов исторического центра, формирующих пространственную структуру города, были выявлены специфичные черты архитектуры Мурманска довоенного и послевоенного десятилетий. В ходе процесса организации главного проспекта и основных улиц города с учётом затруднённых ландшафтных и неблагоприятных климатических условий сложился региональный тип лаконичной и сдержанной монументальной архитектуры, ставшей средообразующей для исторической части Мурманска. В отличие от «столичных» зданий, мурманские дома не отличаются богатой пластикой и тонкостью проработки деталей фасада. Использовались простые компо-

зиционные приёмы, максимально простые и геометризированные декоративные элементы, применялись точечное включение элементов классического декора и яркое цветовое решение на плоских фасадах. Архитектура Мурманска 1930-х — 1950-х гг. ценна именно тем, что при всей простоте решений играет ключевую роль в формировании пространственной структуры центра и исторической среды города.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Thomas Hall. Planning and Urban Growth in the Nordic Countries. E & FN Spon, 1991. 271 p.
- 2. Bente Aass Solbakken. Fra nyklassisisme til funksjonalisme i den sosiale boligbyggingen en analyse av Ilaløkken og Sinsenbyen. Hovedoppgave i kunsthistorie. Universitetet i Oslo, 2001. 88 p.
- 3. Donnely M. Architecture in the Scandinavian countries. London, 1992. 401 p.
- 4. Ole Daniel Bruun. Arkitektur i Oslo. Oslo, 1999. 312 p.
- 5. William C Miller. Nordic Modernism: Scandinavian Architecture 1890-2017. The Crowood Press, 2016. 300 p.
- 6. Селиванова А. Н. Особенности «постконструктивизма» (1932–1937) на примере жилых ведомственных домов / Ю. Л. Косенкова. Сборник «Архитектура "сталинской эпохи". Опыт исторического осмысления». М.: КомКнига, 2010. С. 112–119.
- 7. Селиванова А.Н. Изобретая «современную архитектуру»: правительственный и социальный заказ в СССР в 1930-е годы / Архитектура: наследие, традиции и новации. Материалы международной научной конференции 26-27 февраля 2019 года. М., 2019.
- 8. Селиванова А.Н. Постконструктивизм: власть и архитектура в 1930-е годы в СССР. М.: БуксМАрт, 2020. 320 с.
- 9. Самогоров В.А. Архитектурная школа Самары (Куйбышева) в 1930–1950-е годы // Социология города. 2019. № 3. С. 44–55.
- 10. Костова Е.В. Основные тенденции развития архитектуры «сталинского ампира» в Западной Сибири // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 1. С. 9–17.
- 11. Мжельский В.М. К вопросу об изменениях в стилистике советской архитектуры 1930-х годов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 4. С. 125–137.
- 12. Гурьев С.Н., Абрамова К.К. Архитектура Воронежа 1930-х годов // Архитектон: известия вузов. 2020. № 1 (69).
- 13. Киселев А. А., Тулин М. А. Улицы Мурманска. Мурманск: Кн. изд-во, 1991. 284 с.

- 14. Федоров П. В. Мурманск: краткий курс истории архитектуры / П. В. Федоров; Международный банковский институт; Научная лаборатория геокультурных исследований и разработок. СПб: Арт-Экспресс, 2020. 242 с.
- 15. Жалнин Д. Е. Сто страниц истории к 100-летию Мурманска: [коллективная монография / Дмитрий Жалнин, Владимир Семенов, Владимир Сорокажердьев и др.; газета «Вечерний Мурманск»]. Мурманск: Глобал Медиа, 2016. 195 с.
- 16. Водопьянова С.О. Мурманск в венецианском стиле // газета «Вечерний Мурманск». 2 февраля 2018.
- 17. Водопьянова С.О. Кто поселил в Мурманске белых медведей? // газета «Вечерний Мурманск». 2 марта 2018.
- 18. ЦГАНТД СПб. Ф. Р-46. Оп. 37. Д. 82. Проект Генерального плана г. Мурманска. Пояснительная записка к проекту Генерального плана г. Мурманска. ЛЕНГИПРОГОР. 1946 г.
- 19. ЦГАНТД СПб. Ф. Р-29. Оп. 21. Д. 22. Махровская А. В. Планировка и застройка сложившихся городов (строительство на новых территориях и реконструкция) Мурманск -Архангельск Пермь. Раздел: Научные повышению предложения качества планировки и застройки города Мурманска (строительство территориях на новых реконструкция), 1. ЛенНИИП часть Градостроительства. 1965 г.
- 20. ЦГАНТД СПб. Ф. Р-29. Оп. 21. Д. 23. Махровская А. В. Планировка и застройка сложившихся городов (строительство на новых территориях и реконструкция) Мурманск Архангельск Пермь. Раздел: Научные предложения по повышению качества планировки и застройки города Мурманска

- (строительство на свободных территориях и реконструкция), часть 2. Основные положения. ЛенНИИП Градостроительства. 1965 г.
- 21. Неруш И. А. Город-герой Мурманск. М.: Стройиздат, 1988. 160 с.
- 22. Неруш И. А. Города Кольского Севера: Очерк истории стр-ва и формирования городов на Кол. п-ове. Мурманск: Кн. изд-во, 1978. 108 с.
- 23. Иголкин Н. В. Ценностные характеристики исторической пространственно-планировочной структуры г. Мурманска (1920-е кон. 1950-х гг.) // Вестник БГТУ им. Шухова. 2020. №5. С. 100–112.
- 24. Иголкин Н.В. Архитектура Мурманска довоенного десятилетия. // Современные проблемы истории и теории архитектуры: материалы VI Всероссийской науч.-практ. конференции. СПб: Изд-во СПбГАСУ, 2020. С. 64–68.
- 25. Иголкин Н.В., Заварихин С.П. Специфика структуры исторического центра города Мурманска в конце 1950-х гг. // Вестник гражданских инженеров. 2019. №2 (73). С. 5–12.
- 26. ГАМО, Ф. Р956. Оп. 1. Д. 7. Доклад главного архитектора г. Мурманска «Восстановление и развитие г. Мурманска в 1945 1955 гг.» Государственному комитету Совета Министров РСФСР. Справка по планировке и застройке г. Мурманска в послевоенный период; о состоянии архитектурно-строительного дела на 1955 г.
- 27. Иголкин Н. В. Мурманск конца пятидесятых годов: структура главной магистрали города. // Современные проблемы истории и теории архитектуры: материалы IV Всероссийской науч.-практ. конференции. СПб: Изд-во СПбГАСУ, 2018. С. 76–80.

Информация об авторах

**Иголкин Никита Владимирович**, ассистент кафедры истории и теории архитектуры. E-mail: igolkin\_nikita@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Поступила 29.12.2020 г. © Иголкин Н.В., 2021

## Igolkin N.V.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering E-mail: igolkin\_nikita@mail.ru

## ARCHITECTURE OF MURMANSK IN THE 1930s-1950s

Abstract. The article is a continuation of the research devoted to the development of the spatial -planning structure of Murmansk in the 1920s – 1950s. The stages of development of architecture and the logic of its historical development are determined on the basis of an analysis of the stages of development of the urban structure, the historically established urban planning situation and the archival documents of Murmansk. The article describes the specifics and defines the stylistic features of the Murmansk architecture of the identified

periods on the example of characteristic buildings on separate segments of the main city highway — Lenin Prospekt. A brief architectural analysis of the buildings that are valuable elements of the spatial-planning structure of the historical center of Murmansk is carried out: spatial, stylistic dominants and accents, plastic accents. The objects under consideration form the planning units, the street rhythm and the building. To identify the specificity and value characteristics of Murmansk architecture, a brief comparison of the compositional techniques and stylistics of the buildings of Murmansk and Leningrad in the 1930s - 1950s is carried out. The contribution of Leningrad architects to the design of Murmansk and the formation of its spatial and planning structure and architectural appearance is noted. The article contains schematic diagrams of separate segments of the building, photographic materials, archival photographs and documents.

**Keywords:** spatial planning structure, stages of development, dominant, accent, postconstructivism, retrospectivism.

#### REFERENCES

- 1. Thomas Hall. Planning and Urban Growth in the Nordic Countries. E & FN Spon, 1991. 271 p.
- 2. Bente Aass Solbakken. Fra nyklassisisme til funksjonalisme i den sosiale boligbyggingen en analyse av Ilaløkken og Sinsenbyen. Hovedoppgave i kunsthistorie. Universitetet i Oslo, 2001. 88 p.
- 3. Donnely M. Architecture in the Scandinavian countries. London, 1992. 401 p.
- 4. Ole Daniel Bruun. Arkitektur i Oslo. Oslo, 1999. 312 p.
- 5. William C Miller. Nordic Modernism: Scandinavian Architecture 1890-2017. The Crowood Press, 2016. 300 p.
- 6. Selivanova A.N. Features of "postconstructivism" (1932–1937) on the example of residential departmental houses [Osobennosti "postkonstruktivizma" (1932–1937) na primere zhilykh vedomstvennykh domov]. Architecture of the Stalinist era. Experience of historical understanding. Moscow: KomKniga, 2010. Pp. 112–119. (rus)
- 7. Selivanova A.N. Inventing "modern architecture": government and social order in the USSR in the 1930s [Izobretaya "sovremennuyu arkhitekturu": pravitel'stvennyy i sotsial'nyy zakaz v SSSR v 1930-ye gody]. Architecture: heritage, traditions and innovations. Materials of the international scientific conference on February 26-27, 2019. Moscow. 2019. (rus)
- 8. Selivanova A.N. Postconstructivism: power and architecture in the 1930s in the USSR [Postkonstruktivizm: vlast' i arkhitektura v 1930-ye gody v SSSR]. Moscow: BuksMArt, 2020. 320 p. (rus)
- 9. Samogorov V.A. Architectural school of Samara (Kuybyshev) in the 1930–1950th [Arkhitekturnaya shkola Samary (Kuybysheva) v 1930–1950-ye gody]. Sotsiologiya Goroda. 2019. No. 3. Pp. 44–55. (rus)
- 10. Kostova E.V. The main trends in Stalinist Empire style in Western Siberia [Osnovnye tendentsii razvitiya arkhitektury stalinskogo ampira v Zapadnoi Sibiri]. Vestnik of Tomsk State

- University of Architecture and Building. 2019. Vol. 21. No. 1. Pp. 9–17. (rus)
- 11. Mzhelsky V.M. Changes in Soviet architectural styles in the 1930s [K voprosu ob izmeneniyakh v stilistike sovetskoi arkhitektury 1930-kh godov]. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2019. Vol. 21. No. 4. Pp. 125–137. (rus)
- 12. Gurev S.N., Abramova K.K. The 1930s architecture of Voronezh [Arkhitektura Voronezha 1930-kh godov]. Architecton: Proceedings of Higher Education. 2020. No. 1 (69). (rus)
- 13. Kiselev A.A., Tulin M.A. The streets of Murmansk [Ulitsy Murmanska]. Murmansk: Publishing House, 1991. 288 p. (rus)
- 14. Fedorov P.V. Murmansk: short course in the history of architecture [Murmansk: kratkiy kurs istorii arkhitektury]. St. Petersburg: Art-Express, 2020. 242 p. (rus)
- 15. Zhalnin D.E. One hundred pages of history to the 100th anniversary of Murmansk [Sto stranits istorii k 100-letiyu Murmanska]. Murmansk: Global Media Publ., 2016. 195 p. (rus)
- 16. Vodopyanova S.O. Murmansk in the Venetian style [Murmansk v venetsianskom stile]. Murmansk. Newspaper "Vecherniy Murmansk". 2 February, 2018. (rus)
- 17. Vodopyanova S.O. Who settled polar bears in Murmansk? [Kto poselil v Murmanske belyh medvedey?]. Murmansk. Newspaper "Vecherniy Murmansk". 2 March, 2018. (rus)
- 18. Central State Archive of Scientific and Technical Documentation of St. Petersburg, coll. R-46, aids 37, fol. 82. (rus)
- 19. Central State Archive of Scientific and Technical Documentation of St. Petersburg, coll. R-29, aids 21, fol. 22. (rus)
- 20. Central State Archive of Scientific and Technical Documentation of St. Petersburg, coll. R-29, aids 21, fol. 23. (rus)
- 21. Nerush I.A. The Hero-City of Murmansk [Gorod-geroy Murmansk]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 160 p. (rus)
- 22. Nerush I.A. Cities of the Kola North: Essay on the History of Construction and Development of Cities on the Kola Peninsula [Goroda Kol'skogo

Severa: Ocherk istorii stroitel'stva i formirovaniya gorodov na Kol'skom poluostrove]. Murmansk: Publishing House, 1978. 108 p. (rus)

- 23. Igolkin N.V. Value characteristics of the historical spatial planning structure of Murmansk (1920s the end of 1950s) [Tsennostnyye kharakteristiki istoricheskoy prostranstvennoplanirovochnoy struktury g. Murmanska (1920-ye konets 1950-kh gg.)]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 5. Pp. 100–112. (rus)
- 24. Igolkin N.V. Murmansk architecture of the pre-war decade [Arkhitektura Murmanska dovoyennogo desyatiletiya]. Proc. of the VI AllRussia sci.-pract. conf. "Modern problems of and theory of architecture" history ["Sovremennyeproblemy istorii i teorii arkhitektury": materialy VI Vseros. nauch.-prakt. konf.]. St. Petersburg: SPbGASU Publ, 2020. Pp. 64–68. (rus)
- 25. Igolkin N.V., Zavarikhin S. P. Specificity of the structure of the Murmansk city historical centre in the late 1950s [Spetsifika struktury istoricheskogo tsentra goroda Murmanska v kontse 1950-h gg.]. Bulletin of Civil Engineers. 2019. No. 2 (73). Pp. 5–12. (rus)
- 26. State archive of the Murmansk region, coll. R956, aids 1, fol. 7. 23 p. (rus)
- 27. Igolkin N.V. Murmansk kontsa pyatidesyatykh godov: struktura glavnoy magistrali goroda [Murmansk of the late 1950-s: the structure of the main highway of the city]. Proc. of the IV AllRussia sci.-pract. conf. "Modern problems of history and theory of architecture" [Trudy IV Vseros. nauch.-prakt. konf. "Sovremennye problemy istorii i teorii arkhitektury"]. St. Petersburg: SPbGASU Publ, 2018. Pp. 76–80. (rus)

#### Information about the authors

**Igolkin, Nikita V.**, teaching assistant. E-mail: igolkin\_nikita@mail.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Peterburg, 2-nd Krasnoarmeiskaya st., 4.

Received 29.12.2020

#### Для цитирования:

Иголкин Н.В. Архитектура Мурманска 1930-х – 1950-х гг. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 60–72. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-60-72

#### For citation:

Igolkin N.V. Architecture of Murmansk in the 1930s-1950s. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 2. Pp. 60–72. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-60-72

### ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-73-79

<sup>1</sup>Никулина Н.С., <sup>2</sup>Дмитренков А.И., <sup>3,4</sup>Никулин С.С., <sup>4,\*</sup>Власова Л.А., <sup>4</sup>Санникова Н.Ю.

<sup>1</sup>Воронежский институт повышения квалификации сотрудников ГПС МЧС России <sup>2</sup>Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова <sup>3</sup>Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина <sup>4</sup>Воронежский государственный университет инженерных технологий \*E-mail: Vllar65@yandex.ru

ПЕРСПЕКТИВА ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ А-ВИНИЛНАФТАЛИНА

Аннотация. Натуральная древесина – самый распространенный природный полимерный материал, обладающий доступностью, отсутствием токсичности и широко применяемый в различных областях промышленности и строительстве. Однако кроме неоспоримых достоинств древесине присущи и недостатки, для устранения которых ее подвергают модификации с применением органических и неорганических агентов, олигомеров и полимеров, способных защитить её от воздействия внешних факторов. В работе изучена возможность применения для модификации и защитной обработки натуральной древесины берёзы такого винилароматического мономера, как а-винилнафталин. Показано, что в процессе обработки в проводящих элементах древесины березы под воздействием повышенных температур протекает полимеризация α-винилнафталина по радикальному механизму. Однако 100 % превращения α-винилнафталина и поливинилнафталин добиться не удается. Таким образом, в проводящих элементах натуральной древесины присутствует композит, состоящий из авинилнафталина и поливинилнафталина. Показано, что с увеличением содержания предлагаемого модификатора в древесине берёзы существенно снижается водопогощение и разбухание образцов древесно-полимерно-мономерного композита. Это позволит увеличить срок службы изделий на основе модифицированной древесины. Внедрение предлагаемой технологии модификации древесины малоценных пород будет способствовать сохранению лесных ресурсов и их рациональному использованию.

**Ключевые слова:** натуральная древесина, α-винилнафталин, модификация, композит, показатели.

Введение. Древесина — это многокомпонентный природный полимерный композит. Человечество тысячелетиями использует древесину для многочисленных целей: в качестве топлива, строительного, конструкционного и поделочного материала, для изготовления мебели, бумаги и других целей [1, 2]. Это связано с тем, что древесина является уникальным возобновляемым природным сырьем.

Роль натуральной древесины, как исходного целевого продукта, в настоящее время непрерывно возрастает еще и по тому, что запасы традиционного сырья химической промышленности – угля, нефти и газа постепенно снижаются. Это определяет перспективность ее многостороннего использования, а также проведения исследований в области химии и химической технологии древесины.

Кроме неоспоримых преимуществ: высокая относительная и удельная прочность, упругость, хорошие теплоизолирующие свойства, безопасность для человека и экологичность, древесина

имеет и целый ряд недостатков: различие механических свойств в зависимости от породы, подверженность изменению формы и размера в результате набухания, усушки, коробления, наличия пороков и другие.

Снизить или даже полностью исключить вышеперечисленные недостатки возможно за счет модификации. Модифицированная древесина приобретает ряд новых свойств: повышенную прочность, водо- и влагостойкость, устойчивость к биологическому разрушению и др. в сравнении с необработанной древесиной. Это достигается за счет введения в неё химически активных веществ. Особое внимание при этом следует уделить тем модификаторам, которые при обработке получаемых композитов при повышенных температурах способны к активному химическому взаимодействию с компонентами древесины. Это позволяет снизить вымываемость модификатора из полученного древесного композита и повысить срок службы изготовленных изделий.

В литературных источниках [3–5] предлагается с целью увеличения срока службы изделий

из древесины и повышения её физико-механических показателей использовать низкомолекулярные сополимеры, полученные из отходов и побочных продуктов нефтехимии: мочевины, феноло- и мочевиноформальдегидных смол и др.

Одним из способов модификации древесных композитов является использование полимеров «in situ» [6]. Для этих целей применяют радиационную полимеризацию виниловых мономеров в древесных материалах под действием у-излучения. Полимеризация осуществляется при низких температурах и сопровождается прививкой получаемых полимеров к компонентам древесины, таким как целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин. Для модификации применяются такие мономеры как стирол, акрилонитрил, акриламид, винилацетат, гидрооксиалкилакрилаты и их смеси [7]. Модифицированные таким образом древесные композиты обладают улучшенным комплексом свойств: более однородным распределением компонентов, стабильностью размеров, повышенными прочностными показателями, водостойкостью, стойкостью к агрессивным средам.

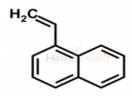
Для повышения показателей получаемых древесно-полимерных композитов в ряде случаев рекомендуется применять термическую обработку древесины [8–10], содержащей винильные мономеры и радикальный инициатор. При этом будет протекать полимеризация винильных мономеров в проводящих элементах натуральной древесины. Данный процесс можно сочетать с одновременной отгонкой растворителя, присутствующего в наполненном древесно-мономернополимерном композите.

В работе [11] в качестве модификаторов древесины рассмотрены мономерные системы такие, как гидроксиалкилакрилаты, их смеси с метилметакрилатом и 2-винил-4,4-диметил-2-оксазолин-5-оном. Улучшение свойств древесных композитов связывают с взаимным блокированием гидрофильных центров в составе древесины и полимера при образовании водородных связей. Этому также способствуют реакции внутри- и межмолекулярной этерификации с участием гидроксильных групп мономера и целлюлозы с образованием трехмерных структур.

В работах [12, 13] для получения пропиточных составов для модификации изделий, содержащих древесные компоненты, использовали два вида полимерных отходов: побочные продукты нефтехимии и отходы пенополистирола за счёт проведения их совместной деструкции. Полученные по данной технологии древесно-полимерные композиты на основе древесного сырья имели более низкие показатели водопоглощения и разбухания, а также отличались повышенными прочностными характеристиками.

Хорошие результаты даёт использование [14] для пропитки и модифицирования древесины лиственных и хвойных пород отработанных моторных масел в составе композиций, содержащих древесную муку. Это позволяет уменьшить водо- и влагопоглощение древесины, снизить её разбухание как в радиальном, так и в тангенциальном направлениях и утилизировать отходы производства.

В тоже время в литературных источниках отсутствуют сведения по использованию для модификации древесины производных нафталина, и, в частности α-винилнафталина (ВН):



На чем же базируется интерес к использованию для модификации древесины α-винилнафталина?

Это связано с тем, что нафталин и его производные недефицитны, находят широкое применение в различных промышленных отраслях: для получения красителей и взрывчатых веществ, в медицине, как инсектициды и др. [15]. В промышленности нафталин получают из каменноугольной смолы. В тоже время нафталин и его производные легко вымываются растворителями из изделий, улетучиваются при повышенных температурах. Все это снижает эффективность его действия. Интерес в этом плане представляют винильные производные нафталина. Они имеют высокую температуру кипения, в отличие от других низкокипящих мономеров, используемых для модификации древесины (стирол, акриловые соединения и др.), и, следовательно, имеют хорошие шансы остаться в проводящих элементах древесины после её высокотемпературной обработки. Полимеры ВН имеют достаточно высокую механическую прочность и теплостойкость, что может быть использовано при его применении для модификации и улучшения свойств древесины мягких пород.

Самым существенным недостатком древесины является её невысокая способность противостоять неблагоприятным факторам и разрушающим агентам. Например, при атмосферной сушке, хранении и перевозке лесоматериалов возможно поражение древесины деревоокрашивающими и плесневыми грибами, что приводит к потере товарного вида. Предохранить древесину и деревянные конструкции от преждевременного разрушения способны некоторые химические продукты, одновременно ядовитые как для грибов, так и для вредных насекомых. К таким химическим продуктам с высокими антисептическими свойствами относится и ВН. Таким образом, применение ВН позволяет комплексно решить сразу несколько задач: повысить водо- и влагостойкость древесных материалов, защитить её от биологического разрушения и продлить срок службы получаемых композитов.

Целью данной работы является изучение возможности применения для модификации древесины α-винилнафталина.

Материалы и методы. Следует отметить хорошую совместимость ВН со структурами древесины. Это связано с тем, что ВН имеет сходную природу с одним из основных компонентов древесины – лигнином, который представляет собой полимерный материал, включающий в свой состав ароматические углеводороды. Природные лигнины содержат разнообразные функциональные группы: метоксильные, гидроксильные, фенольные и алифатические, карбоксильные, карбонильные. Следовательно, возможно взаимодействие ВН со структурными группами лигнина, содержащими кратные связи.

α-Винилнафталин по своей полимеризационной способности почти в 2000 раз превышает стирол. Поэтому при термической обработке (температура 160 °C) пропитанных образцов древесины он будет подвергаться полимеризации в проводящих структурах древесины с образованием поливинилнафталина:

На поливинилнафталин в меньшей степени будут действовать вода, водные растворы солей, кислот и щелочей, а также ряд органических растворителей. Образование древесно-полимерного каркаса будет способствовать приданию изделиям не только повышенных прочностных показателей, улучшенной водо- и влагостойкости, но и предавать им антисептические свойства и повышать срок их эксплуатации.

Используемый в работе ВН получали по известной методике, приведенной в источнике [16]. С целью облегчения введения ВН в полости древесины на его основе готовили углеводородные пропитывающие растворы с использованием в качестве растворителя толуола. Образцы древесины березы выдерживали в растворах в течение 24 часов при температуре 20 °С, после чего проводили удаление толуола под вакуумом. После извлечения основной массы толуола образцы подвергали обработке при температуре 160—

165 °C в течение 5 часов. В процессе высокотемпературной обработки протекает процесс полимеризации ВН по радикальному механизму с образованием поливинилнафталина (ПВН). Однако полное превращение ВН в ПВН не достигали, поэтому в структуре древесины присутствовал модификатор в виде смеси ВН с ПВН.

Для определения влияния содержания данного композита на свойства получаемых модифицированных образцов натуральной древесины были приготовлены растворы толуола с различным содержанием модификатора (10, 30 и 50 % мас.). Содержание ВН, а точнее композита, состоящего из α-винилнафталина и поливинилнафталина (модификатора), в полученных образцах в зависимости от концентрации вводимого раствора изменялось от 10 до 26 % мас.

Основная часть. С практической и теоретической точки зрения целесообразно было определить степень превращения α-винилнафталина в поливинилнафталин в проводящих элементах древесины березы. Важность данного анализа заключалась еще и в том, что в компонентном составе древесины присутствуют фенольные соединения, способные выполнять функцию ингибиторов радикальных процессов [17]. Это должно привести к снижению конверсии ВН. Таобразом, результаты данного анализа должны показать, что нужно сделать, чтобы повысить конверсию α-винилнафталина. Повышать температуру модификации до 170 °С и выше нельзя, так как это приведет к изменениям свойств древесного вещества в получаемом композите. Следовательно, необходимо увеличить продолжительность термообработки.

Для подтверждения вышеприведенных соображений взвешенные образцы древесно-мономерно-полимерного композита с известным содержанием смеси ВН с ПВН измельчали и помещали в аппарат Сокслета [18]. Для экстракции мономерно-полимерной смеси в качестве растворителя использовали толуол. Периодическим отбором проб из колбы, содержащей толуол с экстрагированным мономерно-полимерной смесью, определяли сухой остаток. Экстракцию проводили до постоянного значения сухого остатка. После завершения экстракции проводили концентрирование полученного толуольного раствора. Выделение поливинилнафталина осуществляли путем смешения его со спиртом (соотношение толуольный раствор: спирт = 1:10). Выделяемый ПВН отделяли от раствора фильтрованием и после промывки водой сушили в сушильном шкафу до постоянной массы.

После экстракции остаток извлекали из аппарата Сокслета и удаляли толуол в сушильном шкафу. После удаления растворителя остаток взвешивали и определяли потерю массы в процентах.

Проведенными исследованиями было установлено, что конверсия  $\alpha$ -винилнафталина не превышала 60 %. Таким образом, в проводящих элементах древесины березы присутствовала смесь, состоящая примерно из 50–60 % поливинилнафталина и 40–50 %  $\alpha$ -винилнафталина.

В дальнейшем проведен цикл исследований по поведению полученных образцов модифицированной древесины в водной среде:

водопоглощение оценивали по методу, основанному на изменении массы абсолютно сухого образца способом прямого взвешивания при

непосредственной его выдержке в воде. (ГОСТ 21523.5-77);

- разбухание определяли вымачиванием в дистиллированной воде при температуре (20±5) °С до прекращения изменения размеров (ГОСТ 16483.35-88);
- сухой остаток определяли путем выпаривания навески латекса до постоянной массы с помощью инфракрасной лампы (ГОСТ 29080-91).

Экспериментальные результаты по определению водопоглощения и разбухания натуральной и модифицированной древесины березы после 1 и 30 суток нахождения в дистиллированной воде представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1 Влияние содержания α-винилнафталина в модифицированной древесине березы на водопоглощение и разбухание образцов после 1 суток выдерживания в дистиллированной воде

Показатели Натуральная Содержание о-винилнафталина древесина в модифицированной древесине, % 10,4 16,7 25,9 Водопоглощение, % 44,9 8,7 5,2 1,5 4,4 3,7 Разбухание в радиальном 5,6 2,8 направлении, % Разбухание в тангенциальном 6,4 6,8 5,3 3,6 направлении, %

Примечание: температура термообработки 160 °C, продолжительность 5 ч.

Таблица 2 Влияние содержания α-винилнафталина в модифицированной древесине березы на водопоглощение и разбухание образцов после 30 суток выдерживания в дистиллированной воде

Показатели	Натуральная древесина	1	ние α-винилна цированной др	1
		10,4	16,7	25,9
Водопоглощение, %	119,2	55,6	48.3	36,0
Разбухание в радиальном направлении, %	7,7	6,9	4,6	3,0
Разбухание в тангенциальном направлении, %	8,3	7,5	7,0	5.2

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что чем выше содержание модификатора в древесине березы, тем ниже водопоглощение и разбухание образцов древеснополимерно-мономерного композита.

Таким образом, ВН может быть использован для модификации и защитной обработки древесины мягких малоценных пород и получения древесно-полимерных композитов.

Для подтверждения того, что ВН обладает повышенной реакционной активностью, проведена контрольная проверка его полимеризационной способности при повышенных температурах. Процесс полимеризации ВН проводили в массе при температуре 190–195 °С в течение 5 часов. Полученный полимер растворяли в толуоле и высаживали в этиловом спирте. Образующийся осадок поливинилнафталина отделяли от толуольно-

спиртовой смеси и сушили в шкафу при температуре 80–85 °C. Выход ПВН составил 89,0–91,0 %.

**Выводы.** Проведенные контрольные исследования подтвердили приведенные выше сведения о том, что α-винилнафталин будет полимеризоваться в проводящих элементах древесины березы с образованием поливинилнафталина.

Полученный древесно-полимерно-мономерный композит обладает повышенной стойкостью к действию воды.

Изготовленные образцы модифицированной древесины, содержащие в матрице ВН и ПВН, обладают антисептической активностью, что должно увеличить срок эксплуатации изделий на их основе.

Нафталин и его производные не являются дефицитными и дорогостоящими продуктами и

имеют реальные перспективы для применения их в промышленных масштабах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: Изд-во: Академия. 2004. 266 с.
- 2. Шепелев А.Ф., Печенежская И.А., Туров А.С. Товароведение и экспертиза древесно-мебельных товаров. М.: Серия: Товароведение и экспертиза. Ростов-на-Дону: Изд-ва: ИКЦ «МарТ», Издательский центр «МарТ». 2004. 224 с.
- 3. Шамаев В.А. Химико-механическое модифицирование древесины. Воронеж: Изд–во Воронежской государственной лесотехнической академии. 2003. 260 с.
- 4. Расев А.И., Косарин А.А., Красухина Л.П. Технология и оборудование защитной обработки древесины. М.: Изд–во ГОУ ВПО МГУЛ. 2010. 171 с.
- 5. Расев А.И., Косарин А.А. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. М.: Изд–во ФОРУМ. 2010. 416 с.
- 6. Менсон Дж. Полимерные смеси и композиты. М.: Изд–во Химия. 1979. 440 с.
- 7. Хрулев В. М. Модифицированная древесина и ее применение. Кемерово: Кн. изд-во. 1988. 118 с.
- 8. Mathias Z.I. Improvement of wood properties with multifunctional monomers // Polym. Prepr.Amer. Chem. Soc.1990. Vol. 31.  $N_{2}$  1. Pp. 646–647.
- 9. Khan M.A. Studies of physico–mechanical properties of wood and wood plastic composite (WPC) // J. Appl. Polym. Sci, 1992. Vol. 45. № 1. Pp. 167–172.
- 10. Khan, M.A. Effect of Moisture and Heat on Mechanical Properties of Wood and Wood-Plastic Composite // Polym. Plast. Technol. and Eng. 1993. Vol. 32. № 1-2. P.5.

- 11. Никулина Н.С., Вострикова Г.Ю., Дмитренков А.И., Никулин С.С. Защитная обработка древесины олигомером из побочных продуктов производства полибутадиена, модифицированного пенополистиролом // Материалы национал. науч.-практ. конф. «Наука, образование и инновации в современном мире». Воронеж, 20-21 октября 2018 г. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I», 2018.Ч. 1. С.188–192.
- 12. Никулина Н.С., Вострикова Г.Ю., Дмитренков А.И., Никулин С.С. Применение олигомеров из побочных продуктов производства полибутадиена, модифицированного вторичным пенополистиролом для защитной обработки древесных материалов // Химия, физика и механика материалов. 2018. № 1 (16). С.23–32.
- 13. Belchinskaya L.I. Elaboration of a composition based on spent engine oil and wood flour for birch wood impregnation and railway sleepers production // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 392. 012075. International scientific and practical conference "Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions". Voronezh, 23–24 October, 2019. Voronezh, Russia (Forestry-2019). URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-
- 1315/392/1/012075/pdf. DOI: 10.1088/1755-1315/392/1/012075 (дата обращения 04.12.2020)
- 14. Доналдсон Н. Химия и технология соединений нафталинового ряда. М.: Изд–во «ГНТИХЛ». 1963. 656 с.
- 15. Колесников Г.С. Синтез винильных производных ароматических и гетероциклических соединений. М.: Изд-во «АН СССР». 1960. 303 с.
- 16. Трегубова И.А., Косолапов В.А., Спасов А.А. Антиоксиданты: Современное состояние и перспективы // Успехи физиологических наук. 2012. Т. 43. № 1. С. 75–94.
- 17. Воскресенский П.И. Техника лабораторных работ. М.: Изд-во «Химия». 1969. 701с.

#### Информация об авторах

**Никулина Надежда Сергеевна**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры специальной подготовки E-mail: noodi-on-sky@mail.ru. Воронежский институт повышения квалификации сотрудников ГПС МЧС России. Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, д. 231.

**Дмитренков Александр Иванович**, кандидат технических наук, доцент кафедры химии. E-mail: aurika44@mail.ru.. Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. Россия, 394613, г. Воронеж, ул. Тимирязева 8.

**Никулин Сергей Саввович,** доктор технических наук, профессор кафедры технологии органических соединений, переработки полимеров и техносферной безопасности. E-mail: nikulin.nikuli@yandex.ru. Воронежский государственный университет инженерных технологий. Старший научный сотрудник военного учебно-научного центра военно-воздушных сил. Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина. Россия, 394036, Воронеж, Революции проспект, 19.

**Власова Лариса Анатольевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии органических соединений, переработки полимеров и техносферной безопасности. E-mail: vllar65@yandex.ru. Воронежский государственный университет инженерных технологий. Россия, 394036, Воронеж, Революции проспект, 19.

Санникова Наталья Юрьевна, кандидат химических наук, доцент кафедры технологии органических соединений, переработки полимеров и техносферной безопасности. E-mail: cnu@inbox.ru. Воронежский государственный университет инженерных технологий. Россия, 394036, Воронеж, Революции проспект, 19.

Поступила 01.12.2020 г.

© Никулина Н.С., Дмитренков А.И., Никулин С.С., Власова Л.А., Санникова Н.Ю., 2021

## <sup>1</sup>Nikulina N.S., <sup>2</sup>Dmitrenkov A.I., <sup>3,4</sup>Nikulin S.S., <sup>4</sup>Vlasova L.A., <sup>4</sup>Sannikova N.Yu.

<sup>1</sup>Voronezh Institute of advanced training of employees of the Ministry of emergency situations of Russia <sup>2</sup>Voronezh state forest engineering University named after G. F. Morozov <sup>3</sup>VVS air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin <sup>4</sup>Voronezh state University of engineering technologies \*E-mail: Vllar65@yandex.ru

## THE PROSPECT OF USING A-VINYLNAPHTHALENE FOR MODIFICATION OF WOOD MATERIALS

**Abstract.** Natural wood is the most common natural polymer material that is affordable, non-toxic and widely used in various fields of industry and construction. However, wood also has disadvantages, to eliminate which it is modified with the use of organic and inorganic agents, oligomers and polymers that can protect it from external factors. The paper studies the possibility of using such a vinylaromatic monomer as  $\alpha$ -vinylnaphthalene for modification and protective treatment of natural birch wood. It is shown that during processing in the conductive elements of birch wood under the influence of elevated temperatures, the polymerization of  $\alpha$ -vinyl naphthalene proceeds by a radical mechanism. However, 100 % conversion of  $\alpha$ -vinylnaphthalene and polyvinylnaphthalene cannot be achieved. Thus, the conductive elements of natural wood contain a composite consisting of  $\alpha$ -vinyl naphthalene and polyvinyl naphthalene. It is shown that with an increase in the content of the proposed modifier in birch wood, water absorption and swelling of wood-polymer-monomer composite samples significantly decreases. This will increase the service life of products based on modified wood. The introduction of the proposed technology for modifying low-value wood species will contribute to the conservation of forest resources and their rational use.

**Keywords**: natural wood, α-vinyl naphthalene, modification, composite, indicators.

#### **REFERENCES**

- 1. Ugolev B.N. Wood Science and forest commodity science [Drevesinovedenie i lesnoe tovarovedenie]. M.: publishing house: Academy. 2004. 266 p. (rus)
- 2. Shepelev A.F., Pechenezhskaya I.A., Turov A.S. Commodity science and expertise of wood and furniture products [Tovarovedenie i ekspertiza drevesno-mebel'nyh tovarov]. Rostov-on-don: publishing house: ICC "March", Publishing center"March". 2004. 224 p. (rus)
- 3. Shamaev V.A. Chemical and mechanical modification of wood [Himiko-mekhanicheskoe modificirovanie drevesiny]. Voronezh: publishing house of the Voronezh state forestry Academy. 2003. 260 p. (rus)
- 4. Rasev A.I., Kosarin A.A., Krasukhina L. P. Technology and equipment of protective wood pro-

- cessing [Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovanie drevesiny]. Moscow: publishing house of GOU VPO MGUL. 2010. 171 p. (rus)
- 5. Rasev A.I., Kosarin A.A. Hydrothermal treatment and preservation of wood [Polimernye smesi i kompozity]. Moscow: FORUM publishing house. 2010, 416 p. (rus)
- 6. Manson J. Polymer mixtures and composites [Modificirovannaya drevesina i ee primenenie]. M.: publishing house Chemistry. 1979. 440 p. (rus)
- 7. Khrulev V.M. Modified wood and its application [Modificirovannaya drevesina i ee primenenie]. Kemerovo: KN. Publishing. 1988. 118 p. (rus)
- 8. Mathias Z.I. Improvement of wood properties with multifunctional monomers Polym. Prepr. Amer. Chem. Soc.1990. Vol. 31. № 1. Pp. 646–647.
- 9. Khan M.A. Studies of physico–mechanical properties of wood and wood plastic composite (WPC). J. Appl. Polym. Sci. 1992. Vol. 45. № 1. Pp. 167–172.

- 10. Khan M.A. Effect of Moisture and Heat on Mechanical Properties of Wood and Wood-Plastic Composite. Polym. Plast. Technol. and Eng. 1993. Vol. 32. № 1-2. P.5.
- 11. Nikulina N.S., Vostrikova G.Yu., Dmitrenkov A.I., Nikulin S.S. Protective treatment of wood with an oligomer from by-products of polybutadiene production modified with expanded polystyrene [Zashchitnaya obrabotka drevesiny oligomerom iz pobochnyh produktov proizvodstva polibutadiena, modificirovannogo penopolistirolom]. "Science, Education and Innovation in the modern world". Voronezh, October 20-21, 2018 Voronezh: Publishing house of the Voronezh state agrarian University named after Emperor Peter I", 2018. CH. 1. Pp. 188–192. (rus)
- 12. Nikulina N.S., Vostrikova G.Yu., Dmitrenkov A.I., Nikulin S.S. Application of oligomers from by-products of polybutadiene production modified with secondary expanded polystyrene for protective treatment of wood materials [Primenenie oligomerov iz pobochnyh produktov proizvodstva polibutadiena, modificirovannogo vtorichnym penopolistirolom dlya zashchitnoj obrabotki drevesnyh materialov]. Chemistry, physics and mechanics of materials. 2018. No. 1 (16). P. 2332. (rus)
- 13. Belchinskaya L.I. Elaboration of a composition based on spent engine oil and wood flour for

- birch wood impregnation and railway sleepers production. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 392. 012075. International scientific and practical conference "Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions". Voronezh, 23–24 October 2019, Voronezh, Russia (Forestry-2019). URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-
- 1315/392/1/012075/pdf. DOI: 10.1088/1755-1315/392/1/012075 (date of access 04.12.2020)
- 14. Donaldson N. Chemistry and technology of naphthalene series compounds [Himiya i tekhnologiya soedinenij naftalinovogo ryada]. Moscow: publishing house "GNTIKHL". 1963. 656 p. (rus)
- 15. Kolesnikov G. S. Synthesis of vinyl derivatives of aromatic and heterocyclic compounds [Sintez vinil'nyh proizvodnyh aromaticheskih i geterociklicheskih soedinenij]. Moscow: publishing house of the USSR Academy of Sciences. 1960. 303 p. (rus)
- 16. Tregubova I. A., Kosolapov V. A., Spasov A. A. Antioxidants: Current state and prospects [Antioksidanty: Sovremennoe sostoyanie i perspektivy]. Uspekhi fiziologicheskikh nauk. 2012. Vol. 43. No. 1. Pp. 75-94. (rus)
- 17. Voskresensky P. I. Technique of laboratory work [Tekhnika laboratornyh rabot]. Moscow: publishing house Chemistry. 1969. 701c. (rus)

Information about the authors

**Nikulina**, **Nadezhda S.** PhD, senior lecturer E-mail: noodi-on-sky@mail.ru. Voronezh Institute of qualification improvement of employees of state fire service of EMERCOM of Russia. 231 Krasnoznamennaya str., Voronezh, 394052, Russia.

**Dmitrenkov, Alexander I.** PhD, Assistant professor. E-mail: aurika44@mail.ru.Voronezh state forestry engineering University named after G. F. Morozov. 8 Timiryazev str., Voronezh, 394613, Russia.

**Nikulin, Sergey S.** DSc, Professor. E-mail: nikulin.nikuli@yandex.ru. Voronezh State University of Engineering Technologies. Military training and research center of the air force "air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Gagarin. Russia, 394036, Voronezh, Revolution Avenue, 19.

**Vlasova, Larisa A.** PhD, Assistant professor. E-mail: vllar65@yandex.ru. Voronezh State University of Engineering Technologies. Russia, 394036, Voronezh, Revolution Avenue, 19. Voronezh state University of engineering technologies. 19 Revolyutsii Prospekt, Voronezh, 394036, Russia.

**Sannikova, Natalia Yu.** PhD, Assistant professor. E-mail: cnu@inbox.ru. Voronezh state University of engineering technologies. 19 Revolyutsii Prospekt, Voronezh, 394036, Russia.

Received 01.12.2020

#### Для цитирования:

Никулина Н.С., Дмитренков А.И., Никулин С.С., Власова Л.А., Санникова Н.Ю. Перспектива применения для модификации древесных материалов α-винилнафталина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 73–79. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-73-79

#### For citation:

Nikulina N.S., Dmitrenkov A.I., Nikulin S.S., Vlasova L.A., Sannikova N.Yu. Perspective of application for modification of wood materials the  $\alpha$ -vinylnaphthalene. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 2. Pp. 73–79. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-73-79

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-80-88

#### Ягрушкина И.Н., \*Дюльдина М.В., Ногачев А.Г., Якунин К.П.

Самарский государственный технический университет \*E-mail: dyuldina-marija@rambler.ru

#### РАЗРАБОТКА СОСТАВА УДАРОПРОЧНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ АБС/ПК ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**Аннотация.** Все более и более широкое применение в российской автомобильной промышленности находят полимерные и композиционные материалы. Российский рынок полимерных материалов для автокомпонентов характеризуется недостаточно развитым производством некоторых видов таких материалов. И, как следствие, применением импортных материалов.

Одними из инновационных материалов для автомобилестроения являются стирольные пластики. Использование их в автомобиле позволяет повысить привлекательность продукта для покупателей. Применение данного вида пластиков позволяет создать новый облик автомобиля. Это касается как интерьера, так и экстерьера.

Целью данной работы являлась разработка состава полимерной композиции на основе АБС-пластика из отечественного сырья. Кроме того, новая смесевая композиция должна заменить импортные смесевые композиции или содержать минимальное количество импортных составляющих композиции, что значительно снизит себестоимость изделий и, соответственно, автомобиля.

В статье был проведен анализ применяющихся полимерных материалов в автомобильной промышленности. Выявлены недостатки применения данных материалов в чистом виде. Произведен подбор компонентов состава ударопрочного материала с отработкой его рецептуры. Разработан состав ударопрочной полимерной композиции на основе АБС-пластика и ПК, не уступающий по комплексу свойств импортному материалу. Исследовано влияние состава АБС-пластика, различных марок поликарбоната, их соотношения в полимерном композиционном материале на физико-механические и технологические свойства полученного состава.

Показано, что лучшим комплексом свойств обладает материал на основе AБС-пластика марки 2020-30 и поликарбоната ПК-3С при соотношении компонентов 70 %:30 %.

**Ключевые слова:** АБС-пластик, поликарбонат, физико-механические свойства, технологические свойства, применение.

Введение. Прогресс в области технологии получения изделий из пластмасс и успехи химии открывают сегодня новые возможности для автомобилестроения. Анализ перспектив использования в моделях современных автомобилей новых материалов показывает, что доля полимерных материалов составляет от 50 до 75 % от массы автомобиля [1]. Интенсивное внедрение пластмасс объясняется ценными физико-механическими свойствами и простой технологией переработки [2]. В последнее время широкое применение в автомобилестроении получили смесевые полимерные материалы. Преимуществами таких материалов являются высокая ударная вязкость: большая, чем у металлов и сплавов, а так же стойкость против камней и щебня, что способствует повышению долговечности и улучшению эксплуатационных характеристик автомобиля. Кроме того, пластмассовые изделия обладают большей стойкостью против коррозии. Поэтому замена металлических деталей и узлов на пластмассовые является одним из перспективных направлений в отечественном и зарубежном автомобилестроении [3]. В настоящее время для производства деталей внутренней облицовки используются дорогостоящие импортные полимерные материалы, например. В зарубежном машиностроении широкое применение нашли такие смесевые композиции как PROLOY (ф. «Borg Werner»; CIIIA), ZICOLOY (ф. «Mobay»; CIIIA), NORILI (φ. «GEP»; CIIIA), BAYBLEND (φ. «Bayer»; Германия). Перечисленные материалы используются при производстве деталей интерьера и экстерьера автомобилей таких фирм, как «Дженерал Моторс» (США), «Фиат» (Италия), «Тойота» (Япония) и т. д. [4] Для производства перспективных автомобилей ВАЗ применяются следующие импортные смесевые композиции: NORIL и BAYBLEND. NORIL и BAYBLEND представляют собой композиционные материалы, состоящие из полифениленоксида и полиамида, и АБС-пластика и поликарбоната, соответственно [5]. Материалы обладают хорошими физико-механическими и технологическими свойствами, могут применяться для производства решеток радиатора, облицовки наружного зеркала, стойки багажника и других деталей автомобиля. Недостатком, сдерживающим применение данных материалов, является необходимость закупки по импорту и, соответственно, высокая стоимость [6]. Цель данной работы заключается в разработке материала из отечественного сырья, который по комплексу свойств являлся бы аналогом материала BAYBLEND марки KV2-1473. Замена импортного сырья на отечественное позволит существенно снизить себестоимость перспективных моделей автомобилей.

**Материалы и методы.** В качестве основы смесевой композиции использовали АБС-пластик марки 2020-30 и поликарбонат марки ПК-

3С. В состав композиции добавляли модификатор ОКД и термостабилизатор. Состав полученной композиции в процентном соотношении представлен в таблице 1. Композиционный материал получали путем смешения необходимых компонентов на лабораторном двухчервячном смесительном экструдере с последующим гранулированием.

Таблица 1

#### Состав полученной смеси, %

N п/п	Наименование компонента	Содержание, %
1	АБС-пластик	68,8
2	Поликарбонат	29,48
3	Модификатор ОКД	0,98
4	Термостабилизатор	0,74

В модельном составе содержание поликарбоната составляет 70 %. В связи с тем, что поликарбонат является импортным материалом, считается целесообразным с целью снижения стоимости состава уменьшить его долю в композиционном материале. При этом получить состав со свойствами удовлетворяющими основным показателям требований ТУ. Содержание АБС-пластика изменяли от 0 до 100 %. Температура массы по зонам цилиндра 260-280 °C, число оборотов шнека от 100 до 300 об/мин. Для определения физико-механических, теплофизических и технологических свойств полученных композиций отливали стандартные образцы на литьевой машине МиниТПА100. Были отлиты стандартные образцы типа «лопаточка» по ГОСТ 11262-80 размером  $150 \times 10 \times 4$  мм для испытаний на растяжение; образец в форме бруска размером 80×10×4 мм для испытаний на ударную вязкость по Шарпи, образец по ГОСТ 15065-69 для определения температуры размягчения по Вика.

Основная часть. В условиях жесткой конкуренции на мировом рынке автомобилей и возрастающими потребительскими требованиями необходимо освоение и внедрение новых конструкционных пластмасс. Проблема создания новых полимерных материалов ведется в трех направлениях [7]:

- 1. Синтез новых полимеров с заданными свойствами.
- 2. Оптимизация технологических режимов процесса формования изделий, а также выбор оптимальной конструкции изделий для конкретных условий эксплуатации.
- 3. Физико-механическая модификация, включая комбинирование различных полимеров, а также наполнение и пластификацию.

Анализ развития этих направлений показывает, что по первому направлению существует

много трудностей, заключающихся в поиске исходных мономеров и способов синтеза новых полимеров, а также в организации новых производств, что требует больших материальных затрат [8].

В связи с этим два последних направления наиболее целесообразны. Причем второе направление имеет определенные недостатки вследствие ограничений возможности регулирования параметров при конструировании изделий и их оформлении [9]. Поэтому возможность рационального использования и улучшения свойств полимерных композиционных материалов путем комбинирования традиционных полимеров имеет принципиально приоритетное значение [10].

К числу наиболее распространенных в автомобилестроении отечественных материалов относятся АБС-пластик, полиамиды и полипропилен.

АБС-пластик применяется в качестве обивочного материала для изготовления деталей салона, окон и других. Некоторые марки АБС-пластика применяются для наружных деталей (решетка радиатора, облицовка стойки окна) [11].

Однако, из-за недостаточной теплостойкости и атмосферостойкости АБС-пластик более широкого применения не находит. Перспективы применения данного материала связываются в основном с его использованием в составе смесей с другими полимерами, такими как ПВХ, поликарбонат и т. д. [12]

Полиамиды представляют собой гетероцепные полимеры линейного строения, содержащие в основной цепи амидные группы [13].

Главными преимуществами полиамидов являются механическая прочность, хорошие электроизоляционные и антифрикционные свойства,

стойкость к маслам и органическим растворите-Детали из полиамида выдерживают нагрузки близкие к нагрузкам, допустимым для цветных металлов и сплавов [14]. По износостойкости детали из данного материала значительно превосходят фторопласт, полиформальдегид и поликарбонат. Однако, в отличие от других материалов, полиамид обладает несколько большей способностью к влагопоглощению, при этом после кондиционирования образцов во влажной атмосфере ухудшаются ударопрочные характеристики материала, что наблюдается и при отрицательных температурах [15]. Поэтому использование полиамида в чистом виде для изготовления конструкций, работающих во влажных условиях и при отрицательных температурах, ограничено. Для повышения качества полиамида необходима его модификация [16].

В настоящее время лидером среди пластиков, применяемых в автомобилестроении, благодаря хорошо сбалансированным физическим свойствам и низкой цене является полипропилен [17].

Полипропилен является универсальным недорогим материалом для автомобильных деталей, обладающих рядом ценных свойств:

- -высокой химической стойкостью;
- -отсутствием влагопоглощения;
- -высокой кристалличностью и жесткостью;
- -низкой плотностью.

Все эти качества являются следствием его химической природы, из которой вытекает и ряд проблем, связанных с его использованием: низкая стойкость к царапанию, плохая окраска и адгезия к полярным компонентам, высокая усадка [18].

В настоящее время накоплен значительный опыт по преодолению этих проблем (т. е. модификации полипропилена), позволяющий широко использовать данный материал для изготовления

деталей системы отопления автомобиля, бамперов и других деталей экстерьера, облицовочных и крупногабаритных деталей салона автомобилей и изделий технического назначения [19].

Из сказанного выше следует, что отечественные полимерные материалы обладают рядом недостатков, которые ограничивают применение данных материалов в чистом виде. Поэтому для производства конкурентоспособных автомобилей семейства ВАЗ необходима разработка нового смесевого материала [20]. Разрабатываемый материал должен обладать высокими ударопрочными, технологическими и теплофизическими свойствами, а также иметь широкую область применения. Кроме того, новая смесевая композиция должна заменить импортные смесевые композиции или содержать минимальное количество импортных составляющих композиции, что значительно снизит себестоимость изделий и, соответственно, автомобиля [21].

Для изготовления деталей интерьера автомобиля, таких как каркас панели приборов, облицовка порога, должны применяться материалы, обладающие высокой ударопрочностью.

Из всех многочисленных показателей, принятых для оценки качества полимеров, основными являются прочность и теплостойкость. Корпус автомобиля испытывает большие нагрузки за счет градиента между температурой внутри салона и температурой окружающей среды, поэтому материал должен быть стойким к таким видам воздействия. Кроме того, детали автомобиля не должны разрушаться при высоких ударных и динамических нагрузках. Следовательно, выбор материала обуславливает его соответствие указанным показателям.

Для изготовления каркаса панели приборов, облицовки порога для перспективных автомобилей ВАЗ используются материалы со следующими показателями свойств (табл. 2)

Таблица 2 Характеристики материалов, используемых для перспективных автомобилей ВАЗ

N п/п	Свойство	Значение
1	ПТР, г/10 мин	9–18
2	б <sub>t</sub> не менее	50 MΠa
3	б <sub>р</sub> не менее	45 MΠa
4	ε <sub>р</sub> не менее	50 %
5	а к образца с надрезом при 23 °C не менее	30 кДж/м <sup>2</sup>
6	$T_{\scriptscriptstyle  m R}$	95–180 °C

В настоящее время для производства подобных деталей в зарубежном и отечественном автомобилестроении используются материалы NO-RIL и BAYBLEND. NORIL IN120 отличается высокой прочностью при растяжении 54 МПа, высокой теплостойкостью по Вика 215 °C, однако материал имеет невысокую ударную вязкость по

Шарпи 15 кДж/м<sup>2</sup>, у образца с надрезом, что вынуждает к поиску материала с более высокими ударопрочностными свойствами.

В отличие от NORIL IN120 материал BAY-BLEND полностью отвечает предьявляемым требованиям и по своим показателям соответствует условиям работы рассматриваемых изделий. Материал обладает хорошими прочностными свойствами:  $O_t$  составляет 58 МПа. Ударная вязкость по Шарпи удовлетворяет требованиям, предъявляемым к материалам, предназначенным для изготовления каркаса панели приборов, облицовки порога и соответствует 35 кДж/м², температура размягчения по Вика 140 °C.

Были получены композиции поликарбоната с АБС-пластиком марки 1106-30. АБС-пластик данной марки имеет состав (массовые доли):

- полибутадиеновый каучук 22;
- нитрилакриловой кислоты -20,6;
- стирол 57,4;

- ионол - 0.4.

Все полученные композиции независимо от условий получения и количества вводимого модификатора АБС-пластика имели хрупкий характер разрушения, вероятно за счет большого содержания стирола в АБС 1106-30.

Повышение ударопрочности достигается за счет каучука. С целью определения содержания каучука в импортных материалах такого типа была выполнена расшифровка этих материалов. При этом определялось соотношение акрилонитрильной, бутадиеновой и стирольной фаз. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3 Состав полимеров АБС в импортном и отечественном смесевом материале ПК/АБС

N п/п	Ognozov	Состав в соотношении		
IN 11/11	Образец	акрилонитрил	бутадиен	стирол
1	60 % ПК+40 %АБС	1	1	15,9
2	BAYBLEND T45M	1	4,5	21,3
3	BAYBLEND T85M	1	2,6	14,2
4	BAYBLEND KV2-1473	1	4.1	16.2

Из таблицы 3 видно, что сополимеры АБС, вводимые в поликарбонат, отличаются более высоким содержанием каучука. Это означает, что для создания смесевых материалов на основе поликарбоната применяются специальные марки АБС. При том, чем меньше содержится поликарбоната, тем больше каучука содержит вводимый АБС-пластик.

Отечественные марки АБС содержат от 1 до 26 % каучуковой фазы. На основании выполненных исследований была разработана специальная марка АБС, в которой содержание каучука (полибутадиена) заложено на уровне 70–80 %, т. е. в 3-4 раза выше, чем у выпускаемых марок.

В качестве модельного состава для последующего подбора марки АБС-пластика и поликарбоната использовался состав 30 % АБС и 40 % ПК.

Большое значение для переработки термопластов имеет термостабильность расплавов. Термостабильность оценивается временем, в течение которого индекс расплава изменяется на 15 % от первоначального. При изучении импортных материалов установлено, что период термостабильности этих материалов более 40 минут [22]. Для смесей, изготовленных с применением отечественных марок АБС, термостабильность составляет 16–20 минут.

По результатам проведенных исследований была разработана смесь на основе ПК и АБС 2020-30. При разработке смесевого материала большое значение имеет и правильный выбор марки поликарбоната. Для этого были приготовлены и испытаны смеси с содержанием поликарбоната следующих марок: ПК-2С; ПК-3С; Lexan; ПК-2H; ПК-4.

Результаты испытаний приведены в таблице 4.

По данным таблицы 4 можно сделать вывод, что для производства композиционного материала АБС/ПК наиболее пригодной является марка ПК-4. Однако, ПК-2С и ПК-3С по стоимости наиболее доступны.

Таблица 4

Свойства композиций на основе ПК и 30 % АБС 2020-30

N	Показатель			Марка 1	ТК		
п/п		норма по ТУ	ПК-2С	ПК-3С	Lexan	ПК-2Н	ПК-4
1	Показатель текучести расплава при 260 °С и $P=5~{\rm kr},~{\rm r}/10~{\rm мин}$	Не менее 9	12	14	13	14,4	15
2	Предел текучести при растяжении, МПа	Более 50	54	60	53	61	62
3	Относительное удлинение при разрыве, %	Более 50	96	55	54	50	53
4	Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м², v-надрез при 22 °C	30	45	35	30	34	37
5	Теплостойкость по Вика, °С	Более 130	137	137	136	135	133

При использовании ПК-2С у смесевой композиции наблюдается максимальное значение ударной вязкости. Показатель текучести расплава у смеси на основе ПК-3С выше, чем у композиции на основе ПК-2С. Кроме того, ПК-3С превосходит ПК-2С по критериям оценки, поэтому для получения композиционного материала АБС/ПК следует применять поликарбонат марки ПК-3С.

Таким образом, установлено, что для получения материала, применяемого для изготовления каркаса панели приборов и облицовки порога и обладающего свойствами, аналогичными свойствам BAYBLEND, следует использовать АБСпластик марки 2020-30 и поликарбонат марки ПК-3С.

Сравнительный анализ композиции смесевого материала ПК/30 % AБС с импортным аналогом представлен в таблице 5.

Таблица 5 Сравнение композиции смесевого материала ПК/30 % АБС с импортным аналогом

N	Показатель свойств	Норма по	Отечествен	ный АБС/ПК	Байбленд
п/п		ТУ	Черный	Серый	KV2-1473
1	ПТР при T=260 °C, Р=5 кг, г/10 мин	9–18	10	13,7	13
2	Предел текучести при растяжении, МПа	Более 50	55	55	58
3	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	Не менее 45	46	45	45
4	Относительное удлинение при разрыве, %	Более 50	53	56	56
5	Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м <sup>2</sup> , образец с надрезом при 20 °C	30	33	33	35
6	Температура размягчения по Вика, °С	95-180	139	138	136

Как показывают данные таблицы 5, полученный композиционный материал по своим свойствам не уступает импортному аналогу и соответствует требованиям, предъявляемым к материалам, предназначенным для производства каркаса панели приборов и облицовки порога. Получен качественный материал, но с меньшей стои-

мостью. Организация производства данной композиции целесообразна даже при закупке поликарбоната по импорту.

Композиционный материал получали путем смешения необходимых компонентов на лабораторном двухчервячном смесительном экструдере с последующим гранулированием (табл. 6).

Таблица 6

Состав композиционного материала, %

N п/п	Наименование компонента	Содержание, %
1	АБС-пластик	68,8
2	Поликарбонат	29,48
3	Модификатор ОКД	0,98
4	Термостабилизатор	0,74

В модельном составе содержание поликарбоната составляет 70 %. В связи с тем, что поликарбонат является импортным материалом, считается целесообразным с целью снижения стоимости состава уменьшить его долю в композиционном материале. При этом получить состав со свойствами удовлетворяющими основным показателям требований ТУ. Содержание АБС-пластика изменяли от 0 до 100 %. Температура массы по зонам цилиндра 260–280 °С, число оборотов шнека от 100 до 300 об/мин.

Для определения физико-механических, теплофизических и технологических свойств полученных композиций отливали стандартные образцы на литьевой машине МиниТПА100.

Были отлиты стандартные образцы типа «лопаточка» по ГОСТ 11262-80 размером  $150\times10\times4$  мм для испытаний на растяжение; образец в форме бруска размером  $80\times10\times4$  мм для испытаний на ударную вязкость по Шарпи, образец по

ГОСТ 15065-69 для определения температуры размягчения по Вика.

По результатам испытаний десяти образцов рассчитывалось среднее значение показателя свойства. Результаты испытаний приведены в таблице 7.

**Выводы.** На основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что увеличение содержания АБС-пластика приводит к увеличению показателя текучести расплава от 1,3 до 13,0 г/10 мин. Максимальное значение данного показателя наблюдается у композиции, содержащей 70 % АБС 2020-30.

Как показали испытания по ГОСТ полученных образцов, задача уменьшения содержания поликарбоната в двойной смеси была успешно решена. Получен материал, содержащий лишь 30 % импортного ПК-3С и 70 % АБС-пластика 2020-30.

Содержание АБС 2020-30, % N Наименование показателя 70 0 40 100  $\Pi/\Pi$ 20 60 Показатель текучести расплава при T=260 °C, P=5 1 1,3 3,7 8,0 9,2 13,0 5,0 кг, г/10 мин 2 Предел текучести при растяжении, МПа 59 55 50 45 56 40 60 3 Разрушающее напряжение при растяжении, МПа 51 46 44 39 47 36 61 Относительное удлинение при разрыве, % 120 90 73 84 2,5 66 54 Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м<sup>2</sup>, образец с 5 24 24 34 30 22 25 16 надрезом при 20 °C

152

148

142

Свойства смеси АБС/ПК в зависимости от содержания АБС 2020-30

Одновременно проводились исследования по возможности введения в состав композиции в процессе экструзии добавки в виде олигокарбомида (ОКД) в количестве 1 %. Было установлено, что в композиции АБС/30 % ПК ударная вязкость по Шарпи у образца с надрезом при 23 °С увеличивается с 25 кДж/м² до 35 кДж/м². Теплостойкость по Вика при этом остается на прежнем уровне.

Температура размягчения по Вика, °С

Таким образом, при использовании добавки ОКД (1 %) смесевая композиция, содержащая 70 % АБС-пластика, полностью соответствует требованиям, предъявляемым к разрабатываемому материалу, и может применяться для производства деталей интерьера перспективных автомобилей ВАЗ. Кроме того, достаточно высокие ударопрочностные свойства данной композиции позволяют применять ее и для производства некоторых деталей экстерьера.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Дорожное хозяйство России. Цифры и факты: справ.: М.: Минтранс России. Фед. дор. агентство. 2010. С. 18–26.
- 2. О нормативах финансовых затрат и Правилах расчета размера бюджетных ассигнований федерального бюджета на капитальный ремонт, ремонт и содержание автомобильных дорог федерального значения: постановление Правительства от 30 мая 2017 г. № 658 // Собрание законодательства РФ. М., 2017. № 23. Ст. 354.
- 3. Solanki P., Zaman M. Microstructural and mineralogical characterization of clay stabilized using calcium-based stabilizers // Scanning electron microscopy. 2012. № 38. Pp. 771–798.
- 4. Егоров Г.В., Андреева А.В., Буренина О.Н. Укрепление местных грунтов стабилизатором при строительстве автомобильных дорог в условиях Севера // Дороги и мосты. 2013. № 1(29). С. 21–28.
- 5. Строкова В.В., Карацупа С.В., Лютенко А.О. Грунтобетоны на основе техногенного сырья КМА для строительства автомобильных дорог: монография. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2006. 172 с.

6. Панков П.П. и др. Применение комплексного метода стабилизации грунта для получения дорожных грунтобетонов // Сб. статей Международной научной конференции «Технические и естественные науки». Санкт-Петербург, 27-31 октября 2018 г. Санкт-Петербург: Изд-во ГНИИ «Нацразвитие», 2018. С. 192—193.

139

137

136

97

- 7. Balaguera A., Carvajal G.I., Arias Y.P., Alberti J., Fullana-i-Palmer P. Technical feasibility and life cycle assessment of an industrial waste as stabilizing product for unpaved roads, and influence of packaging // Science of The Total environment. Vol. 651, P. 1. Pp. 1272–1282.
- 8. Дмитриева Т.В., Строкова В.В., Безродных А.А. Влияние генетических особенностей грунтов на свойства грунтобетонов на их основе // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. №1. С. 69–77.
- 9. Kushwaha S.S., Kishan D., Dindorkar N. Stabilization of Expansive Soil Using Eko Soil Enzyme For Highway Embankment // Materialstoday: proceedings. Vol. 5, Iss. 9. Pp. 19667–19679.
- 10. ChenY., LiangW., LiY., WuY., ChenY., XiaoW., ZhaoLi, ZhangJ., HueLi. Modification, application and reaction mechanisms of nano-sized iron sulfide particles for pollutant removal from soil and water: A review // Chemical Engineering Journal. Vol. 362. 15 April 2019. Pp. 144–159. 15 April 2019. Pp. 144–159.
- 11.Rimal S., Poudel R.K., Gautam D. Experimental study on properties of natural soils treated with cement kiln dust // Case Studuies in Construction Materials. Vol. 10. June 2019. e00223.
- 12. Свириденко М.В., Федорова В.С. Способы регенерации дорожных одежд // Материалы 57-й студенческой научно-технической конференции инженерно-строительного института ТОГУ (17-27 апреля 2017 г.). Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2017. С. 256–260.
- 13. Прокопец В.С., Филатов С.Ф., Иванова Т.Л., Тарасова М.В., Поморова Л.В. Восстановление асфальтобетонных покрытий методом холод-

ного ресайклинга и добавками химических веществ // Башкирский химический журнал. 2006. Том 13. N25. С. 61–65.

- 14. Дмитриева Т.В., Безродных А.А., Куцына Н.П. К вопросу о терминологии при разработке грунтобетонных оснований автомобильных дорог // Сб. научных трудов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова «Наукоемкие технологии и инновации» (XXIII научные чтения). Белгород: Изд-во БГТУ, 2019. (в печати)
- 15. Строкова В.В., Щеглов А.Ф. Грунтобетоны на основе глинистых пород КМА для дорожного строительства. Изд-во БГТУ им В.Г. Шухова, 2003. 152 с.
- 16. Курдюков Р.П., Курдюков Д.П., Мануковский А.Ю. Регенерация асфальтобетонного покрытия // Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической интернетконференции «Леса России в XXI веке» (26 ноября 2015 г.). Санкт-Петербург, 2015. С. 130–135.
- 17. Семенова Т.В., Долгих Г.В., Полугородник Б.Н. Применение Калифорнийского числа несущей способности и динамического конус-

ного пенетрометра для оценки качества уплотнения грунтов // Вестник СибАДИ, 2014. №1. С. 59–66

- 18. Александрова Н.П., Троценко Н.А. Применение измерителя жесткости грунта Geogauge для оценки качества уплотнения при операционном контроле // Вестник СибАДИ. 2014. №3. С. 40–47.
- 19.ТУ 2499-001-30130102-2010. Модификатор «ДорЦем ДС-1». Технические условия. Введ. в дейст. 27.07.2010. Введ. впервые. М. 2010. 11 с.
- 20.ТУ 23.64.10-001-28538178-2019. Комплексное вяжущее «БелДорЦем». Технические условия. Введ. в дейст. 04.02.2019. Введ. впервые. Белгород. 2019. 10 с.
- 21. Кочеткова Р.Г. Современные методы улучшения свойств глинистых грунтов вяжущими и добавками: монография. Москва: Изд-во МАДИ, 2014. 132 с.
- 22.Du Ch., Yang G., Zhang T., Yang Q. Miltiscale study of the influence of promoters on low-plasticity clay stabilized with cement-based composites // Construction and Building Materials. Vol. 213. 20 July 2019. Pp. 537–548.

#### Информация об авторах

**Ягрушкина Ирина Николаевна**, кандидат химических наук, доцент кафедры химии и технологии полимерных и композиционных материалов. E-mail: i.yagrushkina@mail.ru. Самарский государственный технический университет. Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244.

Дюльдина Мария Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры химии и технологии полимерных и композиционных материалов. E-mail: dyuldina-marija@rambler.ru. Самарский государственный технический университет. Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244.

**Ногачев Александр Геннадьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры химии и технологии полимерных и композиционных материалов. E-mail: nogachov@gmail.com. Самарский государственный технический университет. Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244.

**Якунин Константин Петрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры химии и технологии полимерных и композиционных материалов. E-mail: konst1982@gmail.com. Самарский государственный технический университет. Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244.

Поступила 18.12.2020 г.

© Ягрушкина И.Н., Дюльдина М.В, Ногачев А.Г., Якунин К.П., 2021

#### Yagrushkina I.N., \*Dyuldina M.V., Nogachev A.G, Yakunin K.P.

Samara State Technical University \*E-mail: dyuldina-marija@rambler.ru

## DEVELOPMENT OF IMPACT RESISTANT POLYMER COMPOSITION ABS/PC FOR AUTOMOTIVE INDUSTRY

Abstract. Polymer and composite materials are becoming more and more widely used in the Russian automotive industry. The Russian market of polymer materials for automotive components is characterized by an insufficiently developed production of some types of such materials. And, as a result, the use of imported materials. Styrene plastics are one of the innovative materials for the automotive industry. Using them in a car makes the product more attractive to customers. The use of this type of plastics allows to create a new look for the car. This applies to both the interior and exterior. The aim of this work is to develop the composition of a

polymer composition based on ABS plastic from domestic raw materials. In addition, the new mixed composition should replace imported mixed compositions or contain a minimum amount of imported components of the composition, which will significantly reduce the cost of products and accordingly the car. The article analyzes the polymer materials used in the automotive industry. The disadvantages of using these materials in their pure form are revealed. The selection of the components of the composition of the impact-resistant material with the development of its formulation has been made. The composition of an impact-resistant polymer composition based on ABS plastic and PC has been developed, which is not inferior in terms of the complex of properties to the imported material. The influence of the composition of ABS-plastic, various grades of polycarbonate, their ratio in the polymer composite material on the physical, mechanical and technological properties of the obtained composition has been investigated. It is shown that the best set of properties is possessed by a material based on 2020-30 ABS-plastic and PC-3S polycarbonate with a component ratio of 70%:30%.

**Keywords:** ABS plastic, polycarbonate, physical and mechanical properties, technological properties, application.

#### **REFERENCES**

- 1. Road economy of Russia. Figures and facts: Ref [Dorozhnoe hozyajstvo Rossii. Cifry i fakty: spravochnik]. Moscow: Ministry of Transport of Russia. Federal road agency. 2010. Pp. 18–26. (rus)
- 2. On the standards of financial expenses and the Rules for calculating the size of budget allocations of the federal budget for the capital repair, repair and maintenance of highways of federal significance: Government Decree № 658 dated May 30, 2017 [O normativah finansovyh zatrat i Pravilah rascheta razmera byudzhetnyh assignovanij federal'nogo byudzheta na kapital'nyj remont, remont i soderzhanie avtomobil'nyh dorog federal'nogo znacheniya: postanovlenie Pravitel'stva ot 30 maya 2017 g. No. 658]. Collection of the legislation of the Russian Federation. M.: 2017. No. 23. Article 354. (rus)
- 3. Solanki P. Zaman M. Microstructural and mineralogical characterization of clay stabilized using calcium-based stabilizers. Scanning electron microscopy. 2012. No. 38. Pp. 771–798.
- 4. Egorov G.V., Andreeva A.V., Burenina O.N. Reinforcement of local soils with a stabilizer during the construction of roads in the North [Ukreplenie mestnyh gruntov stabilizatorom pri stroitel'stve avtomobil'nyh dorog v usloviyah Severa]. Roads and bridges. 2013. No. 1 (29). Pp. 21–28. (rus)
- 5. Strokova V.V., Karatsupa S.V., Lyutenko A.O. Concrete based on technogenic raw materials of KMA for the construction of roads: a monograph [Gruntobetony na osnove tekhnogennogo syr'ya KMA dlya stroitel'stva avtomobil'nyh dorog: monografiya]. Belgorod: Publishing House of BSTU named after V.G. Shukhov, 2006. 172 p. (rus)
- 6. Pankov P.P. et al. Application of the complex method of soil stabilization for the production of road soil concretes [Primenenie kompleksnogo metoda stabilizacii grunta dlya polucheniya dorozhnyh gruntobetonov]. Collected papers of the International Scientific Conference "Technical and Natural Sciences". St. Petersburg, October 27-31, 2018. St.

- Petersburg: Publishing House of the National Academical Research Institute "National Development", 2018. Pp. 192–193. (rus)
- 7. Balaguera A., Carvajal G.I., Arias Y.P., Alberti J., Fullana-i-Palmer P. Technical feasibility and life cycle assessment of an industrial waste as stabilizing product for unpaved roads, and influence of packaging. Science of the Total environment. Vol. 651, P. 1. Pp. 1272–1282.
- 8. Dmitrieva T.V., Strokova V.V., Bezrodnykh A.A. Influence of the genetic features of soils on the properties of soil-concretes on their basis [Vliyanie geneticheskih osobennostej gruntov na svojstva gruntobetonov na ih osnove]. Construction Materials and Products. 2018. Vol. 1. Iss. 1. Pp. 69–77.
- 9. Kushwaha S.S., Kishan D., Dindorkar N. Stabilization of Expansive Soil Using Eko Soil Enzyme For Highway Embankment. Materials today: proceedings. Vol. 5. Is. 9. Pp. 19667–19679.
- 10.Chen Y., Liang W., Li Y., Wu Y., Chen Y., Xiao W., Zhao Li, Zhang J., Hue Li. Modification, application and reaction mechanisms of nano-sized iron sulfide particles for pollutant removal from soil and water: A review. Chemical Engineering Journal. Vol. 362. 15 April 2019. Pp. 144–159.
- 11.Rimal S., Poudel R.K., Gautam D. Experimental study on properties of natural soils treated with cement kiln dust. Case Studuies in Construction Materials. Vol. 10. June 2019. e00223.
- 12. Sviridenko M.V., Fedorova V.S. Ways of pavement regeneration [Sposoby regeneracii dorozhnyh odezhd]. Proceedings of the 57th Student Scientific and Technical Conference of the Engineering and Construction Institute of Pacific National University (April 17-27, 2017). Khabarovsk: Pacific National University, 2017. Pp. 256–260. (rus)
- 13. Prokopets V.S., Filatov S.F., Ivanova T.L., Tarasova M.V., Pomorova L.V. Restoration of asphalt concrete pavements by cold recycling and chemical additives [Vosstanovlenie asfal'tobetonnyh

pokrytij metodom holodnogo resajklinga i dobavkami himicheskih veshchestv]. Bashkir Chemical Journal. 2006. Vol. 13. No. 5. Pp. 61–65. (rus)

- 14. Dmitrieva T.V., Bezrodnykh A.A., Kutsyna N.P. To the question of terminology in the development of soil-concrete basements of highways [K voprosu o terminologii pri razrabotke gruntobetonnyh osnovanij avtomobil'nyh dorog]. Proceedings of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 65th anniversary of BSTU named after V.G. Shukhov "High Technologies and Innovations" (XXIII scientific readings). Belgorod: publishing house of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019. (in print). (rus)
- 15. Strokova V.V., Shcheglov A.F. Soil-concretes on the basis of clay rocks of KMA for road construction: Monograph [Gruntobetony na osnove glinistyh porod KMA dlya dorozhnogo stroitel'stva: Monografiya]. Belgorod: Publishing House of the BSTU named after VG Shukhov, 2003, 152 p. (rus)
- 16. Kurdyukov R.P., Kurdyukov D.P., Manukovsky A.Yu. Regeneration of asphalt concrete pavement [Regeneraciya asfal'tobetonnogo pokrytiya]. Collection of scientific papers on the basis of the international scientific and technical Internet conference "Forests of Russia in the XXI century" (November 26, 2015). St. Petersburg, 2015. Pp. 130–135. (rus)
- 17. Semenova T.V., Dolgikh G.V., Polugorodnik B.N. The use of the California bearing ratio and dynamic cone penetrometer for assessing the quality of compaction of soils [Primenenie Kalifornijskogo chisla nesushchej sposobnosti i dinamicheskogo konusnogo penetrometra dlya ocenki

kachestva uplotneniya gruntov]. Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2014. No. 1. Pp. 59–66. (rus)

- 18. Alexandrova N.P., Trotsenko N.A. The use of the Geogauge soil stiffness tester for evaluating the quality of compaction during operational control [Primenenie izmeritelya zhestkosti grunta Geogauge dlya ocenki kachestva uplotneniya pri operacionnom kontrole]. Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2014. No. 3. Pp. 40–47. (rus)
- 19. TC 2499-001-30130102-2010. Modifier "DorTsem DS-1." Technical conditions [Modifikator «DorCem DS-1». Tekhnicheskie usloviya]. Entered into action 27.07.2010. Entered firstly. M. 2010. 11 p. (rus)
- 20. TC 23.64.10-001-28538178-2019. Complex binder "Beldortsem". Technical conditions [Kompleksnoe vyazhushchee «BelDorCem». Tekhnicheskie usloviya]. Entered into action 04.02.2019. Entered firstly Belgorod. 2019. 10 p. (rus)
- 21. Kochetkova R.G. Modern methods of improving the properties of clay soils with binders and additives: monograph [Sovremennye metody uluchsheniya svojstv glinistyh gruntov vyazhushchimi i dobavkami: monografiya]. M.: Publishing House of MADI, 2014. 132 p. (rus)
- 22. Du Ch., Yang G., Zhang T., Yang Q. Miltiscale study of the influence of promoters on low-plasticity clay stabilized with cement-based composites. Construction and Building Materials. Vol. 213. 2019. Pp. 537–548.

Information about the authors

**Yagrushkina, Irina N.** PhD, Assistant professor. E-mail: i.yagrushkina@mail.ru. Samara State Technical University. Russia, 443100, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244.

**Dyuldina, Maria V.** PhD, Assistant professor. E-mail: dyuldina-marija@rambler.ru. Samara State Technical University. Russia, 443100, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244.

**Nogachev, Alexander G.** PhD, Assistant professor. E-mail: nogachov@gmail.com. Samara State Technical University. Russia, 443100, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244.

**Yakunin, Konstantin P.** PhD, Assistant professor. E-mail: konst1982@gmail.com. Samara State Technical University. Russia, 443100, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244.

Received 18.12.2020

#### Для цитирования:

Ягрушкина И.Н., Дюльдина М.В, Ногачев А.Г., Якунин К.П. Разработка состава ударопрочной полимерной композиции АБС/ПК для автомобильной промышленности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 80–88. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-80-88

#### For citation:

Yagrushkina I.N., Dyuldina M.V., Nogachev A.G, Yakunin K.P. Development of impact resistant polymer composition ABS/PC for automotive industry. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 2. Pp. 80–88. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-80-88

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-89-100

#### Трубицын М.А., \*Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет \*E-mail: hung.hoangviet191290@gmail.com

#### ВЛИЯНИЕ СОСТАВА КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КАЛЬЦИЙ-ФОСФАТНОГО НАНОКОМПОЗИТА НА ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОВЕРХНОСТНЫХ И КИСЛОТНО-ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ

Аннотация. В настоящей работе были синтезированы образцы однофазных модифицированных наноструктурных гидроксиапатитов и также биомиметического кальций-фосфатного нанокомпозита (БМГАП), допированного силикат- и карбонат-анионами методом химического осаждения из водных растворов. Изучен химический состав синтезированных образцов методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии с использованием растрового электронного микроскопа. Установлено, что все полученные образцы имели фактическое мольное соотношение близкое к проектному значению. Проведено исследование влияния различных модифицирующих ионов в кристаллохимическую структуру гидроксиапатита ( $\Gamma A\Pi$ ) на электроповерхностные свойства синтезированных продуктов.  $\Pi$ оказано, что в водной суспензии, при рH=7, частицы немодифицированного гидроксиапатита, силикат-замещенного гидроксиапатита и БМГАП несут отрицательный заряд, а в случае для карбонат-замещённого ГАП - положительный. Выявлено, что при введении силикат- и карбонат-анионов в кристаллохимическую структуру ГАП наблюдается увеличение отрицательных значений дзета-потенциала от -1,05 до -4,29 мВ. Изучено изменение распределения активных центров на поверхности модифицированных синтетических наноструктурных гидроксиапатитов методом адсорбции кислотно-основных индикаторов с  $pK_a^x$  в диапазоне от -0,3 до +12,8. Установлено, что в отличие от стехиометрического гидроксиапатита у БМГАП преобладают бренстедовские центры нейтрального типа, а их концентрация составляет 48,38 ммоль-экв/г.

**Ключевые слова:** кальций-фосфатный нанокомпозит, гидроксиапатит, силикат-анионы, карбонат-ионы, активные иентры, дзета-потенциал.

**Введение.** На сегодняшний день широкий спектр практического применения синтетического гидроксиапатита [ $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ , ГАП] в медицинской практике (в реконструктивной хирургии, ортопедии и стоматологии) в виде биокерамики, цемента и т.д. обусловлен биоактивно-

стью, биосовместимостью и остеокондуктивностью данных материалов [1–4]. Препараты на основе ГАП нетоксичные, не вызывают реакции отторжения и обладают способностью активно связываться со здоровой костной тканью, ускоряя процесс регенерации и реабилитации [5, 6].

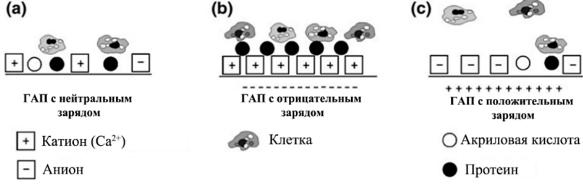


Рис. 1. Схемы, иллюстрирующие влияние заряда поверхности биоматериала на адгезию клеток [8]:

а) – нейтральная, b) – положительно заряженная, c) – отрицательно заряженная

Как известно, важными характеристиками биоматериалов, помимо биосовместимости, определяющими их биорезорбируемость и способность к адсорбции белков при вживлении имплантатов в организм, являются электрическая совместимость с биологическими тканями и состояние активных центров поверхности. В 2012

году были опубликованы результаты исследования Tofail с соавторами, которые продемонстрировали рост костной ткани в области отрицательного заряда биоматериала, в то время как у анода, отмечается остеонекроз [7]. В работе [8] также сообщалось о взаимодействии между электрическим поверхностным зарядом биоматериалов и

адсорбцией протеинов, которое играет критическую роль в передаче сигналов клеток, регулирующих их дифференцировку. Показано, что катионы кальция преимущественно адсорбируются на отрицательно заряженной поверхности ГАП, формируя апатитовой слой, и инициируют дальнейшую адгезию белков и клеток (рис. 1).

В ряде опубликованных работ [9-11] упоминается, что большое значение для адгезионной активности и пролиферации клеток имеют электроповерхностные свойства, такие как величина, знак и плотность заряда на поверхности материала. Введение в кристаллохимическую структуру ГАП модифицирующих анионов, таких как  $SiO_4^{4-}$ ,  $CO_3^{2-}$ , замещающих фосфатные группы, приводит к изменению дзета-потенциала частиц. Поэтому, для понимания взаимодействия клеток с поверхностью необходима информация о поверхностном потенциале биоматериалов, о дзетапотенциале, как и о других свойствах, включая морфологию, и особенно состояние кислотно-основных характеристик поверхности данных биоматериалов.

Известно, что поверхность гидроксиапатита, как и других кальций-фосфатных материалов характеризуется наличием Льюисовских кислотных ( $\mathrm{Ca^{2+}}$ ) и основных (атомы кислорода в  $\mathrm{PO_4}^{3-}$  и  $\mathrm{OH^-}$ -группах) центров, а также кислотно-основных центров Бренстеда.

Анализ литературных источников [12-14] показывает, что изменение мольного отношения Са/Р в значительной степени влияет на кислотноосновные характеристики поверхности. Соотношение Са/Р ниже стехиометрического, т.е. <1,67, будет способствовать усилению кислотных свойств, тогда как более высокие отношения Са/Р ведут к преобладанию основных.

Также поверхностные кислотно-основные свойства ГАП можно регулировать путём заме-

щения  $Ca^{2+}$ , OH-групп или групп  $PO_4^{3-}$  на вакансии, катионы  $Sr^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ , анионы  $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $CO_3^{2-}$  и анионы  $HPO_4^{2-}$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $SiO_4^{4-}$  и т.д. соответственно. Внедрение различных модифицирующих ионов в кристаллохимическую структуру ГАП может существенно влиять на распределение кислотно-основных центров Льюиса и Бренстеда [15].

Исходя из вышеизложенного, целью настоящей работы являлось исследование влияния состава кристаллохимической структуры кальцийфосфатных наноструктурных композиционных материалов на формирование электроповерхностных и кислотно-основных характеристик синтезированных продуктов.

Материалы и методы. В настоящей работе были исследованы образцы силикат- и карбонатзамещенных гидроксиапатитов - Si-ГАП и КГАП соответственно, а также биомиметического кальций-фосфатного нанокомпозита (БМГАП), допированного силикат- и карбонат-анионами, синтезированные путем осаждения из водных растворов. Для проведения синтеза в качестве исходных реактивов использовали  $Ca(NO_3)_2 \times 4H_2O$  (ч. д. а.), (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (ч. д. а.), (С<sub>2</sub>H<sub>5</sub>O)<sub>4</sub>Si (тетраэтоксисилан) (ос. ч.), (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (ч. д. а.) и NH<sub>4</sub>OH (х. ч. а.). Синтез проводили при комнатной температуре  $(t = 22\pm 2 \, ^{\circ}\text{C})$  и pH=10±0,5. pH поддерживали добавлением 25 % раствора NH<sub>4</sub>OH. Образовавшийся молочно-белый осадок выдерживали в маточном растворе в течение 24 часов для завершения фазообразования. Далее твердую фазу отделяли фильтрованием, хорошо промывали, высушивали при температуре t = 105±5 °C до постоянной массы и измельчали до порошкообразного состояния. Более подробно методики синтеза описана в [16–18].

Процесс синтеза Si-ГАП, КГАП и БМГАП можно описать следующими уравнениями:

#### Синтез Si-ГАП:

#### Синтез КГАП:

 $10\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + 5(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 + 8\text{NH}_4\text{OH} \rightarrow \text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_5(\text{CO}_3)(\text{OH}) \downarrow + 20\text{NH}_4\text{NO}_3 + 7\text{H}_2\text{O}$  Синтез БМГАП:

$$9Ca(NO_3)_2 + 4(NH_4)_2HPO_4 + (NH_4)_2CO_3 + (C_2H_5O_4)_4Si \rightarrow Ca_9(PO_4)_4(CO_3)(SiO_4) \times nH_2O\downarrow + 10NH_4NO_3 + 4C_2H_5OH$$

Объектом сравнения в данной работе был выбран стехиометрический немодифицированный гидроксиапатит, синтезированный в соответствии с уравнением:

$$10Ca(NO_3)_2 + 6(NH_4)_2HPO_4 + 8NH_4OH \rightarrow Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 \downarrow + 20NH_4NO_3 + 6H_2O$$

Качественный и количественный элементный состав синтезированных образцов были

определены методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) с использованием энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, который встроен в сканирующий электронный микроскоп Quanta — 200 3D фирмы FEI (США).

Измерение электрокинетического потенциала ( $\zeta$ -потенциал) синтезированных образцов, находящихся во взвешенном состоянии в дистиллированной воде, было выполнено на анализаторе серии «Zetasizer Nano ZS» компании Malvern Instruments (Великобритания), использующего электрофоретическое рассеяние света. Измерение  $\zeta$ -потенциала осуществляли при фиксированных значениях pH раствора.

Кислотно-основные свойства поверхности синтезируемых образцов определяли методом адсорбции одноосновных индикаторов на поверхности твердофазных веществ из водной среды методом Гаммета [19, 20]. Были выбраны индикаторы, позволяющие контролировать концентрацию и силу кислотно-основных центров в диапазоне значений рН от -0,3 до +12,8 (табл. 1). Исходная концентрация индикаторов в растворе составляла 0,0006 моль-экв/л (0,0006 ммоль-экв/мл).

Количественное определение центров адсорбции ( $q_{pKa}^x$ , ммоль-экв/г) выполняли спектрофотометрическим методом с использованием спектрофотометра Spekord-50 по следующей методике. Навеску каждого исследуемого образца

массой 0,02 г помещали в калиброванные пробирки, приливали определенное количество раствора индикатора (табл. 1) и дистиллированной водой доводили объем до 5 мл, тщательно перемешивали и выдерживали в течение 1 час. После установления адсорбционного равновесия отделяли жидкую фазу декантацией и измеряли значение оптической плотности А<sub>1</sub> при длине волны  $(\lambda_{max})$ , соответствующей каждому индикатору (табл. 1). Одновременно проводили холостой опыт, учитывающий влияние взаимодействия образца с растворителем на изменение оптической плотности в процессе адсорбции красителя. Для этого навески образца ( $m_2 \sim m_1$ ) заливали 3 мл воды, через час декантировали раствор в другую пробирку, добавляли необходимый объем индикатора, разбавляли водой до 5 мл, перемешали и выдержали в течении 30 минут и измеряли значение оптической плотности (А2), соответствующее изменению окраски индикатора за счет изменения рН среды при контакте образца с растворителем. при длине волны, соответствующей максимальному поглощению каждого индикатора  $(\lambda_{\max}).$ 

Данная методика позволяет проводить количественное определение суммарной кислотности по Льюису и Бренстеду с дифференциацией реакционных центров по типу и силе в зависимости от  $pK_a^x$  индикатора. Ассортимент используемых кислотно-основных индикаторов представлен в табл. 1.

Таблица 1 Характеристики кислотно-основных индикаторов, использованных в настоящей работе

Название индикатора	V <sub>инд.</sub> , мл	V(H <sub>2</sub> O), мл	pKa	λтах (нм)
Орто-нитроанилин	2	3	-0,3	410
Пара-нитроанилин	0,2	4,8	+1,02	340
Кристаллический фиолетовый	2	3	+0,80	580
Бриллиантовый зеленый	0,5	4,5	+1,30	610
Фуксин (основание)	1	4	+2,1	540
Метиловый оранжевый	0,5	4,5	+3,46	460
Бромфеноловый синий	0,2	4,8	+4,10	690
Метиловый красный	0,5	4,5	+5,0	430
Бромкрезоловый пурпур.	0,8	4,2	+6,4	540
Бромтимоловый синий	0,8	4,2	+7,3	430
Феноловый красный	1	4	+8,0	430
Тимоловый синий	1	4	+8,8	430
Индигокармин	0,5	4,5	+12,8	610

Содержание активных центров данной кислотной силы, эквивалентное количеству адсорбированного индикатора, рассчитывали по формуле:

$$qpKa^{x} = \frac{C_{\text{ind}} \cdot V_{\text{ind}}}{A_{0}} \left( \frac{(A_{0} - A_{1})}{m_{1}} \pm \frac{(A_{0} - A_{2})}{m_{2}} \right), (1)$$

где  $C_{\rm ind}$  — концентрация раствора индикатора, ммоль-экв/мл;  $V_{\rm ind}$  — объем раствора индикатора, взятого для анализа, мл;  $A_1$  — оптическая плотность раствора индикатора после сорбции;  $A_2$  — оптическая плотность «холостого» раствора;  $A_0$  — оптическая плотность раствора индикатора до сорбции;  $m_1$  и  $m_2$  — масса сорбента при измерении  $A_1$  и  $A_2$ , г; знак «—» соответствует однонаправленному изменению  $A_1$  и  $A_2$  относительно  $A_0$ , а знак «+» - разнонаправленному.

На основании полученных данных строили кривые распределения кислотно-основных центров на поверхности исследуемых образцов в координатах  $q_{pKa}^x = f(pK_a^x)$ .

Основная часть. Ранее, в работах [16, 17] методом рентгенофазового анализа было доказано, что синтезированные порошки, модифицированные силикат-анионами (Si-ГАП) и карбонат-анионами (КГАП), а также БМГАП являются наноструктурными однофазными продуктами и

они могут быть идентифицированы как модификации гидроксиапатита (по ICDD № 01-072-1243). Установлено, что полученные образцы SiГАП, КГАП и БМГАП кристаллизуются в гексагональной структуре ГАП с пространственной группой P6<sub>3</sub>/m.

Из литературных данных [21, 22] известно, что важной характеристикой кальций-фосфатных материалов является мольное соотношение Са/Р, которое определяет такие свойства материалов, как скорость растворения и механические свойства. Так, чем ниже соотношение Са/Р, тем выше растворимость материала и ниже механические показатели. Наоборот, с увеличением соотношения Са/Р до 1,67 (то есть соответствующего формуле стехиометрического ГАП), скорость растворения кальций-фосфатного материала снижается, а его механические свойства увеличиваются и достигаются до максимального значения. Следует отметить, что для биогенного гидроксиапатита, значение Са/Р варьируется в пределах от 1,37 до 2,07 в зависимости от различных условий.

Согласно исследованию методом РСМА (рис. 2), помимо кислорода, кальция и фосфора, в модифицированных порошковых образцах Si-ГАП, КГАП и БМГАП присутствуют еще такие элементы как кремний и углерод.

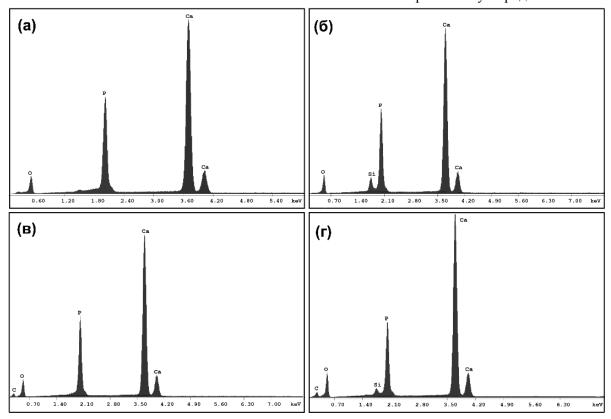


Рис. 2. Энергодисперсионные спектры элементного анализа синтезированных образцов: а)  $- \Gamma A \Pi$ ; б)  $- Si-\Gamma A \Pi$ ; в)  $- K\Gamma A \Pi$  и д)  $- SM\Gamma A \Pi$ 

В таблице 2 представлено количественное содержание Ca, P, Si и C в синтезированных

образах ГАП, Si-ГАП; КГАП и БМГАП.

Таблица	2

Элементный	состав	синтезированных	образцов

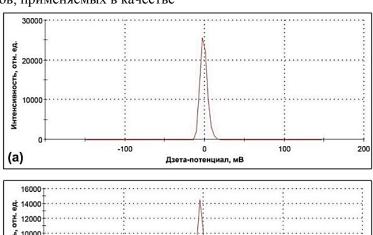
2		Количественное содера	жание, атом., %	
Элемент	ГАП	Si-ГАП	КГАП	БМГАП1,50
Ca	27,92	27,05	28,82	26,27
P	16,82	13,7	16,08	13,42
Si	-	2,65	-	2,83
C	-	-	1,22	1,30
Мольное	Ca/P		Ca/(P+Si+C)	
отношение	1,66	1,65	1,66	1,49

По данным, приведенным в табл. 2, видно, что для немодифицированного гидроксиапатита соотношение Са/Р равно 1,66; а для ряда модифицированных образцов Si-ГАП, КГАП, а БМГАП соотношение Ca/(P+Si+C)также составляют 1,65; 1,66 и 1,49, соответственно. Все синтезированные образцы имели фактическое мольное отношение близкое к проектному значению. По результатам PCMA также наблюдается незначительное уменьшение фактических значений Ca/(P+Si+C), вероятно, связано с тем, что часть непрореагировавших анионов  $SiO_4^{4-}$  и  $CO_3^{2-}$  остаются в маточном растворе.

Следует отметить, что по сравнению со стехиометрическим немодифицированным ГАП, повышение мольного соотношения кальция к фосфору в исследуемых образцах Si-ГАП, КГАП и БМГАП может служить доказательством изоморфных замещений в кристаллографической структуре гидроксиапатита.

Одним из важных свойств кальцийфосфатных материалов, применяемых в качестве субстратов ДЛЯ изготовления костных имплантатов, помимо биосовместимости, механических характеристик, остеоиндуктивности, крайне важными являются электроповерхностные свойства. Известно [23], что, в случае помещения биоматериала внутрь организма возникает биологическая сразу ответная реакция на глубине в несколько нанометров от поверхности. В тоже время, наличие поверхностного заряда на границе между биоматериалом и биологической средой оказывает существенное влияние на процессы адсорбции белка и клеточной адгезии. С этой точки зрения частицы ΓΑΠ, несущие отрицательный поверхностный заряд, имеют заметное преимущество.

Полученные значения  $\zeta$ -потенциала, измеренные при рH=7, для водных суспензий синтезированных образцов ГАП, Si-ГАП, КГАП и БМГАП приведены в табл. 3 и на рис. 3.



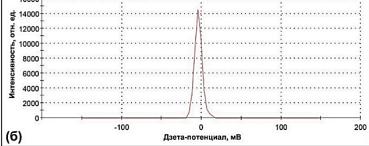


Рис. 3. Кривая распределения **ζ**-потенциала поверхности синтезированных образцов: а) –  $\Gamma$ А $\Pi$ ; б) –  $\overline{\text{БМ}}\Gamma$ А $\Pi$ 

Таблица 3

Значение ζ-потенциала синтезированных образцов при рН=7

Исследуемый образец	ζ-потенциал, мВ
ГАП	-1,05
Si-ГАП	-1,54
КГАП	+8,45
БМГАП	-4,29

По результатам исследования поверхностного заряда синтезированных образцов методом электрофоретического рассеяния света при фиксированных значениях рН было показано, что в водной суспензии частицы исследуемых образцов ГАП, Si-ГАП и БМГАП несут отрицательный заряд, а для КГАП положительный. Полученные результаты хорошо согласуются с литературным данным [24, 25]. Следует отметить, что в случае для БМГАП, при введении силикат- и карбонатанионов в кристаллохимическую структуру ГАП наблюдается увеличение отрицательных значений **ζ-**потенциала от -1,05 до - 4,29 мВ.

Таким образом, для модифицированных образцов как SiГАП, КГАП, так и для БМГАП

имеет место широкий диапазон варьирования величины отрицательного поверхностного заряда, что позволяет управлять их адгезионными свойствами по отношению к клеткам и протеинам.

Наряду с электрокинетическими свойствами биоматериалов, определяющие их биорезорбируемость и способность к адгезии белков при вживлении имплантатов в организм человека, другой важной характеристикой является состояние кислотно-основных поверхностных центров.

На рис. 4 представлено распределение содержания кислотно-основных активных центров поверхности в зависимости от синтезированных образцов ГАП, Si-ГАП, КГАП и БМГАП от  $pK_a^x$  индикатора.

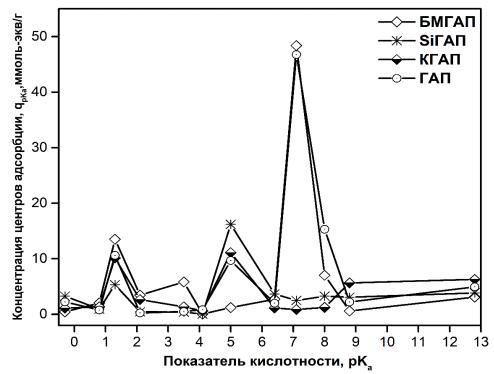


Рис. 4. Распределение активных центров на поверхности синтезированных образцов

Из рисунка 3 видно, что у всех исследованных образцов преобладают бренстендовские кислотные и нейтральные центры. Немодифицированный ГАП, силикат-замещенный (SiГАП), кар-

бонат-замещенный ГАП (КГАП) и БМГАП характеризуются наличием кислотных центров с  $pK_a = +1,3, pK_a = +5$  и  $pK_a = +7,1$ . Установлено, что у образцов БМГАП и ГАП преобладают нейтральные центры Бренстеда. Максимальное

количество активных центров, соответствующих показателю кислотности  $pK_a = +7,1$ , обнаружено у образца БМГАП и их концентрация составляет 48,38 ммоль-экв/г.

Известно, что кислотно-основные свойства поверхности синтетических гидроксиапатитов зависит от двух типов кислотных центров: Лью-исовские и Бренстедовские кислотные центры (рис. 5) [15, 26]. На рис. 5 видно, что частицы  $HPO_4^{2-}$  действуют как первые, в то время как ва-

кансии  $Ca^{2+}$  или  $OH^-$  приводят к вторым. Это объясняет, почему кальций-дефицитный гидроксиапатит с мольным отношением Ca/P < 1,67 имеет большее количество кислотных центров. Это может быть связано с вкладом  $HPO_4^{2-}$  в кристаллохимической структуре ГАП или  $OH^-$  вакансии. Следовательно, кальций-дефицитный ГАП более кислый и преобладает больше кислотных центров Бренстеда по сравнению со стехиометрическим ГАП.

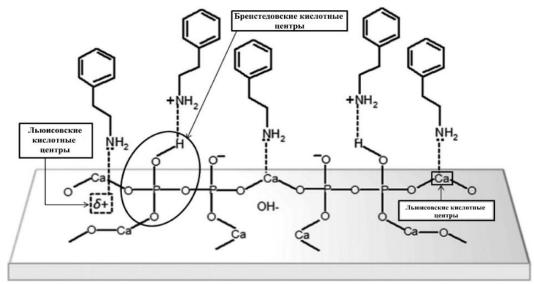


Рис. 5. Модель адсорбции 2-фенилэтиламина (используемого в качестве молекулы зонда) по кислотным центрам Льюиса и Бренстеда на поверхности  $\Gamma A\Pi [(\delta +) = OH - вакансии] [26]$ 

#### Выводы

- 1. Образцы силикат-замещенного (SiГАП), карбонат-замещенного (КГАП) и биомиметического кальций-фосфатного нанокомпозита (БМГАП), допированного силикат- и карбонатанионами были синтезированы методом осаждения из водных растворов. Установлено, что полученные образцы являются наноструктурными однофазными продуктами и они могут быть идентифицированы как модификации ГАП. Методом РСМА было показано, что все синтезированные образцы имели фактическое мольное отношение близкое к проектному значению.
- 2. Установлено, что в водной суспензии (pH = 7) частицы образцов SiГАП и БМГАП несут отрицательный заряд, а для КГАП положительный поверхностный заряд. Введение SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup> и CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> в кристаллохимическую структуру ГАП приводит к изменению  $\zeta$ -потенциала частиц полученных образцов.
- 3. Выявлено, что у всех исследованных образцов преобладают бренстендовские кислотные и нейтральные центры. Максимальное количество активных центров обнаружено у образца БМГАП, и их концентрация составляет 48,38 ммоль-экв/г.

**Источник финансирования.** Работа выполнена в рамках соглашения о предоставлении из федерального бюджета субсидии на развитие кооперации Российской образовательной организации высшего образования и организации реального сектора экономики в целях реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства № 075-11-2020-038.

Работа была выполнена с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования "Технологии и Материалы НИУ "БелГУ".

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Youness R.A., Taha M.A., Elhaes H., Ibrahim M. Molecular modeling, FTIR spectral characterization and mechanical properties of carbonated-hydroxyapatite prepared by mechanochemical synthesis // Materials Chemistry and Physics. 2017. Vol. 190. Pp. 209–218. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2017.01.004
- 2. Refaat A., Youness R.A., Taha M.A., Ibrahim M. Effect of zinc oxide on the electronic properties of carbonated hydroxyapatite // Journal of Molecular Structure. 2017. Vol. 1147, № 5. Pp. 148–154. DOI: 10.1016/j.molstruc.2017.06.091.
- 3. Golovanova O.A. Biomimetic Synthesis of Carbonate Hydroxyapatite in the Presence of Chon-

- droitin Sulfate // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2020. Vol. 65. Pp. 305–311. DOI: 10.1134/S0036023620030043.
- 4. Larionov D.S., Kuzina M.A., Evdokimov P.V., Garshev A.V., Orlov N.K., Putlyaev V.I. Synthesis of Calcium Phosphate Powders in Nonaqueous Media for Stereolithography 3D Printing // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2020. Vol. 65. Pp. 312–322. DOI: 10.1134/S0036023620030079.
- 5. Elliott J.C. Calcium Phosphate Biominerals // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2002. Vol. 48, № 1. Pp. 427–453. DOI: 10.2138/rmg.2002.48.11.
- 6. Шаркеев Ю.П, Псахье С.Г., Легостаева Е.В., Князева А.Г., Смолин А.Ю., Ерошенко А.Ю., Ляхов Н.З. Биокомпозиты на основе кальцийфосфатных покрытий, наноструктурных и ультрамелкозернистых биоинертных металлов, их биосовместимость и биодеградация. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. 596 с.
- 7. Tofail S.A.M., Gandhi A.A. Chapter 1. Electrical modifications of biomaterials' surfaces: Beyond hydrophobicity and hydrophilicity // RSC Nanoscience & Nanotechnology. 2011. No 21. Pp. 3–14. DOI: 10.1039/9781849733366-00003.
- 8. Metwally S., Stachewicz U. Surface potential and charges impact on cell responses on biomaterials interfaces for medical applications // Materials Science and Engineering: C. 2019. Vol. 104. Pp. 1-27. DOI: 10.1016/j.msec.2019.109883.
- 9. Гостищев Э.А., Сурменев Р.А., Хлусов И.А., Пичугин В.Ф. Исследование биоэлектрической совместимости тонких кальций-фосфатных покрытий, полученных методом высокочастотного магнетронного распыления // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319, № 2. С. 108–113.
- 10. Hristu R., Tofail S.A.M., Stanciu S.G., Tranca D.E., Stanciu G.A. Hydroxyapatite surface charge investigated by scanning probe microscopy // 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Graz, Austria. 2014. Pp. 1-4. DOI: 10.1109/ICTON.2014.6876323.
- 11. Hamamoto N., Hamamoto Y., Nakajima T., Ozawa H. Histological, histocytochemical and ultrastructural study on the effects of surface charge on bone formation in the rabbit mandible // Archives of Oral Biology. 1995. Vol. 40, № 2. Pp. 97-106. DOI: 10.1016/0003-9969(94)00153-3.
- 12. Webster T.J., Massa-Schlueter E. A., Smith J.L., Slamovich B.E. Osteoblast response to hydroxyapatite doped with divalent and trivalent cations // Biomaterials. 2004. Vol. 25, № 10. Pp. 2111-2121. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2003.09.001.

- 13. Kannan S., Rocha J.H.G., Ferreira J.M.F. Synthesis and thermal stability of sodium, magnesium co-substituted hydroxyapatites // J. Mater. Chem. 2006. Vol. 16. Pp. 286-291. DOI: 10.1039/B511867K.
- 14. Sugiyama S., Osaka T., Ueno Y., Sotowa K.-I. Oxidative Dehydrogenation of Propane over Vanadate Catalysts Supported on Calcium and Strontium Hydroxyapatites // J. Jpn. Pet. Inst. 2008. Vol. 51, № 1. Pp. 50-57. DOI: 10.1627/jpi.51.50.
- 15. Silvester L., Lamonier J.F., Vannier R.N., Lamonier C., Capron M., Mamede A.S., Pourpoint F., Gervasini A., Dumeignil F. Structural, textural and acid-base properties of carbonate-containing hydroxyapatites // Journal of Materials Chemistry A. 2014. Vol. 2, № 29. Pp. 11073-11090. DOI: 10.1039/C4TA01628A.
- 16. Трубицын М.А., Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В. Синтез и исследование свойств биомиметического гидроксиапатита, допированного силикат- и карбонат-анионами в присутствии цитратионов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. Т. 5, №. 3. С. 106-113.
- 17. Трубицын М.А., Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В., Ле Ван Тхуан. Синтез и исследование физико-химических свойств наноразмерного гидроксиапатита, допированного карбонат- и силикат-анионами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. Т. 4, №. 11. С. 86-93.
- 18. Пат. 2736048 С1, Российская Федерация, МПК С01В25/32, В82В3/00, В82ҮЗ0/00, С01F11/18, А61L27/12 Способ получения наноразмерного гидроксиапатита / М.А. Трубицын; заявитель и патенобладатель ФГАОУ ВО НИУ БелГУ. № 2020114700; заявл. 24.04.2020; опубл. 11.11.2020, Бюл. №. 32. 19с.
- 19. Трубицын М. А., Королькова С.В., Воловичева Н.А., Фурда Л.В. Исследование кислотноосновных свойств монтмориллонитовых минералов белгородского региона, модифицированных катионами Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> // Ученые записки крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. 2020. Т. 6 (72), № 2. С. 314–323.
- 20. Захарова Н.В., Сычев М.М., Корсаков В.Г., Мякин С.В. Эволюция донорно-акцепторных центров поверхности сегнетоэлектриков при диспергировании // Конденсированные среды и межфазные границы. 2011. Т. 13. С. 56–62.
- 21. Tzaphlidou M., Zaichick V. Calcium, Phosphorus, Calcium-Phosphorus Ratio in Rib Bone of Healthy Humans // Biological Trace Element Research. 2003. Vol. 93, № 1–3. Pp. 63–74. DOI: 10.1385/BTER:93:1-3:63.
- 22. Прохончуков А.А., Жижина А.А., Тигронян Р.А. Гомеостаз костной ткани в норме и при

экстремальном воздействии // Пробл. космической биологии. М.: Наука, 1984. Т. 49. 200 с.

- 23. Каем А.И. Клинико-экспериментальное обоснование применения модифицированного электретного покрытия для дентальных имплантатов: автореф. дисс. ... канд. мед. наук. М., 2007. 24 с.
- 24. Гарафутдинова М.А., Колобов Ю.Р., Гребцова Е.А., Колобова Е.Г. Электрокинетические характеристики нативного и кремний-замещенного гидроксиапатита // Научные ведомости БелГУ. Сер. Математика. Физика. 2012. Вып. 29, № 23 (142). С. 117–121.

25. Пат. 2588525, Российская Федерация, МПК С01 F11/00. Способ получения наноразмерного кальций-дефицитного карбонатсодержащего гидроксиапатита / М. А. Трубицын; заявитель и патенобладатель Общество с ограниченной ответственностью "Наноапатит". № 2014150230; заявл. 11.12.2014; опубл. 27.06.2016, Бюл. № 18. 18с

26. Ibrahim M., Labaki M., Giraudon J., Lamonier J. Hydroxyapatite, a multifunctional material for air, water and soil pollution control: A review // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 383, № 5. Pp. 121139-121157. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121139.

#### Информация об авторах

**Трубицын Михаил Александрович**, кандидат технических наук, помощник ректора, профессор кафедры общей химии. E-mail: troubitsin@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д. 85.

**Хоанг Вьет Хунг**, аспирант кафедры общей химии. E-mail: hung.hoangviet191290@gmail.com. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д. 85.

**Фурда Любовь Владимировна**, кандидат химических наук, доцент кафедры общей химии. E-mail: furda@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д. 85.

Поступила 27.01.2021 г.

© Трубицын М.А., Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В., 2021

Troubitsin M.A., \*Hoang Viet Hung, Furda L.V.

Belgorod State National Research University \*E-mail: hung.hoangviet191290@gmail.com

#### INFLUENCE OF THE CRYSTAL-CHEMICAL STRUCTURE IN CALCIUM-PHOSPHATE NANOCOMPOSITE ON THE FORMATION OF ELECTROSURFACE AND ACID-BASIC PROPERTIES

**Abstract.** The single-phase modified nanostructured hydroxyapatites and biomimetic calcium-phosphate nanocomposite (BMHAP) doped by silicate and carbonate anions are synthesized by chemical precipitation in aqueous solutions. The chemical composition of the obtained samples is studied by energy dispersive X-ray spectroscopy using a scanning electron microscope. It is shown that the obtained molar ratios are close to the design values in all samples. The influence of different modifying ions in the crystal-chemical structure of hydroxyapatite (HAp) on the electrosurface properties of the synthesized products has been studied. Unmodified hydroxyapatite, silicate-substituted hydroxyapatite, and BMHAP particles are found to carry a negative charge in an aqueous suspension at pH = 7, while carbonate-substituted HAp particles had a positive charge. It is revealed that the introduction of silicate and carbonate anions into the HAp structure is accompanied by an increase in negative values of the zeta-potential from -1.05 to -4.29 mV. The change in the distribution of active centers on the surface of modified nanostructured hydroxyapatites is studied by the adsorption of acid-base indicators method with  $pK_a^x$  in the range from -0.3 to +12.8. In contrast to stoichiometric hydroxyapatite, in BMHAP the neutral Bronsted centers prevails, and their concentration is 48.38 mmol-eq/g.

**Keywords:** calcium phosphate nanocomposite, hydroxyapatite, silicate anions, carbonate ions, active centers, zeta -potential.

#### **REFERENCES**

1. Youness R.A., Taha M.A., Elhaes H., Ibrahim M. Molecular modeling, FTIR spectral characterization and mechanical properties of carbonated-

hydroxyapatite prepared by mechanochemical synthesis. Materials Chemistry and Physics. 2017. Vol. 190. Pp. 209–218. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2017.01.004.

- 2. Refaat A., Youness R.A., Taha M.A., Ibrahim M. Effect of zinc oxide on the electronic properties of carbonated hydroxyapatite. Journal of Molecular Structure. 2017. Vol. 1147. No. 5. Pp. 148–154. DOI: 10.1016/j.molstruc.2017.06.091.
- 3. Golovanova O.A. Biomimetic Synthesis of Carbonate Hydroxyapatite in the Presence of Chondroitin Sulfate. Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2020. Vol. 65. Pp. 305–311. DOI: 10.1134/S0036023620030043.
- 4. Larionov D.S., Kuzina M.A., Evdokimov P.V., Garshev A.V., Orlov N.K., Putlyaev V.I. Synthesis of Calcium Phosphate Powders in Nonaqueous Media for Stereolithography 3D Printing. Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2020. Vol. 65. Pp. 312-322. DOI: 10.1134/S0036023620030079.
- 5. Elliott J.C. Calcium Phosphate Biominerals. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2002. Vol. 48. No. 1. Pp. 427–453. DOI: 10.2138/rmg.2002.48.11.
- 6. Sharkeev Yu.P., Psakhie S.G., Legostaeva E.V., Knyazeva A.G., Smolin A.Yu., Eroshenko A.Yu., Lyakhov N.Z. Biocomposites based on nanostructured and ultrafine-grained calcium phosphate coatings bioinert metals, their biocompatibility and biodegradation [Biokompozity na osnove kal'tsi-ifosfatnykh pokrytii, nanostrukturnykh i ul'tramelkozernistykh bioinertnykh metallov, ikh biosovmestimost' i biodegradatsiya]. Tomsk: Publishing House of the Tomsk State University, 2014. 596 p. (rus)
- 7. Tofail S.A.M., Gandhi A.A. Chapter 1. Electrical modifications of biomaterials' surfaces: Beyond hydrophobicity and hydrophilicity. RSC Nanoscience & Nanotechnology. 2011. No. 21. Pp. 3–14. DOI: 10.1039/9781849733366-00003.
- 8. Metwally S., Stachewicz U. Surface potential and charges impact on cell responses on biomaterials interfaces for medical applications. Materials Science and Engineering: C. 2019. Vol. 104. Pp. 1–27. DOI: 10.1016/j.msec.2019.109883.
- 9. Gostishchev E.A., Surmenev R.A., Khlusov I.A., Pichugin V.F. Investigation of the bioelectric compatibility of thin calcium-phosphate coatings obtained by high-frequency magnetron sputtering [Issledovanie bioe`lektricheskoj sovmestimosti tonkix kal`cij-fosfatny`x pokry`tij, poluchenny`x metodom vy`sokochastotnogo magnetronnogo raspy`leniya]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2011. Vol. 319. No. 2. Pp. 108–113. (rus)
- 10. Hristu R., Tofail S.A.M., Stanciu S.G., Tranca D.E., Stanciu G.A. Hydroxyapatite surface charge investigated by scanning probe microscop. 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Graz, Austria. 2014. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICTON.2014.6876323.

- 11. Hamamoto N., Hamamoto Y., Nakajima T., Ozawa H. Histological, histocytochemical and ultrastructural study on the effects of surface charge on bone formation in the rabbit mandible. Archives of Oral Biology. 1995. Vol. 40. No. 2. Pp. 97–106. DOI: 10.1016/0003-9969(94)00153-3.
- 12. Webster T.J., Massa-Schlueter E. A., Smith J.L., Slamovich B.E. Osteoblast response to hydroxyapatite doped with divalent and trivalent cations. Biomaterials. 2004. Vol. 25. No. 10. Pp. 2111–2121. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2003.09.001.
- 13. Kannan S., Rocha J.H.G., Ferreira J.M.F. Synthesis and thermal stability of sodium, magnesium co-substituted hydroxyapatites. J. Mater. Chem. 2006. Vol. 16. Pp. 286–291. DOI: 10.1039/B511867K.
- 14. Sugiyama S., Osaka T., Ueno Y., Sotowa K.-I. Oxidative Dehydrogenation of Propane over Vanadate Catalysts Supported on Calcium and Strontium Hydroxyapatites. J. Jpn. Pet. Inst. 2008. Vol. 51. No. 1. Pp. 50–57. DOI: 10.1627/jpi.51.50.
- 15. Silvester L., Lamonier J.F., Vannier R.N., Lamonier C., Capron M., Mamede A.S., Pourpoint F., Gervasini A., Dumeignil F. Structural, textural and acid-base properties of carbonate-containing hydroxyapatites. Journal of Materials Chemistry A. 2014. Vol. 2. No. 29. Pp. 11073–11090. DOI: 10.1039/C4TA01628A.
- 16. Troubitsin M. A., Hoang V. H., Furda L. V. Synthesis and investigation of biomimetic hydroxyapatites doped by silicate and carbonate anions in the presence of citrate ions [Sintez i issledovanie svoistv biomimeticheskogo gidroksiapatita, dopirovannogo silikat- i karbonat-anionami v prisutstvii tsitrationov]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2020. Vol. 5. No. 6. Pp. 106–113. doi: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-106-113. (rus)
- 17. Troubitsin M. A., Hoang Viet Hung, Furda L. V., Le V.T. Synthesis and investigation the physico-chemical properties of nanosized hydroxyapatite doped by carbonate- and silicate-anions [Sintez i issledovanie fiziko-khimicheskikh svoistv nanorazmernogo gidroksiapatita, dopirovannogo karbonati silikat-anionami]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. Vol. 4. No. 11. Pp. 86–93. doi:10.34031/2071-7318-2019-4-11-86-93. (rus)
- 18. Trubitsyn M.A. Method of producing nanosized hydroxyapatite [Sposob polucheniya nanorazmernogo gidroksiapatita]. Patent RF, no. 2020114700, 2020.
- 19. Trubitsyn M.A., Korolkova S.V., Volovicheva N.A., Furda L.V. Study of acid-base properties of montmorillonite minerals of the Belgorod region modified with Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> cations [Issledovanie kislotno-osnovny`x svojstv montmorillonitovy`x mineralov belgorodskogo regiona, modificirovanny`x kationami Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>]. Scientific Notes

- of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. 2020.Vol. 6 (72). No. 2. Pp. 314–323. (rus)
- 20. Zakharova N.V., Sychev M.M., Korsakov V.G., Myakin S.V. Evolution of donor-acceptor centers of the surface of ferroelectrics during dispersion [E`volyuciya donorno-akceptorny`x centrov poverxnosti segnetoe`lektrikov pri dispergirovanii]. Condensed Matter and Interphases. 2011. Vol. 13. Pp. 56–62. (rus)
- 21. Tzaphlidou M., Zaichick V. Calcium, Phosphorus, Calcium-Phosphorus Ratio in Rib Bone of Healthy Humans. Biological Trace Element Research. 2003. Vol. 93. No. 1–3. Pp. 63–74. DOI: 10.1385/BTER:93:1-3:63.
- 22. Prokhonchukov A.A., Zhizhina A.A., Tigronyan R.A. Homeostasis of bone tissue in normal conditions and under extreme exposure [Gomeostaz kostnoj tkani v norme i pri e`kstremal`nom vozdejstvii]. Problems of space biology. Moscow: Nauka, 1984. Vol. 49. 200 p. (rus)
- 23. Kayem A.I. Clinical and experimental substantiation of the use of a modified electret coating

- for dental implants [Kliniko-e`ksperimental`noe obosnovanie primeneniya modificirovannogo e`lektretnogo pokry`tiya dlya dental`ny`x implantatov]: abstract. diss.... cand. med. sciences. Moscow, 2007. 24 p. (rus)
- 24. Garafutdinova M.A., Kolobov Yu.R., Grebtsova E.A., Kolobova E.G. Electrokinetic characteristics of native and silicon-substituted hydroxyapatite. Belgorod State University Scientific bulletin. Mathematics. Physics. 2012. Vol. 29. No. 23 (142). Pp. 117–121. (rus)
- 25. Troubitsin M.A. Method of producing nanosize calcium-deficient carbonate-containing hydroxyapatite [Sposob polucheniya nanorazmernogo kal'cij-deficitnogo karbonatsoderzhashchego gidroksiapatita]. Patent RF, no. 2014150230, 2014.
- 26. Ibrahim M., Labaki M., Giraudon J., Lamonier J. Hydroxyapatite, a multifunctional material for air, water and soil pollution control: A review. Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 383. No. 5. Pp. 121139–121157. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121139.

Information about the authors

**Troubitsin, Mikhail A.** PhD, Professor. E-mail: troubitsin@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

**Hoang Viet Hung**. Postgraduate student. E-mail: hung.hoangviet191290@gmail.com. Belgorod National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

**Furda, Liubov V.** PhD, Assistant professor. E-mail: furda@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Received 27.01.2021

#### Для цитирования:

Трубицын М.А., Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В. Влияние состава кристаллохимической структуры кальций-фосфатного нанокомпозита на формирование электроповерхностных и кислотно-основных свойств // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 89–99. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-89-99

#### For citation:

Troubitsin M.A., Hoang Viet Hung, Furda L.V. Influence of the crystal-chemical structure in calcium-phosphate nanocomposite on the formation of electrosurface and acid-basic properties. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 2. Pp. 89–99. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-89-99

# **МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-100-106 \*Серегин А.А., Никитина И.П., Крылова С.Е.

Оренбургский государственный университет \*E-mail: aasdom@yandex.ru

## ПОВЫШЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ САМОЦЕНТРИРУЮЩИХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ

Аннотация. Повышение жёсткости универсальных самоцентрирующих приспособлений — одно из актуальных направлений в области проектирования станочной оснастки. Расчёт распределения нагрузки между витками и зубьями спирально-реечного механизма представляет собой сложную инженерную задачу. При работе над статьей выявлено, что смежная пара витков и зубьев, находящихся в зацеплении, не всегда совпадает с геометрической смежной парой вследствие погрешности исполнения витков и зубьев по шагу и профилю. Это основано на экспериментальных данных и положении о том, что ошибки шага и профиля спирали определяют характер рабочих давлений в зацеплении витков и зубьев. В статье рассмотрены технические решения, в которых, без существенных изменений конструкции, повышается жёсткость самоцентрирующих приспособлений за счёт установления соответствия алгоритма изменения упругих свойств деталей спирально-реечного механизма алгоритму изменения нагрузки между несущими элементами. Предложены конструктивные решения, основанные на реализации упругого смещения первого наиболее нагруженного витка, что позволяет уменьшить натяг между зубом рейки кулачка и витком спирали диска. Это обстоятельство способствует перераспределению нагрузки в зацеплении несущих элементов спирально-реечного механизма. Проведены испытания разработанных конструкций, которые дали положительные результаты.

**Ключевые слова:** жёсткость, распределение нагрузки, спирально-реечный механизм, токарные станки.

Введение. Более половины всех видов обработки на токарных станках производят при установке заготовки в патроне. Жёсткость патрона токарного станка полностью определяет жёсткость шпиндельного узла [1-3]. Она на порядок меньше жёсткости шпинделя. Это обстоятельство существенно снижает точность обработки [4-6] детали в патроне и производительность станка. То есть одновременно влияет на два основных показателя станка. Одним из методов повышения жёсткости патрона является улучшение распределения нагрузки в центрирующем механизме. Силы, действующие в патроне, проявляются как реакция со стороны закреплённой заготовки [7–10]. Трение и центробежная сила [8] уменьшают значения усилий, деформирующих диск и кулачок. Но, тем не менее, при усилиях закрепления от 2 до 5 кН, объёмные напряжения, действующие в центрирующем механизме таковы, что деформируют зубья рейки кулачка и витки спиральной нарезки диска. При этом наиболее нагруженными будут первые, со стороны действующего усилия, виток и зуб рейки. Их прогиб определяет податливость патрона. Уменьшение упругих деформаций нагруженных витков позволит повысить жёсткость патрона.

**Цель исследования.** Разработка методики теоретической оценки распределения нагрузки между несущими элементами спирально-реечного механизма, учитывающей реономные процессы [11–14] упругой системы патрона.

Методика расчёта распределения нагрузки между несущими элементами спирально-реечного механизма. Методика базируется на исследовании процесса смещения зажимной поверхности кулачка под действием сил. Величина смещения определяется из условия представления спирально-реечного механизма как системы с избыточными связями, а также необходимо учитывать основной принцип решения задачи Н.Е. Жуковского о распределении нагрузки по виткам резьбы [15].

Смещение зажимной поверхности кулачка зависит от большого числа факторов. В работе рассмотрена только та составляющая, которая вызвана упругими смещениями несущих элементов спирально-реечного механизма. Она зависит от характера распределения нагрузки между витками и зубьями:

$$\mathcal{G} = \delta_{\scriptscriptstyle g} + \delta_{\scriptscriptstyle 3} - (\Delta_{\scriptscriptstyle K} - \Delta_{\scriptscriptstyle \partial}) + \mathcal{G}_{\scriptscriptstyle KOHM} , \qquad (1)$$

где  $\Delta_{\kappa}$  – упругая деформация рейки кулачка, м;  $\Delta_{\pi}$  – упругая деформация спирального диска, м;  $\delta_{\theta}$  – прогиб наиболее нагруженного витка, м;  $\delta_{\theta}$  –

прогиб наиболее нагруженного зуба, м;  $\mathcal{G}_{\kappa onm}$  – величина контактных смещений между спиралью и зубом рейки, м.

Знак «—» в формуле (1), стоящий перед круглыми скобками, означает, что усилие действует от оси патрона.

$$\sum_{i} Q_{i} \left( \frac{S + \Delta S_{i}}{E_{II}} + \frac{S + \Delta S_{i}}{E_{K} F_{Ki}} \right) = \left( \lambda_{ei} + \lambda_{3i} \right) \rho_{i} - \left( \lambda_{en} + \lambda_{3n} \right) \rho_{n} , \qquad (2)$$

где  $Q_i$  – усилия, вызванные нагружающей силой, деформирующей диск и кулачок, H;  $\Delta S_i$  – отклонение шага спирали и зубьев рейки от номинала в i-м сечении, м;  $E_{\mathcal{I}}$ ,  $E_{\mathcal{K}}$  – модуль Юнга материала диска и кулачка соответственно,  $\Pi$ a;  $F_{\mathcal{K}i}$  – площадь i-го сечения кулачка,  $M^2$ ;  $F_{\mathcal{I}i}$  – средняя площадь i-го сечения диска ( $M^2$ ), на расстоянии одного шага спирали S, равная:

$$F_{Ii} = 2B_i \sqrt{2iS(R - iS)} , \qquad (3)$$

где R — наружный радиус спирального диска, м;  $B_i$ — толщина витка в i-м сечении, м.

Учёт реономных процессов в формуле (2) осуществляется за счёт представления модуля упругости в виде функции времени [12, 13]:

$$E_{\tau} = \left[ 1 - exp \left( -\frac{E_{\rm M} \tau}{\eta} \right) \right], \tag{4}$$

где  $E_{\it M}$ ,  $E_{\tau}$  — мгновенное и длительное значение модуля Юнга, Па;  $\tau$  — время релаксации, c;  $\eta$  — коэффициент, зависящий от упругого последействия материала, Па/c.

Суммирование в формуле (2) производят по всем i-м виткам спирального диска, находящимся в зацеплении. Коэффициент прогиба зубьев рейки кулачка  $\lambda_3$  находится из уравнений расчёта деформации сдвига и изгиба:

$$\lambda_{3} = \frac{1}{2} K_{C} h_{3} \left( \frac{1}{G_{\kappa} U} + \frac{h_{3}^{2}}{12 E_{B} J(l)} \right),$$
 (5)

где  $G_{\kappa}$  — модуль упругости 2-го рода материала кулачка (как и модуль Юнга зависит от времени), Па; U — площадь основания зуба,  $M^2$ ; J(l) — момент инерции сечения зуба при изгибе,  $M^4$ ;  $K_C$  — коэффициент, учитывающий совместность деформаций сдвига и изгиба;  $h_3$  — полная высота зуба, м.

При определении коэффициента прогиба витков спирали диска учитывается, что спираль это короткая оболочка с постоянно увеличивающимся радиусом. Радиус спирали изменяется согласно зависимости:

Рассмотрим определение составляющих формулы (1). При расчёте деформаций будем учитывать, что детали спирально-реечного механизма изготовлены из одного материала. У патронов, выпускаемых серийно, — это сталь 40X. Формула (1) может быть представлена в виде:

$$\rho = (a_0 + \Delta a)\varphi \ , \tag{6}$$

где  $a_0$ ,  $\Delta a$  — радиус эволюты эвольвенты спирали диска и её отклонение от заданного, м;  $\varphi$  — значение угла развёрнутости эвольвенты, рад.

Исходя из этого, определим коэффициент прогиба витков спирали:

$$\lambda_{ei} = 12\Delta a\varphi^2 \frac{\left(K + \chi\right)}{\pi^2 E_R b(h)} \left[1 + \frac{1}{2} \sum \cos k\varphi\right], (7)$$

где K — значение функций Крылова для оболочки с параметрами спирали диска;  $\chi$  — коэффициент, что свойства спирали отличаются от свойств длинномерных оболочек, а значения модуля упругости имеют разброс до 15 %; b(h) — толщина спирали (м), представленная как функция от высоты h (м) спирали (с учётом анизотропии жёсткости спирального диска).

Суммирование в формуле (7) производят по коэффициенту  $k = 3, 6, 9 \dots \infty$ .

Зацепление спирального диска с рейкой кулачка дискретно. Следовательно, распределение усилий по высоте свинчивания спирали можно определить из системы уравнений (8):

$$\begin{cases}
Q_{n-1} = l\rho_n \\
Q_{n-2} = l(\rho_{n-1} + \rho_n) \\
\dots \\
W = l(\rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_{n-1} + \rho_n)
\end{cases}$$
(8)

где l — длина контакта витка и зуба, м; W — общая нагружающая сила, H.

Жёсткость основной части спирального диска и рейки кулачка многократно превышает жёсткость витков и зубьев. Соответственно система уравнений (8) даёт точное описание значения продольных усилий. Подобный расчёт используют для оценки распределения нагрузки в многовитковом резьбовом соединении [15].

Совместное решение систем уравнений (2) и (8), даёт выражения для величин рабочих давлений зубьев рейки и витков спирали:

$$\rho_{n-1} = \frac{\rho_{n} \left[\beta_{n-1} + \gamma_{n}\right]}{\gamma_{n-1}} = C_{n-1} \rho_{n}$$

$$\rho_{n-2} = \frac{\rho_{n} \left[\beta_{n-1} + \beta_{n-2} \left(1 + C_{n-1}\right) + \gamma_{n}\right]}{\gamma_{n-2}} = C_{n-2} \rho_{n}$$

$$\rho_{1} = \frac{\rho_{n} \left[\beta_{n-1} + \beta_{n-2} \left(1 + C_{n-1}\right) + \dots + \beta_{1} \left(1 + C_{n-1} + \dots + C_{2}\right) + \gamma_{n}\right]}{\gamma_{1}} = C_{1} \rho_{n}$$
(9)

Введены обозначения:

$$\gamma_i = \lambda_{ei} + \lambda_3, \qquad (10)$$

$$\beta_i = l \left( \frac{1}{E_{\mathcal{I}} F_{\mathcal{I}i}} + \frac{1}{E_{\kappa} E_{ki}} \right). \tag{11}$$

Решая совместно последнее уравнение системы (8) и систему уравнений (9), можно выразить рабочее давление  $\rho_n$ , действующее на последний виток спирали или зуб через рассчитанные величины:

$$\rho_n = \frac{W}{\left(1 + \sum C_i\right)l} \,. \tag{12}$$

Суммирование в формуле (12) производится от первого до предпоследнего витка, находящегося в зацеплении.

Теперь можно определить составляющие уравнения (2), исходя из характера силовых параметров, действующих в спирально-реечном механизме, следующим образом:

$$\mathcal{G} = \mathcal{G}_{_{\!ROHm}} + W \frac{\left[ C_1 \left( \lambda_{_{\!G}} + \lambda_{_{\!3}} \right) - lt \left( \sum \frac{M}{E_{_{\!K}} F_{_{\!ki}}} - \sum \frac{M}{E_{_{\!I\!J}} F_{_{\!J\!i}}} \right) \right]}{\left( 1 + \sum C_i \right)}, \tag{14}$$

где W — сумма радиальных составляющих всех сил, действующих на кулачок, H.

Суммирование производят по всем i-м сечениям диска и рейки. В формуле (14) обозначено:

$$M = 1 + \sum C_m . \tag{15}$$

Наиболее значительная из радиальных составляющих всех сил — усилие закрепления. Необходимо учитывать силу резания и центробежные силы. Суммирование происходит по каждому m-му сечению диска и рейки. Уравнение (14) составлено с учётом, что силы W направлены от оси патрона.

Существенное значение на величину упругого смещения кулачков имеет зазор между витком спирали и зубом рейки, которые входят в контакт вторыми после наиболее нагруженных витков и зубьев. После того как вторая пара вит-

$$\begin{cases}
\delta_{e} = \lambda_{el} C_{1} \rho_{n} \\
\delta_{3} = \lambda_{3} C_{1} \rho_{n}
\end{cases}$$

$$\Delta_{K} = \sum_{i} Q_{i} \frac{\left(S + \Delta S_{i}\right)}{E_{K} F_{Ki}},$$

$$\Delta_{\mathcal{A}} = \sum_{i} Q_{i} \frac{\left(S + \Delta S_{i}\right)}{E_{\mathcal{A}} F_{\mathcal{A}i}}$$

$$\Delta_{\mathcal{A}} = \sum_{i} Q_{i} \frac{\left(S + \Delta S_{i}\right)}{E_{\mathcal{A}} F_{\mathcal{A}i}}$$
(13)

где i – номер витков и зубьев, находящихся в зацеплении.

Решая уравнение (2) с учётом значений системы (13), можно получить величину упругого смещения кулачков, определённую с учётом анизотропии жёсткости деталей центрирующего механизма и реономных процессов (например, релаксации напряжений) упругой системы патрона. Величина перемещения зажимной поверхности кулачка патрона в зависимости от упругих деформаций деталей спирально-реечного механизма определяется:

ков и зубьев входит в зацепление, жёсткость спирально-реечного механизма существенно возрастает в данном сечении и его деформация начнёт стремиться к минимуму. Таким образом, наиболее существенное влияние на величину упругого смещения кулачков оказывает разность отклонений по шагу зубьев и витков. Расчёт по формулам методики верен при разности по шагу между витками и зубьями равной  $1,0\cdot10^{-5}$  м (0,01 мм) для патрона с номинальным значением шага витков и зубьев  $8,0\cdot10^{-5}$  м (8 мм). А также для патрона с номинальным шагом 1,0·10<sup>-2</sup> м (10 мм), имеющим разность по шагу 2,5·10<sup>-5</sup> м (0,025 мм). В случае, если разность по шагу больше указанных значений, то в зацеплении будут участвовать только одна пара витков и зубьев. Остальные витки и зубья будут нести нагрузку не более 10 % от W. При этом значение коэффициентов  $C_1$  будет стремиться к единице.

**Конструкции спиральных дисков.** Конструктивные решения основаны на использовании:

1. Анизотропии жёсткости спирального диска [16].

2. Установления соответствия между алгоритмом изменения шага витков (зубьев) и алгоритмом изменения нагрузки между несущими элементами спирально-реечного механизма [17].

Первая испытанная конструкция диска, улучшающая распределение нагрузки между элементами центрирующего механизма патрона представлена на рис. 1.

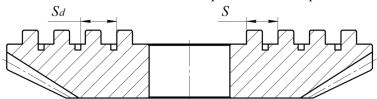


Рис. 1. Геометрия дополнительной спиральной канавки на диске

Целенаправленное изменение анизотропии жёсткости спирального диска патрона возможно за счёт выполнения дополнительной спиральной канавки — шаг  $S_d$ , который подчиняется зависимости:

$$S_d = \left(1 + \frac{1}{n}\right) S, \tag{16}$$

где S — шаг основной спирали диска, м; n — число витков спирали.

Расположение канавки таково, что она начинается за первым со стороны посадочного отверстия витком спирали диска и оканчивается перед последним. Следовательно, не зависимо от направления нагрузки, дополнительная спиральная канавка всегда находится за первым со стороны действия нагрузки витком. Это позволяет сместить наиболее нагруженный виток относительно менее нагруженных витков. После смещения, за счёт проявления упругого последействия, происходит релаксация напряжения в наиболее нагруженных витках и зубьях и нагрузка перераспределяется.

Вторая испытанная конструкция предусматривает изменение шага спиральной нарезки

диска патрона. Переменный шаг способствует перераспределению нагрузки. Его определяют согласно зависимости:

$$S = W_S m_1 \lambda_1 \cdot m_2 \lambda_2 \cdot q(z), \quad (17)$$

где  $W_S$  — сила, действующая в зацеплении спираль диска — зубья рейки, H;  $m_I$ ,  $\lambda_I$  — коэффициенты, зависящие от упругих и геометрических свойств спирального диска, M/H;  $m_2$ ,  $\lambda_2$  — коэффициенты, зависящие от упругих и геометрических свойств зубчатой рейки, M/H; q(z) — интенсивность распределения нагрузки между несущими элементами спирально-реечного механизма, H/M.

В условиях крупносерийного производства целенаправленное изменение шага спирали по алгоритму (17) можно осуществить с использованием специализированного оборудования [18]. В условиях мелкосерийного производства (инструментальные цеха машиностроительных предприятий) обработку подобных спиральных дисков осуществляют на универсальном оборудовании с последующей доводкой. Точность обработки можно повысить при точении спиралей на токарных многоцелевых станках с программным управлением.

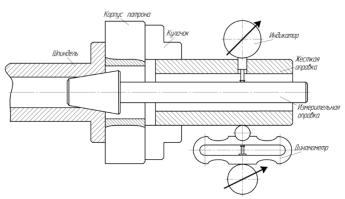


Рис. 2. Схема установки для проверки кулачковых патронов на жёсткость

Испытания и результаты. Проведены испытания патронов, содержащих диски первой и

второй конструкции. Осуществлена проверка патронов на жёсткость, силу закрепления и потерю

устойчивости из-за несоответствия сил закрепления силам резания [19]. Жёсткость проверяли по схеме, представленной на рис. 2. Силу зажима измеряли, используя метод закрепления алюминиевого кольца [20]. Устойчивость патрона оценивали способом точения конической заготовки.

Результаты испытаний показали повышение жёсткости патрона при одной и той же величине зазоров в сопряжениях: направляющие корпуса – рейка кулачка; ступица корпуса – посадочное отверстие спирального диска. В случае установки диска первой конструкции – от 2 до 8 %. Для патронов с диском второй конструкции – от 5 до 11 %. Сравнение проводили относительно патронов серийной конструкции.

#### Выводы

- 1. Разработана методика расчёта распределения нагрузки между элементами центрирующего механизма патрона, учитывающая дискретность зацепления витков и зубьев, а также процессы изменения упругой системы патрона во времени.
- 2. Проведена апробация различных конструкций дисков патронов, геометрические параметры которых рассчитаны с использованием предлагаемой методики. Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанные конструкции к промышленному применению.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Feng P.F., Yu D.W., Wu Z.J., Uhlmann E. Jaw-chuck stiffness and its influence on dynamic clamping force during high-speed turning // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2008. Vol. 48. Is. 11. Pp. 1268–1275.
- 2. Lu K., Wang Y., Gu F., Pang X., Ball A. Dynamic modeling and chatter analysis of a spindle-workpiece-tailstock system for the turning of flexible parts // Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 104. Pp. 3007–3015.
- 3. Singh A., Asjad M., Gupta, P. Reconfigurable machine tools: a perspective // Life Cycle Reliab Saf Eng. 2019. Vol. 8. Pp. 365–376.
- 4. Rahman M., Ito Y. Machining Accuracy of a Cylindrical Workpiece Held by Three-Jaw Chuck // Bul. of the Japan Society of Precision Eng. 1979. Vol. 13. No. 1. Pp. 7–12.
- 5. Thorenz B., Westermann H.-H., Steinhilper R. Evaluation of the influence of different clamping chuck types on energy consumption, tool wear and surface qualities in milling operations // Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 21. Pp. 575–582.
- 6. Lu K., Gu F., Longstaff A., Li G. An investigation into tool dynamics adaptation for chatter stability enhancement in the turning of flexible workpieces // Int J Adv Manuf Technol. 2020. Vol. 111. Pp. 3259–3271.

- 7. Feng P.F., Yu D.W., Wu Z.J., Uhlmann E. An improved computation model for critical bending force of three-jaw chucks // Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 208. Is. 1–3. Pp. 124–129.
- 8. Rahman M., Tsutsumi M. Effect of spindle speed on clamping force in turning // Journal of Materials Processing Technology. 1993. Vol. 38. Is. 1–2. Pp. 407–415.
- 9. Nyamekye K., Mudiam S.S. A model for predicting the initial static gripping force in lathe chucks // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 1992. Vol. 7. Pp. 286–291.
- 10. Tsutsumi M. Chucking force distribution of collet chuck holders for machining centers // Journal of Mechanical Working Technology. 1989. Vol. 20. Pp. 491–501.
- 11. Чернянский П.М. Последействие механической системы станков // Вестник машиностроения. 2013. № 1. С. 57–59.
- 12. Ивасышин Г.С. Влияние упругого последействия и аддитивности упругого последействия упругой системы прецизионного металлорежущего станка на статическую характеристику трения, износостойкость и фреттингостойкость плоских направляющих // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2006. № 9. С. 32–39.
- 13. Ивасышин Г.С. Влияние упругого последействия на контактную жёсткость металлорежущих станков и автоматических роторных линий // Известия вузов. Машиностроение. 1988. № 3. С. 126–130.
- 14. Серёгин А.А., Кравцов А.Г. Мониторинг технологических систем при обработке точных поверхностей сложного контура // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Серия «Машиностроение». 2018. Том 18. № 4. С. 48–56.
- 15. Блинов Д.С., Морозов М.И. Неравномерность распределения нагрузки между сопрягаемыми витками ролика и винта с гайкой планетарной роликовинтовой передачи // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 9. С. 1–14.
- 16. SU 1514502, СССР, МКИ В 23 В 31/02. Самоцентрирующий токарный патрон / А.А. Серёгин. № 4318826/31-08; заявл. 25.08.87; опубл. 07.02.1989, Бюл. № 38. 4 с.
- 17. SU 984704, СССР, МКИ В 23 В 31/16. Трёхкулачковый самоцентрирующий токарный патрон / Г.С. Ивасышин. № 3317394/25-08; заявл. 13.07.1981; опубл. 30.12.1982, Бюл. № 48. 4 с.
- 18. SU 1288028, СССР, МКИ В 24 В 17/12. Спирально-шлифовальный станок / Г.С. Ивасышин, М.И. Парышкура, А.А. Серёгин. № 3949220/25-27; заявл. 09.09.85; опубл. 07.02.1987, Бюл. № 5. 4 с.

19. Walter M.F., Ståhl J.E. The connection between cutting and clamping forces in turning // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1994. Vol. 34. Is. 7. Pp. 991–1003.

20. Estrems M., Arizmendi M., Cumbicus W.E., López A. Measurement of clamping forces in a 3 jaw chuck through an instrumented aluminium ring // Procedia Engineering. 2015. Vol. 132. Pp. 456–63.

#### Информация об авторах

**Серегин Андрей Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: aasdom@yandex.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

**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.

**Крылова Светлана Евгеньевна**, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: krilova27@yandex.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поступила 08.02.2021 г.

© Серегин А.А., Никитина И.П., Крылова С.Е., 2021

#### \*Seregin A.A., Nikitina I.P., Krylova S.E.

Orenburg state University \*E-mail: aasdom@yandex.ru

#### INCREASING THE RIGIDITY OF THE SELF-CENTERING DEVICES OF LATHES

Abstract. Increasing the rigidity of universal self-centering devices is one of the topical trends in the design of machine tooling. Calculation of the load distribution between the turns and teeth of a spiral rack and pinion mechanism is a complex engineering problem. When working on the article, it was revealed that an adjacent pair of turns and teeth that are in engagement does not always coincide with a geometrical adjacent pair due to the error in the execution of turns and teeth along the pitch and profile. This is based on experimental data and the proposition that errors in the pitch and profile of the spiral determine the nature of the working pressures in the engagement of the turns and teeth. The article discusses technical solutions in which the rigidity of self-centering devices increases without significant structural changes due to the establishment of the correspondence of the algorithm for changing the elastic properties of parts of the spiral-rack mechanism to the algorithm for changing the load between the bearing elements. Constructive solutions based on the implementation of elastic displacement of the first most loaded turn are proposed, which allows to reduce the interference between the tooth of the cam rack and the turn of the disk spiral. This circumstance contributes to the redistribution of the load in the engagement of the bearing elements of the spiral-rack mechanism. The tests of the developed structures were carried out, which gave positive results.

**Keywords:** rigidity, load distribution, spiral rack and pinion mechanism, lathes.

#### REFERENCES

- 1. Feng P.F., Yu D.W., Wu Z.J., Uhlmann E. Jaw-chuck stiffness and its influence on dynamic clamping force during high-speed turning. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2008. Vol. 48. Is. 11. Pp. 1268–1275.
- 2. Lu K., Wang Y., Gu F., Pang X., Ball A. Dynamic modeling and chatter analysis of a spindle-workpiece-tailstock system for the turning of flexible parts. Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 104. Pp. 3007–3015.
- 3. Singh A., Asjad M., Gupta, P. Reconfigurable machine tools: a perspective. Life Cycle Reliab Saf Eng. 2019. Vol. 8. Pp. 365–376.
- 4. Rahman M., Ito Y. Machining Accuracy of a Cylindrical Workpiece Held by Three-Jaw Chuck.

- Bul. of the Japan Society of Precision Eng. 1979. Vol. 13. No. 1. Pp. 7–12.
- 5. Thorenz B., Westermann H.-H., Steinhilper R. Evaluation of the influence of different clamping chuck types on energy consumption, tool wear and surface qualities in milling operations. Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 21. Pp. 575–582.
- 6. Lu K., Gu F., Longstaff A., Li G. An investigation into tool dynamics adaptation for chatter stability enhancement in the turning of flexible workpieces. Int J Adv Manuf Technol. 2020. Vol. 111. Pp. 3259–3271.
- 7. Feng P.F., Yu D.W., Wu Z.J., Uhlmann E. An improved computation model for critical bending force of three-jaw chucks. Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 208. Is. 1–3. Pp. 124–129.

- 8. Rahman M., Tsutsumi M. Effect of spindle speed on clamping force in turning. Journal of Materials Processing Technology. 1993. Vol. 38. Is. 1–2. Pp. 407–415.
- 9. Nyamekye K., Mudiam S. S. A model for predicting the initial static gripping force in lathe chucks. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 1992. Vol. 7. Pp. 286–291.
- 10. Tsutsumi M. Chucking force distribution of collet chuck holders for machining centers Journal of Mechanical Working Technology. 1989. Vol. 20. Pp. 491–501.
- 11. Chernyanskiy P.M. The Residual effect of mechanical systems of machines [Posledeystvie mechnicheskoy sistemy stankov]. Bulletin of machine-building. 2013. No. 1. Pp. 57–59. (rus)
- 12. Ivasishin G.S. Influence of elastic aftereffect and additivity of elastic aftereffect of an elastic system of a precision metal-cutting machine on the static characteristic of friction wear resistance and fretting resistance of flat guides [Vliyanie uprugogo posledeystviya i additivnosti uprugogo posledeystviya uprugoj sistemy pretsizionnogo metallorezhustchego stanka na staticheskuyu harakteristiku treniya iznosostoykost i frettingostoykost ploskih napravlyaustchih]. Friction and lubrication in machines and mechanisms. 2006. No. 9. Pp. 32–39. (rus)
- 13. Ivasishin G.S. Effect of elastic aftereffect on the contact stiffness of machine tools and automatic rotary lines [Vliyanie uprugogo posledeystviya na kontaktnuyu zhestkost metallorezhustchih stankov i avtomaticheskih rotornyh liniy]. Bulletin of higher educational. *Series* «Engineering». 1988. No. 3. Pp. 126–130. (rus)

- 14. Seregin A.A., Kravtsov A.G. Monitoring of technological systems when processing precise surfaces of a complex contour [Monitoring technologicheskih system pri obrabotke tochnih poverhnostej slozhnogo kontura]. Bulletin of the South Ural State University. Series «Mechanical Engineering». 2018. Vol. 18. No. 4. Pp. 48–56. (rus)
- 15. Blinov D.S., Morozov M.I. Uneven distribution of the load between the mating turns of the roller and the screw with the nut of the planetary roller screw [Neravnomernost raspredeleniya nagruzki mezhdu sopryagaemimi vitkamirolika i vinta s gaykoj planetarnoj rolikovintovoj peredachi]. Science and Education: scientific publication of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. 2014. No. 9. Pp. 1–14. (rus)
- 16. Seregin A.A. Self-centering lathe chuck. Certificate of authorship USSR, no. 1514502, 1989. (rus)
- 17. Ivasishin G.S. Three-jaw self-centering lathe chuck. Certificate of authorship USSR, no. 984704, 1982. (rus)
- 18. Ivasishin G. S., Paryshkura M.I., Seregin A.A. Spiral Grinding Machine. Certificate of authorship USSR, no. 1288028, 1987. (rus)
- 19. Walter M.F., Ståhl J.E. The connection between cutting and clamping forces in turning. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1994. Vol. 34, Is. 7. Pp. 991–1003.
- 20. Estrems M., Arizmendi M., Cumbicus W.E., López A. Measurement of clamping forces in a 3 jaw chuck through an instrumented aluminium ring. Procedia Engineering. 2015. Vol. 132. Pp. 456–463.

Information about the authors

**Seregin, Andrej A.** PhD, Assistant professor. E-mail: aasdom@yandex.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

**Nikitina, Inna P.** PhD, Assistant professor. E-mail: innanikitina@list.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

**Krylova, Svetlana E.** PhD, Professor. E-mail: krilova27@yandex.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Received 08.02.2021

#### Для цитирования:

Серегин А.А., Никитина И.П., Крылова С.Е. Повышение жесткости самоцентрирующих приспособлений токарных станков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 100–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-100-106

#### For citation:

Seregin A.A., Nikitina I.P., Krylova S.E. Increasing the rigidity of the self-centering devices of lathes. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 2. Pp. 100–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-100-106

#### Научное издание

## «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова» № 2, 2021 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)

Федеральная служба по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия ПИ №ФС 77-26533 от 07.12.2006

Подписано в печать 26.02.21. Опубликовано 23.03.21. Формат  $60 \times 84/8$  Усл. печ. л. 12,32. Уч.-изд. л. 13,25 Тираж 40 экз. Заказ 22. Цена договорная. Все публикуемые материалы представлены в авторской редакции.

Адрес редакции: 308012, 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 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46