

Научно-теоретический журнал

ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

10

2020

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**

№ 10, 2020 год

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

Vol. 10. 2020

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 (COPE).

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 heritage (architecture)
- 05.23.21** – Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture)
- 05.23.22** – Urban planning, rural settlement planning (technical sciences)
- 05.23.22** – Urban planning, rural settlement planning (architecture)
- 05.17.06** – Technology and processing of polymers and composites (technical sciences)
- 05.17.11** – Technology of silicate and refractory nonmetallic materials (technical sciences)
- 05.02.05** – Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences)
- 05.02.07** – Technology and equipment of mechanical and physical-technical processing (technical sciences)
- 05.02.08** – Engineering technology (technical sciences)
- 05.02.13** – Machines, units and processes (branch-wise) (technical sciences)

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

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

Official website of the journal: <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/>

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).

Баженов Юрий Михайлович, академик РААСН наук, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии вяжущих веществ и бетона НИУ Московского государственного строительного университета (РФ, г. Москва).

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

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

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 государственного строительного университета (РФ, г. Москва).

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

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

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

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

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

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

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

Леонович Сергей Николаевич, иностранный член академик 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 университета имени И.С. Тургенева (РФ, г. Орел).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

Elena A. Akhmedova, 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).

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

Deyan Blagovich, 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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Меньшикова В.К. ВЛИЯНИЕ НЕПЛАСТИЧНЫХ ГРУБОДИСПЕРСНЫХ КОМПОНЕНТОВ НА СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА	8
Блажнов А.А. СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ПЛЁНОЧНОЙ КРОВЛИ КУЛЬТИВАЦИОННОГО СООРУЖЕНИЯ	17
Бурьянов И.А., Логачев К.И., Уваров В.А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ ЗАТОЧНОГО УЧАСТКА	23
Елистратова Ю.В., Семиненко А.С., Минко В.А. АКТУАЛЬНОСТЬ МОДЕЛЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ПЛАСТИНАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ	33
Глухова А.В. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТИПОЛОГИЮ КОНЦЕРТНЫХ ЗАЛОВ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ	41

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Трубицын М.А., Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИНТЕЗА НА ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИОМИМЕТИЧЕСКОГО КАЛЬЦИЙ- ФОСФАТНОГО НАНОКОМПЗИТА, ДОПИРОВАННОГО СИЛИКАТ- И КАРБОНАТ-АНИОНАМИ	47
Павленко З.В., Бондаренко Н.И. ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОЛЕМАНИТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭМАЛЕЙ ПО СТАЛИ	57

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Вирабян Л.Г., Демин В.Д. ПОСТРОЕНИЕ МУЛЬТИРОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО СОБЫТИЙНОГО «СУПЕР-ТВИСТ» УПРАВЛЕНИЯ	63
Любимый Н.С., Романович М.А., Тихонов А.А., Бабкин М.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛ- МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОЙ ДЕТАЛИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ПЛОСКИМ ШЛИФОВАНИЕМ	72
Титова И.В., Коноплин А.Н. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С РАЗРАБОТКОЙ КОНСТРУКЦИИ РЕЗЦА ДЛЯ ЧИСТОВОГО ТОЧЕНИЯ	84

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Men'shikova V.K.

INFLUENCE OF NON-PLASTIC COARSE-DISPERSED COMPONENTS
ON THE PROPERTIES OF CERAMIC MATERIAL 8

Blazhnov A.A.

STATIC CALCULATION OF MEMBRANE ROOFING FOR CULTIVATION
STRUCTURES 17

Buryanov I.A., Logachev K.I., Uvarov V.A.

DETERMINATION OF THE MAIN PROPERTIES OF DUST PARTICLES IN THE
GRINDING AREA 23

Elistratova J.V., Seminenko S.A., Minko V.A.

RELEVANCE OF CONTAMINATION MODELS FOR DIAGNOSTICS OF PLATE HEAT
EXCHANGERS 33

Gluhova A.V.

FACTORS INFLUENCING THE TYPOLOGY OF CONCERT HALLS
IN SAINT PETERSBURG 41

CHEMICAL TECHNOLOGY

Troubitsin M.A., Hoang Viet Hung, Furda L.V.

INFLUENCE OF SYNTHESIS TECHNO-CHEMICAL PARAMETERS
ON PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF BIOMIMETIC
CALCIUM-PHOSPHATE NANOCOMPOSITE DOPED BY SILICATE
AND CARBONATE ANIONS 47

Pavlenko Z.V., Bondarenko N.I.

STUDYING THE POSSIBILITY OF USING COLEMANIT TO OBTAIN ENAMELS
ON STEEL 57

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Virabyan L.G., Demin V.D.

BUILDING A MULTI-ROBOT SYSTEM BASED ON STOCHASTIC SUPER-TWIST
EVENT MODE CONTROLLER 63

Lubimyi N.S., Romanovich M.A., Tikhonov A.A., Babkin M.S.

INVESTIGATION OF THE SURFACE TEMPERATURE OF A METAL-METAL
POLYMER PART DURING FLAT GRINDING MACHINING 72

Titova I.V., Konoplin A.N.

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF MACHINING WITH
THE DESIGN OF THE CUTTER FOR FINISH TURNING 84

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-8-16

Меньшикова В.К.

Сибирский федеральный университет

E-mail: vi1222@mail.ru

ВЛИЯНИЕ НЕПЛАСТИЧНЫХ ГРУБОДИСПЕРСНЫХ КОМПОНЕНТОВ НА СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Аннотация. В современных условиях для производства строительной керамики используется глинистое сырье мелкозернистой структуры. Поставленная задача применения грубодисперсных нетрадиционных непластичных компонентов в составах керамических масс и выбор рациональных размеров их зерен является актуальной. Исключение предварительного измельчения предопределяет снижение энергозатрат и как следствие себестоимости готовой продукции. В работе предложен вариант использования диопсидового концентрата различной величины зерна в композициях составов с незначительными добавками глины и раствора силиката натрия. Решены вопросы развития напряжений на границе контакта зерна и связки, которые при отрицательном исходе не представляют возможным получение прочной структуры керамического черепка. Выявлено присутствие незначительного напряжения, образованного в результате взаимосвязи диопсида и формирующейся стеклофазой, которое не препятствует рассмотреть вероятность получения керамического материала. Исследование поведения образцов керамики с содержанием диопсида различного гранулометрического состава при добавлении раствора натрий-силикатного стекла после формования и обжига показало эффективность использования диопсидового концентрата в 100–150 мкм. Контакты таких размеров диопсида при формовании обволакиваются жидким стеклом. При обжиге образовывается стеклофаза. При этом диопсид частично оплавляється, но сохраняется и существует как самостоятельная единица. Меньший размер зерна при спекании требует большего количества стеклофазы, что приводит к структурным напряжениям, а при большем размере – образовывается недостаточно стеклофазы и значительно уменьшается прочность материала. При изучении влияния размера зерна на свойства образца получены результаты показателей водопоглощения 7 %, механической прочности при сжатии – 36 МПа, при изгибе – 17 МПа. Установлено, что дисперсность диопсида в 100–150 мкм позволяет разработать технологию применения грубозернистого сырья в керамической массе.

Ключевые слова: дисперсность, диопсидовый концентрат, глина, натрий-силикатное стекло, водопоглощение, прочность.

Введение. Проблема [1–2] истощения месторождений глин и суглинков, применяемых в производстве строительных облицовочных керамических материалов, стоит достаточно остро. В связи с чем поиск нового вида сырья является актуальной задачей. В последнее время все чаще ученые начали обращать внимание на местные нетрадиционные сырьевые ресурсы, в частности на непластичные кварц, полевои шпат, волластонит, диопсид и др.

Известно, что получение керамического материала на основе техногенного и природного сырья с упрочненной структурой возможно при добавлении в составы волластонита до 10 %. Огневая усадка в отличие от изделий с привычными компонентами снижается до 1–4 %, а прочность при сжатии возрастает и составляет от 35 МПа до 50 МПа [3].

Применение непластичного сырья в композициях керамических масс дает возможность уменьшить толщину облицовочных плиток на

30 % и как следствие сократить потребление сырья до 20 %, топлива, и повысить объемы производства. При этом результаты значений физико-механических свойств после прессования и обжига достаточно велики. Необходимо отметить, что при увеличении содержания непластичного сырья в составе керамической массы механическая прочность при изгибе возрастает на 35 % и 50 % после формования и сушки соответственно. Усадка таких изделий после обжига минимальна, она составляет 0,2–0,3 % [4].

Введение непластичного сырья, в частности волластонита месторождения Кара-Корум при минимальном содержании оксидов железа, титана и щелочных металлов в керамическую массу в количестве 20 % после обжига при температуре 1100 °С возможно получение облицовочной плитки с высокими показателями прочности при изгибе (90 МПа), усадкой 4 %, термостойкостью 190 °С, водопоглощением 3 % [5].

Таким образом, введение в составы керамических масс непластичных материалов позволяет

при уменьшении температуры обжига значительно снизить усадку изделий, повысить прочностные характеристики. В связи с чем появляется вероятность получения крупноразмерных плит.

Традиционно измельчение непластичного сырья в композициях с глиной методом мокрого помола осуществляется до размера зерна в 60 мкм.

Авторами [6–8] решены вопросы применения непластичных компонентов в составах с глинистым сырьем с предельно допустимой дисперсностью зерна. Таким образом, при 0,5–1,25 мм кварцевого зерна, 1,25–3 мм полевых шпатов, 3–5 мм шлака получены образцы с высокими эксплуатационными свойствами. При расчете температурных напряжений со значением связки до 40 % выявлено, что напряжения, соответствующие 10–30 % устойчивы для получения прочной керамики.

Получен керамический материал в композицию которого входили грубозернистые массы при размере зерна 2,5–3 мм непластичного природного и техногенного сырья (кварц-полевошпатовый сорский песок, зола, шлак) с высокими физико-механическими свойствами. Вследствие увеличения зерна до 5–10 мм, толщина изделия была увеличена в 2 раза, а показатели прочности при изгибе и сжатии составили 31 МПа и 290 МПа соответственно, значение морозостойкости показало более 50 циклов.

В данной работе решались задачи использования грубодисперсного непластичного сырья в качестве основного компонента в керамической массе и его влияние на свойства материала.

Материалы и методы. Исследовались образцы керамических масс, отличающихся процентным наполнением компонентов, которые распределились следующим образом: М1 – 75 % диопсид [9], 15 % жидкое стекло, 10 % глина; М2 – 80 % диопсид, 10 % жидкое стекло, 10 % глина; М3 – 80 % диопсид, 15 % жидкое стекло,

5 % глина; М4 – 85 % диопсид, 15 % жидкое стекло [10–11].

Диопсидовый концентрат – основное звено в композиции. Это продукт обогащения Бурутуйского месторождения Слюдянской группы Южного Прибайкалья. Является видом минерального непластичного сырья, отличается высокими физико-механическими характеристиками, в том числе прочностными и диэлектрическими, оказывает сопротивление воздействию кислот, солей, газов, щелочей. Его добавка в керамические массы снижает температуру обжига до 1000 °С [12–14].

Глина Компановского месторождения присутствовала для обеспечения пластичности. Является высокодисперсной каолиновой с примесью монтмориллонита, характеризуется как тугоплавкая, среднепластичная, термически устойчива и обладает высокой связующей способностью.

Раствор из силиката натрия, обеспечивал работу плавня. Имеет степень силикатного модуля равный 3, по виду щелочного катиона является натриевым, плотность раствора – 1425 кг/м³.

Исследованы химический и минеральный составы представительных проб компонентов керамических масс используя рентгеноспектральный флуоресцентный аналитический метод и качественный рентгенофазовый анализ соответственно.

Анализ химического состава (табл. 1) показал, что кремнезем является основным оксидом диопсидовой породы. Количество щелочных и щелочноземельных металлов незначительно. Необходимо отметить, что содержание Fe₂O₃ составляет не более 0,1 %. Это говорит об отсутствии красящих соединений, а значит о чистоте сырья. Глина характеризуется наличием SiO₂ и Al₂O₃. По содержанию глинозема сырье является кислым и полукислым. Отмечено небольшое присутствие оксидов железа. Присутствие K₂O, Mg₂O и Na₂O предполагает наличие гидрослюда и монтмориллонита.

Таблица 1

Химический состав сырьевых компонентов

Массовая доля, %							
диопсид							
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
57,8	0,03	0,18	0,09	23,3	13,4	0,09	0,06
глина							
73,26	0,7	21,41	1,67	0,61	1,01	-	2,11

Минеральный состав (табл. 2) подтверждает данные химического анализа. Он представлен в диопсидовом сырье в первую очередь самим диопсидом, а также кварцем, кальцитом и слюдой. Глинистое сырье содержит кварц, полевой шпат,

каолинит, гидромусковит, монтмориллонит и гематит.

Выполнялось исследование на предмет воздействия диопсида разного гранулометрического

состава и вида его формирования на свойства керамического материала. Размер зерен образцов варьировался от 80 мкм до 515 мкм. При прессовании образцов при влажности 10–12 % под давлением 20 МПа использовался полусухой способ. Исследуемые образцы обжигались при 800–1250 °С, где выдерживалась пауза в 50 °С на протяжении 30 мин.

Таблица 2
Минеральный состав сырья

Минерал	Наименование сырья	
	диопсидовый концентрат	компановская глина
диопсид	+	-
кварц	+	+
полевошпат	-	+
кальцит	+	-
каолинит	-	+
гидромусковит	-	+
монтмориллонит	-	+
гематит	-	+

Напряжения внутри и на границе зерен диопсида определялись методом рентгенографического анализа на порошковом рентгеновском дифрактометре.

При помощи современных способов исследований определялись физико-механические свойства образцов. Предел прочности при сжатии и изгибе устанавливался в соответствии со стандартной методикой на формах в виде балочек с использованием прецизионного пресса, водопоглощение фиксировалось на плитках массой

не менее 50 г путем насыщения их водой при кипячении в течение 1 часа в соответствии с требованиями ГОСТ 27180-2002.

Метод ситового анализа с помощью лабораторных сит использовался для определения дисперсности. Диопсид просеивался через сита номеров менее 0,08, 0,08, 0,14 и 0,515 мм.

Получение гранулометрического состава происходило сухим способом на механическом приборе типа Ротап.

Результаты и обсуждения. Каркас керамики из грубодисперсных масс формируется на счет зерен непластичного сырья и связывающих их тонкодисперсных составляющих. Структурные и прочностные характеристики такого материала наряду со степенью уплотнения зависят в том числе и от взаимодействия зерна и его оболочки. Влияние термических напряжений внутри и на границе зерна, величина коэффициентов термического расширения и модуль упругости также велико.

Расчет термических напряжений на границах зерен диопсидового сырья производился для установления их максимальных размеров.

На основании анализов напряжений (рис. 1), можно сказать, что возможность использования в керамике грубозернистого диопсида имеется, поскольку возникающие напряжения между его зернами и жидкой фазой, образованной легкоплавкими компонентами в глине и стеклом невелики при использовании непластичного сырья зернистостью до 200 мкм.

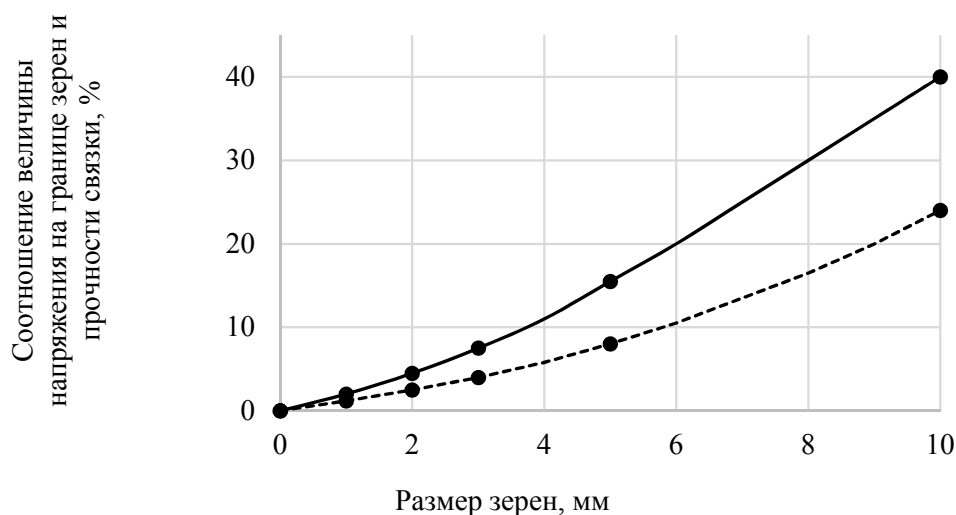


Рис. 1. Соотношение величины напряжений на границе зерен диопсида от величины прочности материалов зерна и связки: – зерно диопсидовой породы, — соотношения величины напряжений от прочности

Графики влияния размера зерна диопсида на водопоглощение и прочность (рис. 2, 3) отме-

чают рост показателей водопоглощения и снижение прочности после обжига (1000 °С) при увеличении дисперсности непластичного сырья.

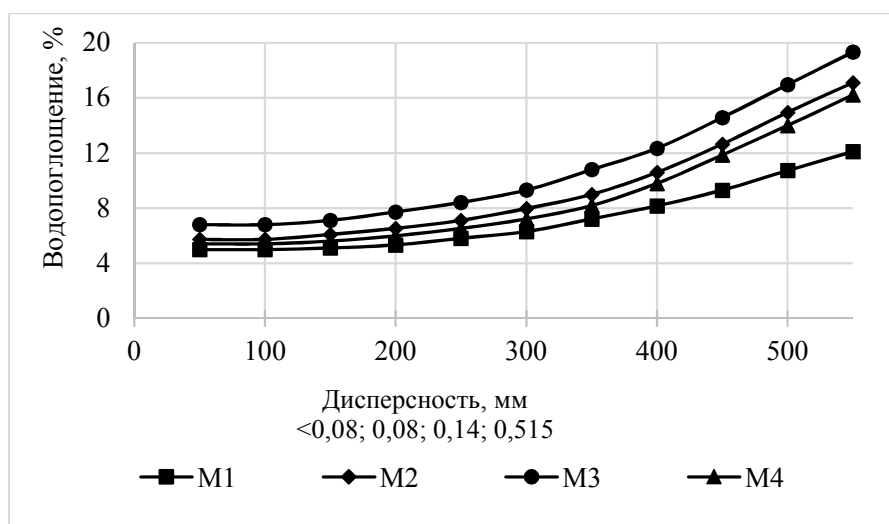


Рис. 2. Зависимость водопоглощения при сжатии образцов от размера зерен после обжига при температуре 1000 °С

Состав M1 отличается от других составов наименьшим значением водопоглощения, который варьируется от 13 % (150 мкм) и 5 % (515 мкм). Добавка в композицию диопсидового сырья в количестве 5 % ведет к увеличению водопоглощения до 6 % и 7 % при 150 мкм и 13 % и

15 % при 515 мкм у масс M2 и M3 соответственно. Размер зерна в 150 мкм обеспечивает показатель водопоглощения для состава без глинистого сырья (M4) в 5,5 %, когда как при 515 мкм – 12,6 %.

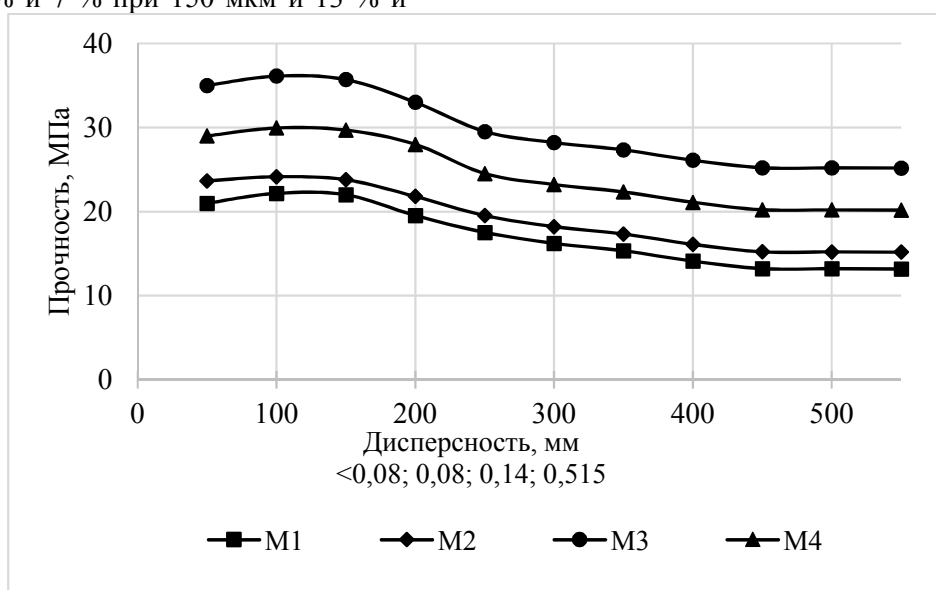


Рис. 3. Зависимость прочности при сжатии образцов от размера зерен после обжига при температуре 1000 °С

При дисперсности диопсида в пределах от 100 до 150 мкм керамические образцы обладают наибольшими прочностными характеристиками. Необходимо отметить, что размер зерна менее 80 мкм или более 150 мкм не обеспечивает достаточной прочности материалу.

Градация образцов по величине прочности при дисперсности в 100-150 микрон распределилась следующим образом: образцы M3 и M4 с наибольшим содержанием диопсидового концентрата и раствора силиката натрия занимают более

высокое положение на кривой графика, их показатели составляют 36 МПа и 30 МПа соответственно, далее разместились составы M1 и M2 с прочностью 22,2 МПа и 24,2 МПа с добавлением 10 % глинистого сырья.

Состав M3 по всем показателям превосходит другие керамические образцы (рис. 4). Его рецептура содержит 80 % диопсидового концентрата, 15 % натрий-силикатного раствора и 5 % глины, что при дисперсности основного компонента в 100 мкм гарантирует материалу при спекании на

1000 °С прочность при сжатии до 33 МПа, водопоглощение 6 % и незначительную усадку 0,3 %, а при обжиге на 1100 °С прочность при сжатии

достигает 35 МПа, водопоглощение составляет 6,2 %, усадка 0,4 %.

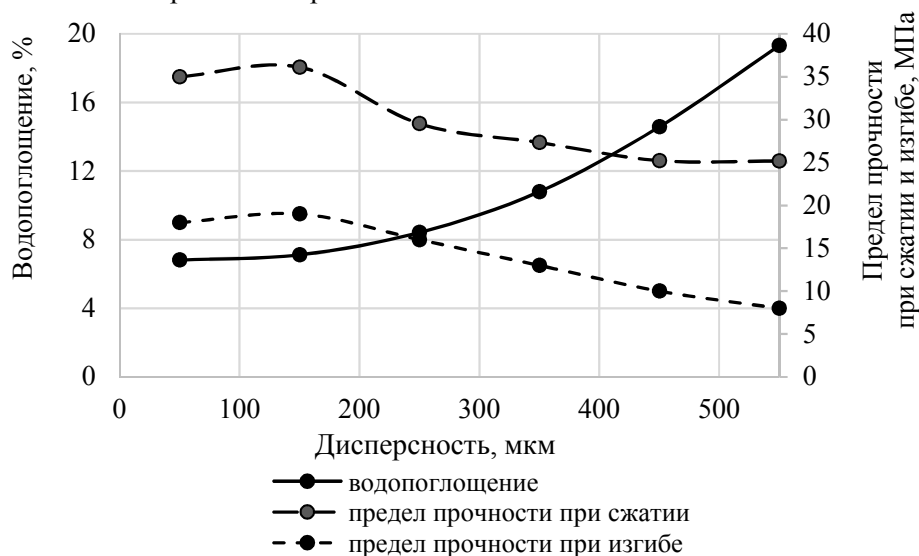


Рис. 4. Зависимость водопоглощения и предела прочности при сжатии и изгибе образца М3 от размера зерен диопсида после обжига при температуре 1000 °С

Достаточные показатели физико-механических свойств образцов (табл. 3) при дисперсности диопсидового сырья в 100–150 мкм можно обосновать тем, что при обжиге керамический черепок образца макроармируется оплавленными зернами диопсида при образовании стеклофазы за счет включения в состав раствора натрий-силикатного стекла и микроармируется в итоге раз-

рушения структуры и благодаря появлению новых фаз в виде анортита, монтмориллонита, гидромусковита и карбоната кальция, что подтверждают термический и рентгенофазовый анализы материала (рис. 5, 6). На термограммах кривая ДТА показывает эндоэффект при 910–940 °С, на рентгенограмме выявлены пики анортита ($d=0,405; 0,318$ нм) [15].

Таблица 3

Свойства керамики в зависимости от размера зерна диопсида

Показатель	Состав М1	Состав М2	Состав М3	Состав М4
Температура обжига, °С	1000	1000	1000	1000
Водопоглощение, %	5,32	5,98	7,12	5,53
Прочность при сжатии, МПа	22,17	24,15	36,12	29,95

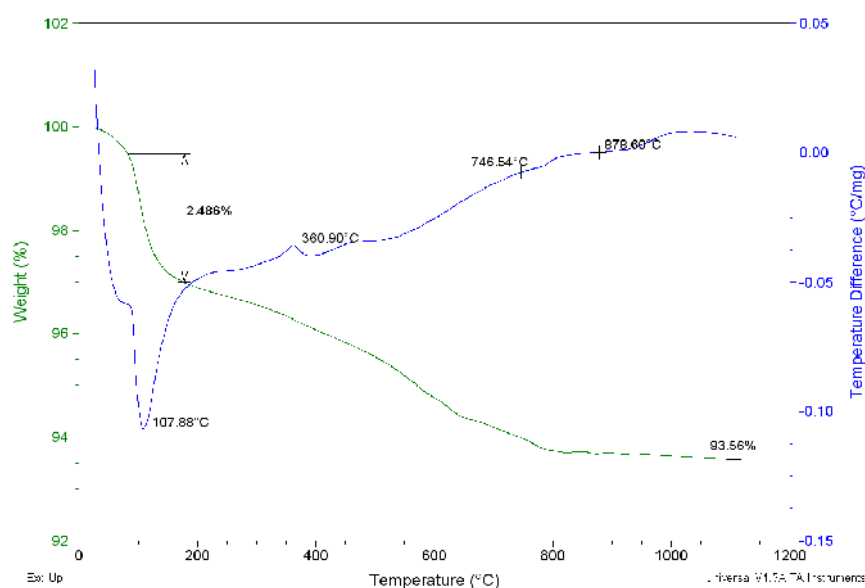


Рис. 5. Термограмма керамического состава М3

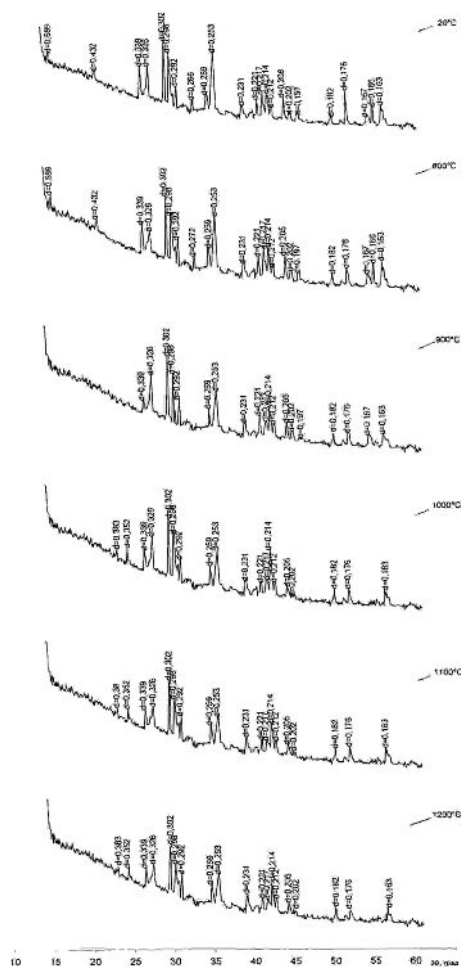


Рис. 6. Рентгеновские диффрактограммы керамического состава М3

Выводы. Проведенными исследованиями установлено влияние размера зерна диопсидового сырья на изменение физико-механических свойств керамического материала. Дисперсность в 100–150 микрон предопределяет значения прочности и водопоглощения в пределах 23–36 МПа и 5–7 % соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меньшикова В.К. Состояние и тенденции развития рынка строительной облицовочной керамики в регионе // Проблемы развития рынка товаров и услуг: перспективы и возможности субъектов РФ. Материалы V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Сибирский федеральный университет, Торгово-экономический институт. 2019. С. 495–498.
2. Енджиевский С.Л., Карасев М.С., Булычев Т.И. Повышение физико-механических характеристик керамических изделий // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. Сборник материалов XVI международной научно-практической конференции. 2018. С. 78–80.
3. Столбоушкин А.Ю. Влияние добавки волластонита на формирование структуры стеновых керамических материалов из техногенного природного сырья // Строительные материалы. 2015. № 8. С. 13–17.
4. Позняк А.И., Левицкий И.А., Баранцева С.Е. О повышении механической прочности керамических плиток на стадиях прессования и сушки // Техника и технология силикатов. 2015. Т. 21. № 1. С. 2–6.
5. Патент 2525414 Российская Федерация, МПК C04B33/132. Керамическая масса для изготовления строительных изделий и керамических плиток / С.Ж. Жекишев, Н.И. Кудряшов; заявитель и патентообладатель Фед. гос. бюдж. обр. учр. высш. проф. образ. Рос. хим-технол. ун-т им. Д.И. Менделеева. N 2013107113/03; заявл. 19.02.2014; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22. 7 с.
6. Верещагин В.И., Шильцина А.Д., Селиванов Ю.В. Моделирование структуры и оценка прочности строительной керамики из грубозернистых масс // Строительные материалы. 2007. № 6. С. 65–68.

7. Шильцина А.Д., Верещагин В.И. Спекание, фазообразование и свойства керамических плиток с применением диопсидового и глинистого сырья Хакасии // Стекло и керамика. 2000. № 3. С. 13–16.
8. Верещагин В.И., Бурученко А.Е., Мушарапова С.И., Меньшикова В.К. Влияние дисперсности непластичных компонентов керамических масс на спекание и свойства строительной керамики // Строительные материалы. 2015. № 8. С. 64–67.
9. Бурученко А.Е., Меньшикова В.К. Применение нового современного вида сырья в производстве керамической плитки // Современные материалы, техника и технология. Материалы 4-й междуна. науч.-практич. конф. (25-26 декабря 2014 года). редкол. А.А. Горохов; Юго-Зап. гос. ун-т, ЗАО «Университетская книга». Курск, 2014. С. 102-104.
10. Vereshchagin V.I., Buruchenko A.E., Menshikova V.K., Mogilevskaya N.V. Ceramic materials based on diopside // Glass and Ceramics. 2011. Т. 67. №11-12. Рз. 343–346.
11. Верещагин В.И., Бурученко А.Е., Меньшикова В.К. Безусадочный облицовочный керамический материал на основе диопсидового сырья // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 13.
12. Меньшикова В.К., Демина Л.Н. Модификация керамического состава сырьевыми материалами Сибирского региона [Электронный ресурс]. URL: <https://esj.today/02savn420.html> (дата обращения: 28.09.2020).
13. Бурученко А.Е., Верещагин В.И., Меньшикова В.К. Малоусадочная керамика на основе долеритовых мелкодисперсных отходов щебеночного производства // Стекло и керамика. 2019. № 11. С. 119–123.
14. Buruchenko A.E., Men'shikova V.K., Vereshchagin V.I. Low-shrinkage ceramic based on fine-grained dolerite wastes from crushed-stone production // Glass and Ceramics. 2020. № 11–12. Рр. 415–418.
15. Меньшикова В.К., Демина Л.Н. Керамические строительные материалы с использованием нетрадиционного вида сырья // Строительные материалы и изделия. 2020. Том 3. № 3. С. 40–46.

Информация об авторах

Меньшикова Виктория Карловна, доцент, кандидат технических наук. E-mail: vi1222@mail.ru. Сибирский федеральный университет. Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

Поступила в 25.09.2020.

© Меньшикова В.К., 2020

Men'shikova V.K.
Siberian Federal University
E-mail: vi1222@mail.ru

INFLUENCE OF NON-PLASTIC COARSE-DISPERSED COMPONENTS ON THE PROPERTIES OF CERAMIC MATERIAL

Abstract. In modern conditions, clay raw materials of fine-grained structure are used for the production of building ceramics. The task of using coarse non-traditional non-plastic components in the compositions of ceramic masses and the choice of rational sizes of their grains is relevant. The exclusion of pre-grinding determines the reduction of energy costs and, as a result, the cost of finished products. The paper offers an option of using diopside concentrate of various grain sizes in compositions with minor additions of clay and sodium silicate solution. The problems of stress development at the interface of grain and ligament contact, which in case of a negative outcome do not make it possible to obtain a strong structure of a ceramic shard, are solved. The presence of an insignificant voltage formed as a result of the relationship between the diopside and the forming glass phase is revealed, this does not prevent the consideration of the probability of obtaining a ceramic material. The study of the behavior of ceramic samples containing diopside of different granulometric composition when adding a solution of sodium-silicate glass after molding and firing shows the effectiveness of using diopside concentrate in 100–150 microns. Contacts of this size of diopside are wrapped in liquid glass during molding. A glass phase is formed when fired. In this case, the diopside is partially melted, but it is preserved and exists as an independent unit. A smaller grain size during sintering requires more glass phase, which leads to structural stresses, and with a larger size, not enough glass phase is formed and the strength of the material is significantly reduced. When studying the influence of grain size on the properties of the sample, the results of water absorption indicators of 7 %, mechanical compressive strength – 36 MPa, bending

strength-17 MPa are obtained. It is found that the dispersion of diopside in 100–150 microns allows to develop a technology for the use of coarse-grained raw materials in the ceramic mass.

Keywords: dispersion, diopside concentrate, clay, sodium-silicate glass, water absorption, strength.

REFERENCES

1. Menshikova V.K. State and development trends of the construction facing ceramics market in the region [Sostoyaniye i tendentsii razvitiya rynka stroitel'noy oblitsovochnoy keramiki v regione]. Problemy razvitiya rynka tovarov i uslug: perspektivy i vozmozhnosti sub'yektov RF. Materialy V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Sibirskiy federal'nyy universitet, Torgovo-ekonomicheskii institut. 2019. Pp. 495–498. (rus)
2. Yendzhiyevskiy S.L., Karasev M.S., Bulychev T.I. Improving the physical and mechanical characteristics of ceramic products [Povysheniye fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik keramicheskikh izdeliy]. Fundamental'nyye i prikladnyye nauchnyye issledovaniya: aktual'nyye voprosy, dostizheniya i innovatsii. Sbornik materialov XVI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2018. Pp. 78–80. (rus)
3. Stolboushkin A.Yu. The influence of the addition of wollastonite on the formation of the structure of wall ceramic materials from technogenic natural raw materials [Vliyaniye dobavki vollastonita na formirovaniye struktury stenovykh keramicheskikh materialov iz tekhnogennogo prirodnogo syr'ya]. Building material. 2015. No 8. Pp. 13–17. (rus)
4. Poznyak A.I., Levitskiy I.A., Barantseva S.Ye. On increasing the mechanical strength of ceramic tiles at the stages of pressing and drying [O povyshenii mekhanicheskoy prochnosti keramicheskikh plitok na stadiyakh pressovaniya i sushki]. Technique and technology of silicates. 2015. Vol. 21. No 1. Pp. 2–6. (rus)
5. Zhekishev S.Zh., Kudryashov N.I. Ceramic mass for the manufacture of building products and ceramic tiles [Keramicheskaya massa dlya izgotovleniya stroitel'nykh izdeliy i keramicheskikh plitok]. Patent RF, no. 2013107113/03, 2015.
6. Vereshchagin V.I., Shil'tsina A.D., Selivanov Yu.V. Modeling the structure and assessment of the strength of building ceramics from coarse-grained masses [Modelirovaniye struktury i otsenka prochnosti stroitel'noy keramiki iz grubozernistykh mass]. Building material. 2007. No. 6. Pp. 65–68. (rus)
7. Shil'tsina A.D., Vereshchagin V.I. Sintering, phase formation and properties of ceramic tiles using diopside and clay raw materials of Khakassia [Spekaniye, fazoobrazovaniye i svoystva keramicheskikh plitok s primeneniyyem diopsidovogo i glinistogo syr'ya Khakasii]. Glass and ceramics. 2000. No 3. Pp. 13–16. (rus)
8. Vereshchagin V.I., Buruchenko A.Ye., Musharapova S.I., Men'shikova V.K. Vliyaniye dispersnosti neplastichnykh komponentov keramicheskikh mass na spekaniye i svoystva stroitel'noy keramiki. Building material. 2015. No 8. Pp. 64–67. (rus)
9. Buruchenko A.Ye., Men'shikova V.K. Primneniye novogo sovremennogo screw Syr'ya V proizvodstve keramicheskoy plitki [Primeneniye novogo sovremennogo vida syr'ya v proizvodstve keramicheskoy plitki]. Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologiya. Materialy 4-y mezhduna. nauch.-praktich. konf. (25-26 dekabrya 2014 goda), redkol. A.A. Gorokhov; Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy institut, ZAO «Universitetskaya kniga». Kursk, 2014. Pp. 102–104. (rus)
10. Vereshchagin V.I., Buruchenko A.E., Men'shikova V.K., Mogilevskaya N.V. Ceramicheskaya materialy na osnove diopsida. Glass and Ceramics. 2011. Vol. 67. No. 11-12. Pp. 343–346.
11. Vereshchagin V.I., Buruchenko A.Ye., Men'shikova V.K. [Bezusadochnyy oblitsovochnyy keramicheskoy material na osnove diopsidovogo syr'ya]. Modern problems of science and education. 2015. No 1-1. C. 13. (rus)
12. Menshikova V.K., Demina L.N. Modification of ceramic composition with raw materials of the Siberian region [Modifikatsiya keramicheskogo sostava syr'yevymi materialami Sibirskogo regiona]. URL: <https://esj.today/02savn420.html> (date of treatment: 12.12.2009).
13. Buruchenko A.Ye., Vereshchagin V.I., Men'shikova V.K. Malousadochnaya keramika na osnove doleritovykh melkodispersnykh otkhodov shchebenochnogo proizvodstva [Malousadochnaya keramika na osnove doleritovykh melkodispersnykh otkhodov shchebenochnogo proizvodstva]. Glass and ceramics. 2019. No. 11. Pp. 119–123. (rus)
14. Buruchenko A.E., Men'shikova V.K., Vereshchagin V.I. Low-shrinkage ceramic based on fine-grained dolerite wastes from crushed-stone production. Glass and Ceramics. 2020. No 11-12. Pp. 415–418.
15. Menshikova V.K., Demina L.N. Ceramic building materials using non-traditional raw materials [Keramicheskoye stroitel'nyye materialy s ispol'zovaniyyem netraditsionnogo vida syr'ya]. Building materials and products. 2020. Vol. 3. No. 3. Pp. 40–46. (rus)

Information about the authors

Men'shikova, Victoria K. PhD, Associate Professor. E-mail: vi1222@mail.ru, Siberian Federal University. 79 Svobodny pr., 660041 Krasnoyarsk, Russia

Received 25.09.2020

Для цитирования:

Меньшикова В.К Влияние непластичных грубодисперсных компонентов на свойства керамического материала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 10. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-8-16

For citation:

Men'shikova V.K. Influence of non-plastic coarse-dispersed components on the properties of ceramic material. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 10. Pp. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-8-16

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-17-22

Блажнов А.А.

Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина

E-mail: blazhnov47@mail.ru

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ПЛЁНОЧНОЙ КРОВЛИ КУЛЬТИВАЦИОННОГО СООРУЖЕНИЯ

Аннотация. Плёночные теплицы в тепличных комбинатах и хозяйствах малых форм собственности используются в весенне-осенний период для выращивания различных сельскохозяйственных культур. Основной нагрузкой для таких сооружений является ветровая. Нормы строительного проектирования теплиц не содержат положений по расчёту плёночной кровли культивационных сооружений на этот вид нагрузки. Для арочных теплиц с круговым очертанием покрытия предложен приближённый способ определения усилий от ветровой нагрузки в стабилизированной ветровыми канатами плёнке. Плёночная кровля рассматривалась как мягкая оболочка под воздействием отрицательной ветровой нагрузки. Расчётные зависимости для оценки напряжённо-деформированного состояния материала кровли выведены аналитически. При выводе зависимостей использована расчётная схема деформированной ветровым давлением кровли, соответствующая реальным условиям эксплуатации сооружения. Рассматривалась кровля сооружения из рекомендуемой строительными нормами по проектированию теплиц полиэтиленовой плёнки, физико-механические характеристики которой стандартизированы. Выведены зависимости для определения продольных и кольцевых напряжений в материале кровли, рационального шага ветровых канатов и максимально возможного в них усилия. Предложенный способ статического расчёта плёночной кровли возможно использовать для культивационных сооружений с очертанием покрытия близким к круговому.

Ключевые слова: теплица, плёночная кровля, ветровая нагрузка, способ расчёта плёнки.

Введение. Плёночные теплицы используются в хозяйствах различных форм собственности для выращивания сельскохозяйственной продукции, как правило, в тёплый период года, стоимость их строительства значительно ниже по отношению к другим видам культивационных сооружений. В соответствии с положениями норм технологического проектирования теплиц НТП10-95 площадь плёночных теплиц в крупных предприятиях может достигать 10 000 м². Строительство таких сооружений в фермерских хозяйствах обеспечивает возможность перепрофилирования производства в зависимости от конъюнктуры рынка [1, 2]. Пролёт плёночных теплиц обычно не превышает 12 м. Рациональной конструктивной формой теплицы с плёночной кровлей является арочная с круговым или параболическим очертанием покрытия. Целесообразно применение круговых арок, так как известно, что они менее сложны в изготовлении и монтаже [3]. Плёночная кровля сооружения укладывается по прогонам из гнутых профилей или оцинкованной проволоки диаметром 3,0–3,2 мм, плёнка предварительно натягивается для исключения волнообразных колебаний под действием ветровой нагрузки и закрепляется в цокольной части сооружения. Долговечность тепличных полиэтиленовых плёнок, выпускаемых толщиной от 100 до 200 мкм, равна 3–5 годам (плёнки «Нева», «Росток и др.). В безморозный период года единственной атмосферной нагрузкой на светопро-

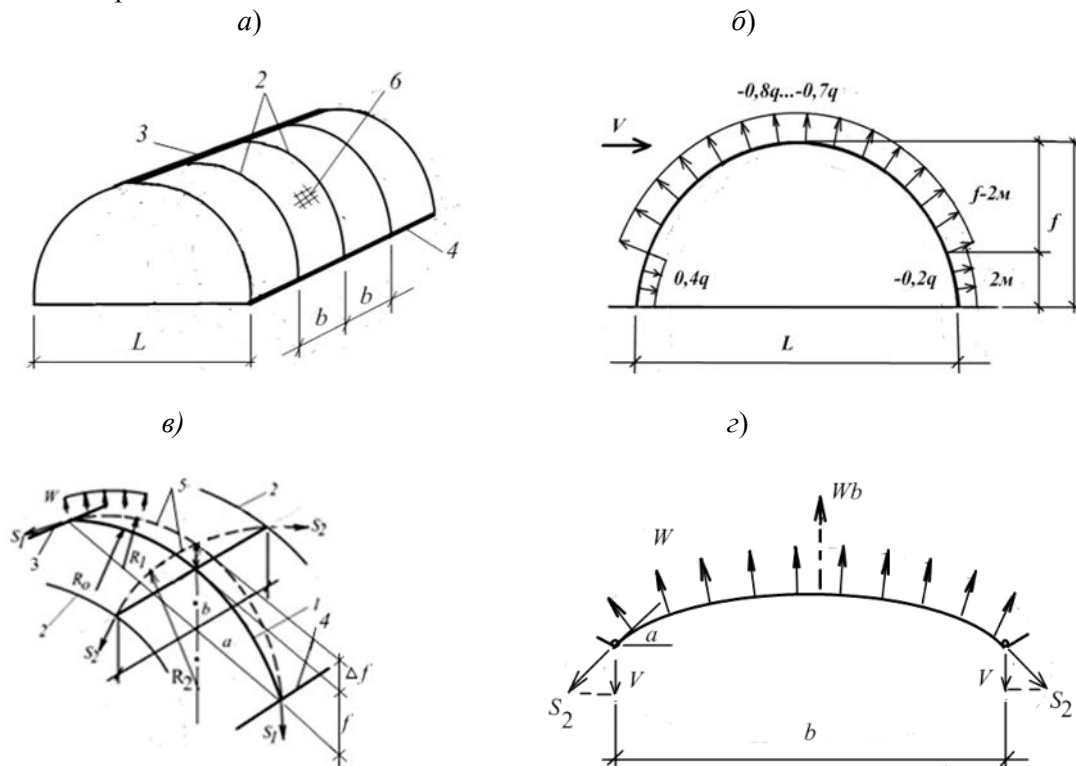
зрачное ограждение сооружения является ветровая (в соответствии с требованием СП107.13330.2012 «Теплицы и парники» в сезонных теплицах кровля из полимерных синтетических материалов должна демонтироваться на зимний период). В нормах строительного проектирования теплиц не приведены указания по проектированию плёночной кровли применительно к этому виду нагрузки. Плёночную кровлю теплицы можно рассматривать как мягкую оболочку, как это принято при расчёте пневматических и тентовых конструкций [4–7, 9, 14–16]. Для расчёта мягких оболочек применяются различные методы [10–13], требующие от проектировщиков специальных знаний. Цель исследования предусматривала разработку несложного способа определения усилий от ветровой нагрузки в плёночной кровле сооружения с круговым очертанием покрытия.

Методика и способ расчёта прочности светопрозрачной кровли. Расчётные зависимости для проверки прочности светопрозрачной кровли культивационного сооружения устанавливались аналитически.

Значительно уменьшить напряжения в плёночной кровле и её деформации под действием ветровой нагрузки возможно, применяя стабилизирующие ветровые канаты (например, стальные тросы в пластмассовой оболочке) и погонажное крепление плёнки в цоколе и коньке сооружения (рис.1, а). Схема действия ветровой нагрузки на культивационное сооружение (рис.1,б) принята в

соответствиями с указаниями сводов правил «Нагрузки и воздействия» и «Теплицы и парники».

При ветровом отсосе вздувшаяся плёнка будет испытывать двухосное напряжённое состояние и нагрузка будет восприниматься продольными элементами крепления в цоколе и коньке



$$\Delta l \approx \frac{16ff_1}{3a} \approx 1,105f_1, \quad (6)$$

Выражение для выгиба кольцевой нити после подстановки (6) в (2) и преобразований

$$1,105f_1 = \frac{S_1\pi R_0}{2EF}$$

$$f_1 = \frac{1,421S_1R_0}{EF} = \frac{1,421\sigma_1FR_0}{EF} = \frac{1,421\sigma_1R_0}{E}, \quad (7)$$

где R_0 – радиус арки; E – модуль упругости плёнки (75МПа в указаниях СП «Теплицы и парники»).

При $\sigma_1 = R_{\text{пл}}$ ($R_{\text{пл}}$ – расчётное сопротивление полиэтиленовой плёнки на растяжение, равное 5МПа по СП «Теплицы и парники») предельно допускаемый выгиб кольцевой нити $f_{1\text{max}} = 0,095R_0$.

Продольная нить под нагрузкой удлинится на величину Δb

$$\Delta b = \frac{S_2b}{EF}, \quad (8)$$

где b – расстояние между ветровыми канатами.

Длину продольной нити после деформации можно представить в виде выражения (Качурин В.К. Теория висячих систем. Статический расчёт. Л.: Госстройиздат. 1962. 32 с.)

$$b_1 = b + \frac{8f_2^2}{3b}, \quad (9)$$

где f_2 – выгиб продольной нити.

$$\Delta b = b_1 - b = \frac{8f_2^2}{3b} \quad (10)$$

Из равенства выражений (8) и (10) выгиб продольной нити

$$f_2 = 0,612b\sqrt{\frac{S_2}{EF}} = 0,612b\sqrt{\frac{\sigma_2F}{EF}} = 0,621b\sqrt{\frac{\sigma_2}{E}} \quad (11)$$

При $\sigma_2 = R_{\text{пл}}$ предельно допускаемый выгиб продольной нити $f_{2\text{max}} = 0,16b$.

В табл.1 приведены значения предельно допускаемых выгибов кольцевой и продольной нитей при $\sigma_{1,2} = R_{\text{пл}}$.

Таблица 1

Выгибы кольцевой и продольной нитей при допускаемых максимальных значениях растягивающих усилий

Пролёт сооружения, м	Деформация кольцевой нити f_1 , см	Деформация продольной нити f_2 , см, при шаге ветровых канатов b , м				
		1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
6,0	29	16	24	32	40	48
8,0	38					
10,0	48					
12,0	57					

Так как выгибы кольцевой и продольной нитей в кровле совместны, то из равенства предельных деформаций нитей $f_{1\text{max}} = 0,095R_0$ и $f_{2\text{max}} = 0,16b$ найдём, что предельные продольные деформации не будут превышать кольцевые при шаге ветровых канатов $b \leq 0,6R_0$. Из равенства выражений (7) и (11) после преобразований установим соотношение между кольцевым и продольным напряжениями в зависимости от радиуса арки и расстояния между ветровыми канатами

$$\frac{1,421\sigma_1R_0}{E} = 0,621b\sqrt{\frac{\sigma_2}{E}}$$

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1^2} = \frac{0,265R_0}{b} = k, \quad (12)$$

При $b = 0,265R_0$ значение $k = 1$ и напряжение $\sigma_2 = \sigma_1^2$. При $k = 1/\sigma_1$ кольцевые и продольные напряжения будут равны.

Шаг ветровых канатов в функции ветровой нагрузки и толщины плёнки, соответствующий максимально допустимому усилию в продольной нити единичной ширины (без учёта кольцевых напряжений), можно определить, составив условия её равновесия (рис. 1, з).

$$Wb - 2V = Wb - 2S_2 \cos(90^\circ - a) = 0 \quad (13)$$

$$b = \frac{2S_2 \cos(90^\circ - a)}{W} = \frac{2R_{\text{пл}}F \cos(90^\circ - a)}{W} \quad (14)$$

где $R_{\text{пл}}$ – расчётное сопротивление полиэтиленовой плёнки на растяжение, равное 5МПа по СП «Теплицы и парники»; F – площадь поперечного сечения продольной полосы плёнки шириной 1см.

Угол a , составленный касательной и хордой b (рис.1, з), равен половине дуги b_1

$$\angle a = \frac{1}{2} \left(\frac{180^\circ b_1}{\pi R_2} \right) \quad (15)$$

где R_2 – радиус кривизны деформированного отсосом ограждения (рис. 1, в).

Длину дуги b_1 определим с учётом выражения (8)

$$b_1 = b + \Delta b = b + \frac{R_{пл} F b}{EF} = 1,07b \quad (16)$$

Максимально допустимый радиус выгиба продольной полосы (рис. 1, в), полученный после подстановки f_2 из выражения (11), в котором σ_2 принято равным расчётному сопротивлению плёнки $R_{пл} = 5$ МПа.

$$R_2 = \sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + (R_2 - f_2)^2} = 0,87b \quad (17)$$

После подстановки значений b_1 и R_2 в (15) определим угол a , равный 36° . Шаг ветровых канатов, соответствующий максимально допустимому усилию в продольной нити

$$b = \frac{1,17 R_{пл} F}{W} \quad (18)$$

Для примера в табл. 2 приведено изменение максимального шага ветровых канатов, вычисленного по формуле (18), для полиэтиленовой плёнки различной толщины во II ветровом районе (Орловская, Белгородская и др. обл.) применительно к теплице пролётом 9 м.

Таблица 2

Изменение максимального шага ветровых канатов в зависимости от толщины плёнки

Пролёт теплицы, м	Ветровая нагрузка (отсос), кПа	Максимальный шаг канатов, м, для полиэтиленовой плёнки толщиной			
		0,1мм	0,12мм	0,15мм	0,20 мм
9,0	0,36	1,6	1,9	2,5	3,2

При воздействиях ветра плёночная кровля теплицы будет находиться в плоском напряжённом состоянии и на основании выражения (12) соотношение напряжений σ_1 и σ_2 зависит от шага ветровых канатов. Эквивалентное напряжение в плёнке можно определить на основании четвертой теории прочности

$$\sigma_{эKB} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \leq R_{пл} = 5 \text{ МПа}$$

По результатам исследования предлагается следующая последовательность расчёта прочности кровли: вычислить шаг канатов по (18), подставить его в формулу (12), приняв продольное напряжение равным расчётному сопротивлению плёнки на растяжение, вычислить кольцевое и эквивалентное напряжения. Так, для теплицы пролётом 9 м с плёночной кровлей толщиной 0,15 мм при ветровом давлении $W = 0,36$ кПа расчётные значения составляют: шаг канатов $b = 2,44$ м, продольное напряжение 5 МПа, кольцевое напряжение 3,2 МПа, эквивалентное напряжение 4,4 МПа.

Усилие в ветровом канате является кольцевым и его максимальное значение можно определить по формуле

$$S_K = W b R_0 \quad (19)$$

Для приведенных выше данных усилие в ветровом канате равно 3,95 кН.

Заключение. Предложен способ статического расчёта плёночной кровли теплицы, стаби-

лизированной ветровыми канатами. Использована расчётная схема деформированной кровли, соответствующая реальным условиям эксплуатации сооружения. Предложенный способ статического расчёта плёночной кровли возможно использовать для культивационных сооружений с очертанием покрытия близким к круговому.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блажнов А.А., Фетисова М.А. Производственные сооружения для фермерских хозяйств. Орёл: ООО ПФ «Картуш». 2017. 132 с.
2. Блажнов А.А. Основы формирования шампиньонных комплексов и их производственных зданий. Орёл: Орёл ГАУ. 2015. 202 с.
3. Кудишин Ю.И., Беленя Е.И., Игнатъева В.С. и др. Металлические конструкции М.: Академия. 2011. 688 с.
4. Зубарев Г.Н., Бойтемиров Ф.А., Головина В.М. и др. Конструкции из дерева и пластмасс М.: Академия. 2008. 304 с.
5. Кривошапко С.Н. Пневматические конструкции и сооружения // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. №3. С. 45–53.
6. Бойтемиров Ф.А. Конструкции из дерева и пластмасс. М.: Академия. 2013. 288 с.
7. Кривошапко С.Н., Галишников В.В. Архитектурно-строительные конструкции. М.: Юрайт. 2019. 476 с.

8. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука. 1986. 544 с.

9. Кузьмина Р.П. Мягкие оболочки. Издательство «ИКИ». 2016. 272 с.

10. Ким А.Ю., Харитонов С.П. Применение теории подобия для проектирования и расчёта на статические нагрузки пневматических сооружений // Символ науки. 2016. №5. С. 56–58.

11. Мокин Н.А. Проведение нелинейных расчётов воздухоопорных оболочек // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. №2. С. 24–32.

12. Ким А.Ю., Харитонов С.П. Применение итерационных численных методов в задачах расчёта пневматических сооружений // Символ науки. 2016. №5. С. 50–52.

13. Ким А.Ю., Харитонов С.П. Расчёт пневматических сооружений на различные виды

нагрузок с применением программных комплексов // Символ науки. 2016. №5. С. 53–55.

14. Krivoshapko S.N., Shambina S.L., Hyeng Ch.A. Bock. Thin-walled composite and plastic shells for civil and industrial buildings and erections // Materials Science Forum. 2017. Vol. 895. Pp. 45–51.

15. Krivoshapko S.N. The perspectives of application of thin-walled plastic and composite polymer shells in civil and industrial architecture // Journal of Reinforced Plastics & Composites. November 2017. Vol. 37. Iss. 4. Pp. 217–229.

16. Каюмов Р.А., Мухамедова И.З., Хан-фиев А.Г., Тазюков Б.Ф. Методика расчёта тен-товых покрытий // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. №3. С. 109–115.

Информация об авторах

Блажнов Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Агропромышленного и гражданского строительства. E-mail: blazhnov47@mail.ru. Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, Россия, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69.

Поступила 30.09.2020 г.

© Блажнов А.А., 2020

Blazhnov A.A.

Oryol State Agrarian University named after .N.V. Parakhin

E-mail: blazhnov47@mail.ru

STATIC CALCULATION OF MEMBRANE ROOFING FOR CULTIVATION STRUCTURES

Abstract. Membrane roofing greenhouses and small-scale farms are used in the spring and autumn period for growing various crops. The main load for such structures is wind. Norms of construction design of greenhouses do not contain provisions for calculating the membrane roof of cultivation structures for this type of load. For arched greenhouses with a circular outline of the coating, an approximate method for determining the forces from the wind load in a membrane stabilized by wind ropes is proposed. The membrane roof is considered as a soft cover under the influence of negative wind load. The calculated dependences for estimating the stress-strain state of the roof material are derived analytically. The calculation scheme of the roof deformed by wind pressure, corresponding to the actual operating conditions of the structure, is used to derive the dependencies. The roof of the structure is considered from the polyethylene membrane recommended by the building standards for the design of greenhouses, the physical and mechanical characteristics of which are standardized. Dependences are derived for determining the longitudinal and annular stresses in the roof material, the rational pitch of wind ropes and the maximum possible force in them. The proposed method of static calculation of the membrane roof can be used for cultivation structures with the outline of the coating close to circular.

Keywords: greenhouse, membrane roof, wind load, method of membrane calculation..

REFERENCES

1. Blazhnov A.A., Fetisova M.A. Production facilities for farms [Proizvodstvenny'e sooruzheniya dlya fermerskix xozyajstv]. Orel: LLC PF "Kartush". 2017. 132 p. (rus)

2. Blazhnov A.A. Fundamentals of forming mushroom complexes and their production buildings

[Osnovy` formirovaniya shampin`onny`x kompleksov i ix proizvodstvenny`x zdaniy]. Orel: Orel GAU. 2015. 202p. (rus)

3. Kudishin Yu.I., Belenya E.I., Ignatieva V.S. et al. Metal structures [Metallicheskie konstrukcii]. M.: Akademiya. 2011. 688p. (rus)

4. Zubarev G.N., Boytemirov F.A., Golovina V.M. and others. Structures made of wood and plastics [Konstrukcii iz dereva i plastmass]. Moscow: Akademiya. 2008. 304 p. (rus)
5. Krivoshapko S.N. Pneumatic structures and structures [Pnevmaticheskie konstrukcii i sooruzheniya]. Construction mechanics of engineering structures and structures. 2015. No.3. Pp. 45–53. (rus)
6. Boytemirov F.A. Structures made of wood and plastics [Konstrukcii iz dereva i plastmass]. M.: Academy. 2013. 288p. (rus)
7. Krivoshapko S.N., Galishnikova V.V. Architectural and construction structures [Arxitekturno-stroitel'ny'e konstrukcii]. Moscow: Yurayt. 2019. 476 p. (rus)
8. Bronstein I.N., Semendyaev K.A. Handbook of mathematics for engineers and students of higher education institutions [Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashhixsya vtuzov]. Moscow: Nauka. 1986. 544 p. (rus)
9. Kuzmina R.P. Soft shells [Myagkie obolochki]. M.: IKI Publishing house. 2016. 272 p. (rus)
10. Kim A.Yu., Kharitonov S.P. Application of similarity theory for designing and calculating static loads of pneumatic structures [Primenenie teorii podobiya dlya proektirovaniya i raschyota na staticheskie nagruzki pnevmaticheskix sooruzhenij]. Symbol of science. 2016. No. 5. Pp. 56–58(rus)
11. Mokin N.A. conducting nonlinear calculations of air-bearing shells [Provedenie nelinejny'x raschyotov vozduxooporny'x obolochek]. Construction mechanics of engineering structures and structures. 2017. No. 2. Pp. 24–32. (rus)
12. Kim A.Yu., Kharitonov S.P. Application of iterative numerical methods in problems of calculation of pneumatic structures [Primenenie iteracionny'x chislenny'x metodov v zadachax raschyota pnevmaticheskix sooruzhenij]. Symbol of science. 2016. No. 5. Pp. 50–52 (rus)
13. Kim A.Yu., Kharitonov S.P. Calculation of pneumatic structures for various types of loads using software complexes [Raschyot pnevmaticheskix sooruzhenij na razlichny'e vidy' nagruzok s primeneniem programmny'x kompleksov]. Symbol of science. 2016. No. 5. Pp. 53–55. (rus)
14. Krivoshapko S.N., Shambina S.L. Hyeng Ch.A. Bock Thin-walled composite and plastic shells for civil and industrial buildings and erections [Tonkostenny'e kompozitny'e i plastmassovy'e obolochki dlya grazhdanskix i promy'shlenny'x zdanij i sooruzhenij] Materials Science Forum. 2017. Vol. 895. Pp. 45–51. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.895.45.
15. Krivoshapko S.N. The perspectives of application of thin-walled plastic and composite polymer shells in civil and industrial architecture [Perspektivy' primeneniya tonkostenny'x plastikovy'x i kompozitny'x polimerny'x obolochek v grazhdanskoj i promy'shlennoj arxitekture]. Journal of Reinforced Plastics & Composites. November 2017. Vol. 37. Iss. 4. Pp. 217–229. DOI: 10.1177/0731684417740770.
16. Kayumov R.A., Mukhamedova I.Z., Khanafiev A.G., Tazyukov B.F. Method of calculating awning coverings [Metodika raschyota tentovy'x pokry'tij]. Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2017. No. 3. Pp. 109–115. (rus)

Information about the authors

Blazhnov, Aleksander A. PhD, Assistant professor. E-mail: blazhnov47@mail.ru. Oryol State Agrarian University named after N.V.Parakhin. Russia, 302019, Orel, st.General Rodina, 69.

Received 30.09.2020

Для цитирования:

Блажнов А.А. Статический расчёт плёночной кровли культивационного сооружения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 10. С. 17–22. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-17-22

For citation:

Blazhnov A.A. Static calculation of membrane roofing for cultivation structures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 10. Pp. 17–22. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-17-22

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-23-32

Бурьянов И.А., Логачев К.И., Уваров В.А.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: Buryanov.vanya@yandex.ru*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ ЗАТОЧНОГО УЧАСТКА

Аннотация. Процессам абразивной обработки изделий из металлов сопутствуют вредные пылевые выделения в рабочую зону. Превышение ПДК пылевых частиц в рабочей зоне отражается негативно на здоровье рабочего персонала – приводит к возникновению профессиональных заболеваний пылевой этиологии. Для локализации вредных пылевых выделений при работах на заточных станках существуют различные кожухи – пылеуловители и их модификации, позволяющие с разной эффективностью бороться с вредными пылевыми выделениями. Конструкция кожухов – пылеуловителей может подразумевать подключение к системе аспирации, которая создает зону пониженного давления в корпусе кожуха, и тем самым способствует удалению вредных частиц, выделяющихся в процессе работ. Для корректного расчета расходов, удаляемого местными отсосами воздуха необходим анализ пылевой обстановки и определение свойств пылевых аэрозолей на конкретно взятом предприятии. В данной работе производится анализ проб пылевых частиц, отобранных на заточном участке завода по изготовлению металлорежущего и слесарного инструментов, а также технологической оснастки, ООО Производственная Фирма "Русский инструмент". Получение корректных и актуальных данных о размере и химическом анализе пылевых частиц необходимо для разработки энергоэффективной системы аспирации, а также математической модели движения пылевых частиц.

Ключевые слова: местная вытяжная вентиляция, дисперсный состав, обеспыливание, заточные станки, абразивная пыль, истинная плотность пыли

Введение. Тенденции мирового сообщества к энергосбережению и повторному использованию различных отходов, заставляют более глубоко и емко изучать конкретную проблематику и предлагать более интересные с точки зрения науки и энергоэффективности решения. Существует множество различных методик для определения расходов удаляемого воздуха при помощи местного отсоса. Данные методики широко представлены в трудах [1–5]. К сожалению, большинство предлагаемых методик расчета количества удаляемого воздуха местным отсосом от заточных станков не учитывает химические и физические свойства пылевых частиц, которые оказывают огромную роль на расход воздуха в процессе расчетов.

В пылевой вентиляции заточных станков особую роль играют конструкция местного отсоса. Во многом конструкция местного отсоса определяет эффективность системы аспирации в целом. Течения пылегазовоздушной смеси внутри кожуха – пылеприемника зависят от ряда факторов, к которым, в том числе, относятся дисперсный состав пылевого аэрозоля и истинная плотность.

В работах [6,7] говорится о характере воздействия пылевых частиц на организм человека. По мнению автора [6], воздействие напрямую зависит от таких факторов как:

- Дисперсность;
- Форма пылевых частиц;

- Химический состав;

К самым опасным размерам взвешенных частиц пыли относят частицы размером менее 10 мкм (PM10) (сокр. РМ – от англ. «particulate matter»). 80...90 % пылевых частиц величиной до 10 мкм задерживается в верхних дыхательных путях [8]. Согласно [9] принято разделять пылевые аэрозоли по сравнительной протяженности частиц в трех измерениях на три класса:

- изометрические частицы, имеющие в трех измерениях примерно одинаковые размеры (шар, правильный многогранник);
- частицы, имеющие в двух измерениях значительную протяженность, чем в третьем (чешуйки, пластинки и др.);
- частицы, имеющие большую протяженность в одном измерении (иглы, стержни, волокна).

Методы и материалы исследования. Заточный участок предприятия ООО Производственная Фирма "Русский инструмент" включает в себя группу универсальных заточных станков 3Е462Е, в количестве 5 штук, а также станок для заточки плашек МФ27А. В рамках данной работы был произведен отбор пыли с различных поверхностей. После, на основании полученных образцов, был произведен гранулометрический анализ, а также определение истинной плотности проб пылевых частиц, на базе научно-технической лаборатории БГТУ им. В. Г. Шухова.

Нами было принято решение об условном разделении заточного участка на четыре зоны сбора проб частиц пылевых осадений для исследования. Первая зона для сбора – рабочая зона работника – станочника. Под рабочей зоной станка принималась зона в радиусе полутора метра от центра универсального заточного станка 3Е462Е. Пылевые частицы, образующиеся в процессе производства работ на станках типа 3Е462Е, распределяются по всей площади заточного участка. Система аспирации, установленная для локализации вредных пылевых выделений в рабочей зоне универсальных заточных станков (рис. 1) не позволяет в полной мере обеспечить качество воздуха в рабочей зоне. Второй зоной сбора пылевых частиц является зона непосредственной близости к пылению, а именно, площадь станка. Данная зона является самой опасной, по нашему мнению, с точки зрения превышений ПДК в рабочей зоне и выделения вредных пылевых аэрозолей.

Система пылеочистки заточного участка включает в себя двухступенчатую систему очистки воздуха, а именно циклон с обратным конусом серии ЦМ 600У (в качестве первой ступени) и установку второй ступени очистки воздуха с фильтром тонкой очистки класса F9 (EU9). Данная система работает на полную рециркуляцию аспирируемого воздуха в помещение цеха, что позволяет существенно сократить затраты на нагрев приточного воздуха, для создания воздушного баланса в помещении цеха. Использование фильтра тонкой очистки воздуха класса F9(EU9) позволяет на выходе получить эффективность очистки пылегазовоздушной смеси, согласно паспортным характеристикам, более 95%. На основании данного конструктива аспирационной системы было принято решение о сборе проб в бункере циклона серии ЦМ (зона 3) и, непосредственно, внутри аппарата второй ступени очистки аспирируемого воздуха (зона 4).



Рис. 1. Система аспирации заточного участка ООО Производственная Фирма "Русский инструмент"

Определение истинной плотности пылевых частиц. Основопологающим параметром для определения корректных значений расходов удаляемого воздуха через местный отсос, а также характера движения и траектории пылевых частиц, является истинная плотность. Данный параметр определялся пикнометрическим методом. Суть метода заключается в том, что исследуемый образец погружают в среду, с заведомо известной плотностью. В качестве среды, в которую погружались образцы, использовали дистиллированную воду с заявленной плотностью 1000 кг/м^3 . Первично, измеряют массу сухого пикнометра m_1 , далее пробу пыли массой $0,01 \text{ кг}$ погружают в

пикнометр и заливают дистиллированной водой до мерной риски. После пикнометр с образцом пыли и жидкостью нагревали до состояния кипения. Данная операция проводится для того, чтобы полностью удалить воздух, который содержится в порах исследуемого образца. Спустя 20 минут пикнометр с образцом пыли и жидкостью повторно взвешивают и определяют массу m_3 . Затем пикнометр вымывают, высушивают и наполняют дистиллированной водой до мерной риски, снова взвешивают, тем самым определяя массу m_4 . Полученные данные подставляют в формулу (1), для определения истинной плотности:

$$\rho_{\text{ист}} = \frac{m_{\text{нав}} \cdot \rho_{\text{в}}}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)}; \quad (1)$$

Результаты пикнометрии образцов пыли заточного участка представлены в табл. 1.

Определение дисперсного (гранулометрического) состава. Характер движения пылевых частиц во многом зависит от дисперсного состава [10-12]. Более мелкие частицы пылевых аэрозолей оседают на окружающие поверхности быстрее, нежели крупные. Процесс обработки изделий из металла сопровождается обильным выделением пылевых частиц, различного гранулометрического состава. Из приведенных данных в таблице 1 можно сделать вывод о том, что исследуемая нами пыль достаточно тяжелая, однако ее опасность для работников очень высока. Непосредственная близость органов дыхания станочников к вращающейся заготовке в процессе обработки деталей создает высокую вероятность по-

падания пылевых частиц в органы дыхания, зрения [13, 14]. Стоит отметить, что частицы размером менее 10 мкм способны достаточно долго оставаться во взвешенном состоянии [15].

Гранулометрический состав проб пылевых частиц заточного участка определялся путем проведения дисперсного анализа лазерным анализатором размера частиц Analysette 22. Принцип работы прибора заключается в использовании принципа физического рассеивания электромагнитных волн. Итоговые результаты представлены в виде объемных долей, соответствующие эквивалентным диаметрам при лазерной дифракции.

Результаты и их анализ. Результаты исследования, полученные при анализе проб пыли, взятых на заточном участке предприятия ООО Производственная Фирма "Русский инструмент" представлены в табл. 1-5 и на рис. 2-5.

Таблица 1

№	Название пробы	Полученное значение $\rho_{\text{ист}}$, кг/м ³
1	Пыль в рабочей зоне	4833
2	Пыль на поверхности заточных станков	4043
3	Пыль из бункера циклона	4553
4	Пыль из второй ступени очистки	5147

Таблица 2

Дисперсный (гранулометрический) состав пыли образца №1 (пыль в рабочей зоне)

Диаметр частиц d , мкм	5	5–10	10–20	20–40	40–60	60–100	>100
Содержание отдельных фракций частиц от общей массы пыли ΔD , %	0,45	0,15	2,4	8,86	16,58	26,42	45,14
Доля частиц мельче d (проход частиц) $D(d)$, %	0,45	0,6	3	11,86	28,44	54,86	100

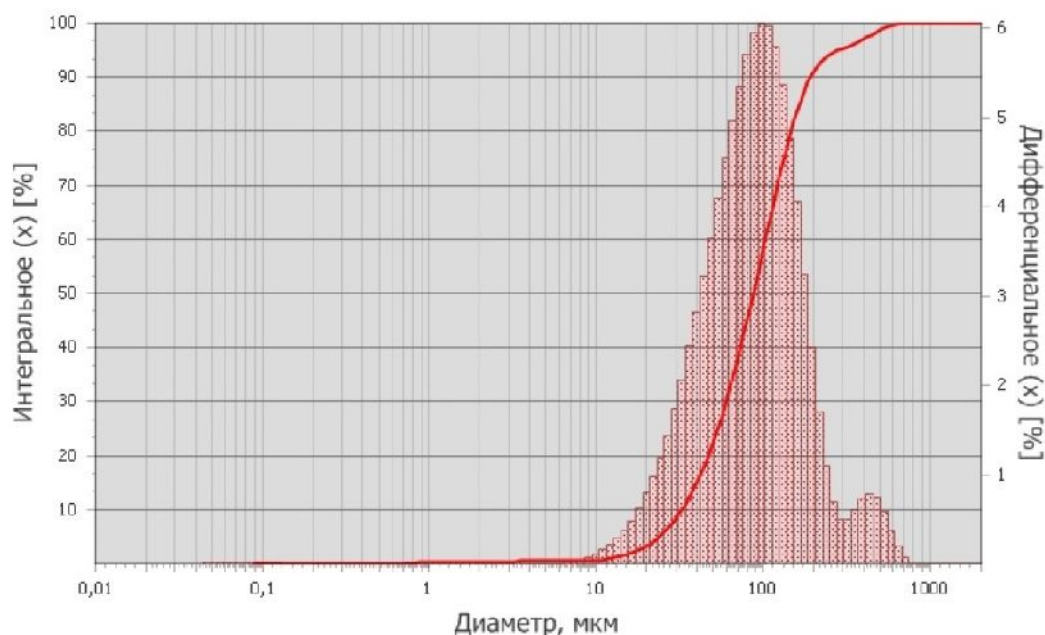


Рис. 2. График распределения частиц пыли образца №1

Таблица 3

**Дисперсный (гранулометрический) состав пыли образца №2 (пыль на поверхности
заточных станков)**

Диаметр частиц d , мкм	<5	5–10	10–20	20–40	40–60	60–100	>100
Содержание отдельных фракций частиц от общей массы пыли ΔD , %	0,67	0,84	2,76	8,6	21,1	36,4	28,92
Доля частиц мельче d (проход частиц) $D(d)$, %	0,67	1,51	4,27	12,87	34,68	71,08	100

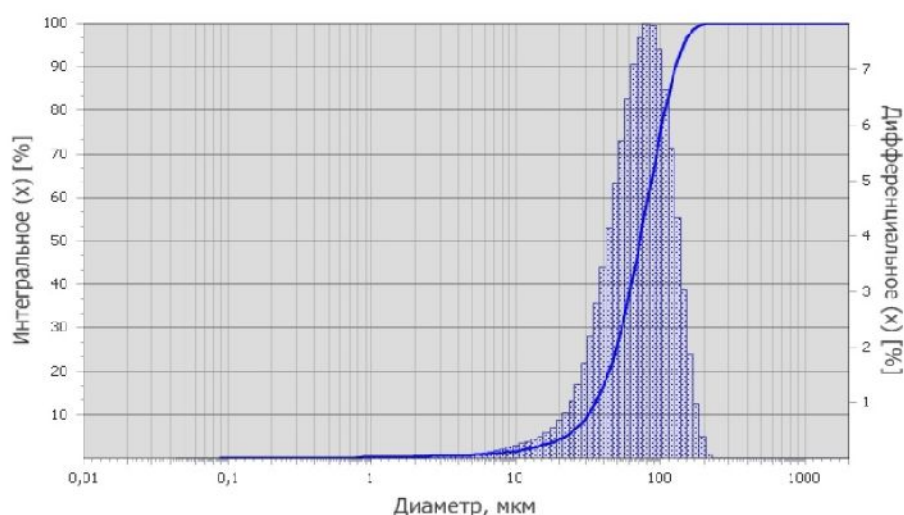


Рис. 3. График распределения частиц пыли образца №2

Таблица 4

Дисперсный (гранулометрический) состав пыли образца №3 (пыль из бункера циклона)

Диаметр частиц d , мкм	<5	5–10	10–20	20–40	40–60	60–100	>100
Содержание отдельных фракций частиц от общей массы пыли ΔD , %	0,28	0,45	0,68	2,19	5,46	12,2	78,74
Доля частиц мельче d (проход частиц) $D(d)$, %	0,28	0,73	1,41	3,6	9,06	21,26	100

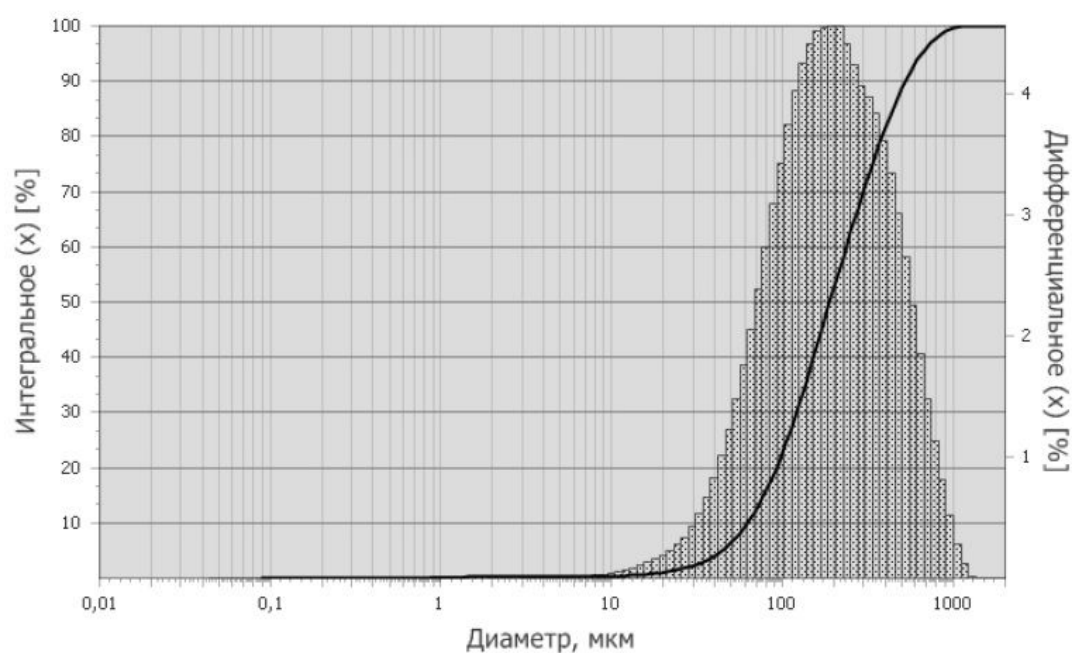


Рис. 4. График распределения частиц пыли образца №3

Таблица 5

Дисперсный (гранулометрический) состав пыли образца №4 (пыль из второй ступени очистки)

Диаметр частиц d , мкм	<5	5–10	10–20	20–40	40–60	60–100	>100
Содержание отдельных фракций частиц от общей массы пыли ΔD , %	5,01	12,53	32,63	25,34	13,75	9,26	1,48
Доля частиц мельче d (проход частиц) $D(d)$, %	5,01	17,54	50,17	75,51	89,26	98,52	100

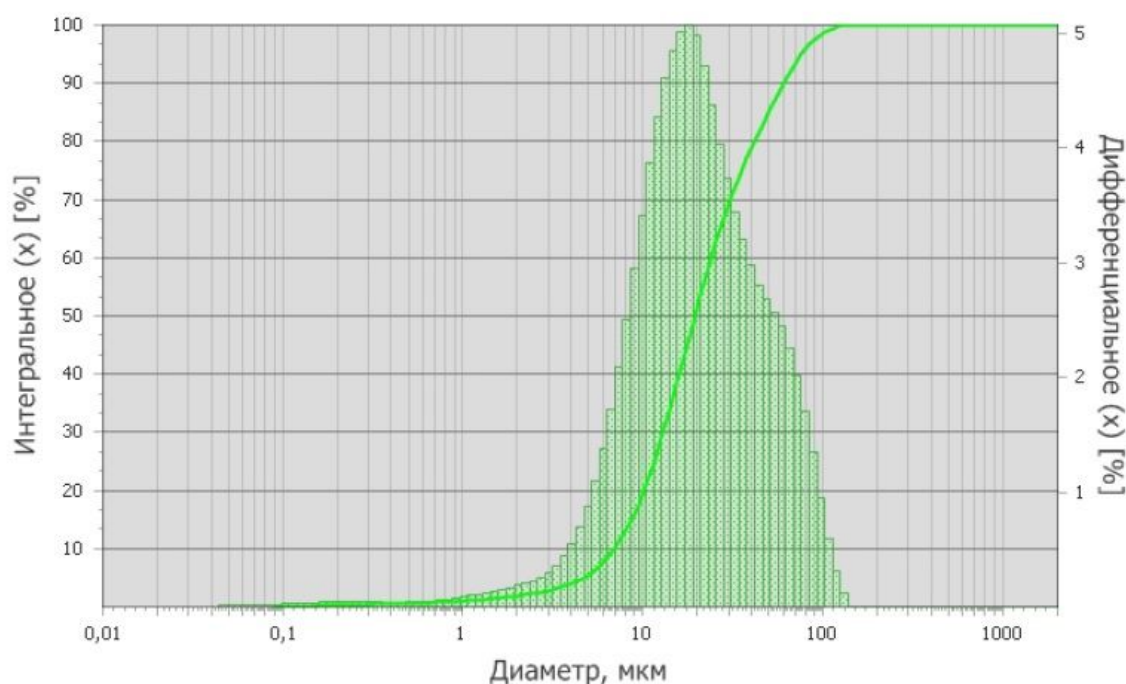


Рис. 3. График распределения частиц пыли образца №4

Аналитическое описание дисперсного состава пылевых аэрозолей реализуется при помощи разных экспериментальных и теоретических зависимостей. Наиболее обоснованным для аналитического описания данных дисперсного состава пыли считается логарифмически нормальное распределение. Именно на логарифмически нормальное распределение пыли [16–19] рекомендуют ориентироваться при подборе и анализе эффективности работы пылегазоочистного оборудования. Поэтому, для корректной оценки полученных анализов дисперсного состава на лазерном анализаторе размера частиц Analysette 22, необходимо аналитическое описание дисперсного состава пыли логарифмически нормальным методом. Данная операция была произведена при помощи программы «Расчетный комплекс для аппаратов улавливания золы и пыли CCADCD» [20]. Результаты представлены на рис. 4–7.

Помимо сведений о гранулометрических составах образцов пыли так же, при помощи программы [20], были получены значения дисперсии

для исследуемых образцов пыли и определены медианные диаметры (табл. 6, табл. 7).

Таблица 6

№	Название пробы	Медианный диаметр, d_m , мкм
1	Пыль в рабочей зоне	67,2
2	Пыль на поверхности заточных станков	91,05
3	Пыль из бункера циклона	228,8
4	Пыль из второй ступени очистки	18,08

Таблица 7

№	Название пробы	Дисперсия, σ , %
1	Пыль в рабочей зоне	4,30517
2	Пыль на поверхности заточных станков	4,61293
3	Пыль из бункера циклона	5,90273
4	Пыль из второй ступени очистки	3,96212

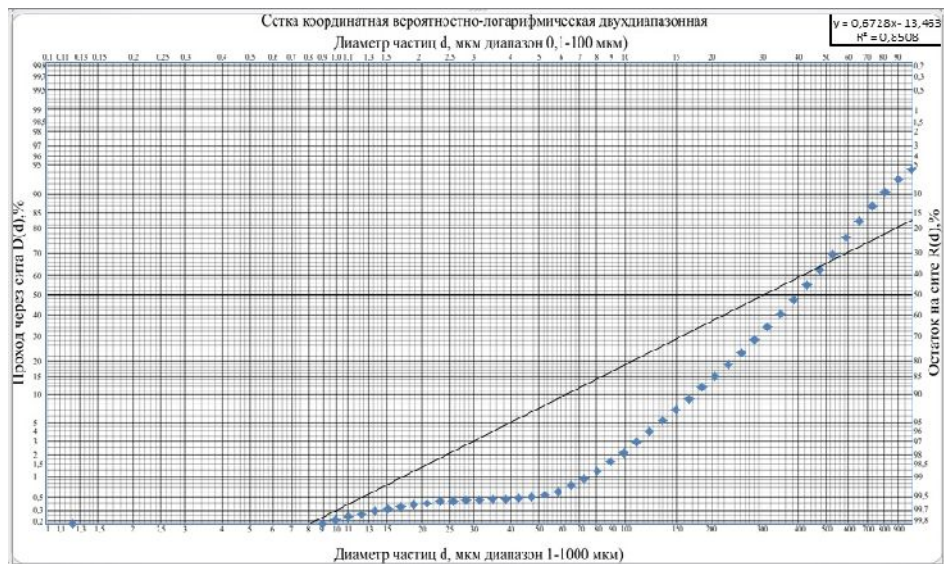


Рис. 4. График логарифмически нормального распределения частиц пыли образца №1

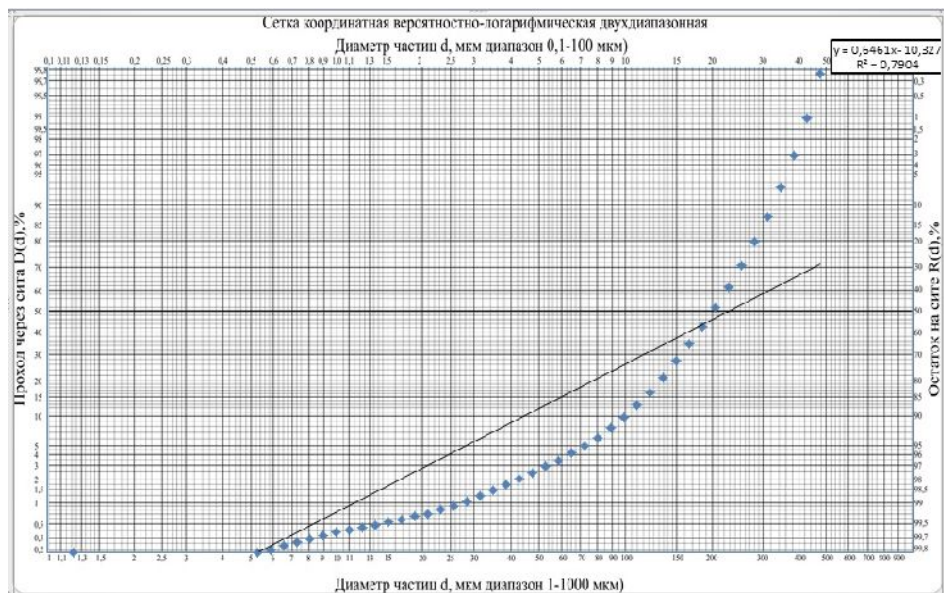


Рис. 5. График логарифмически нормального распределения частиц пыли образца №2

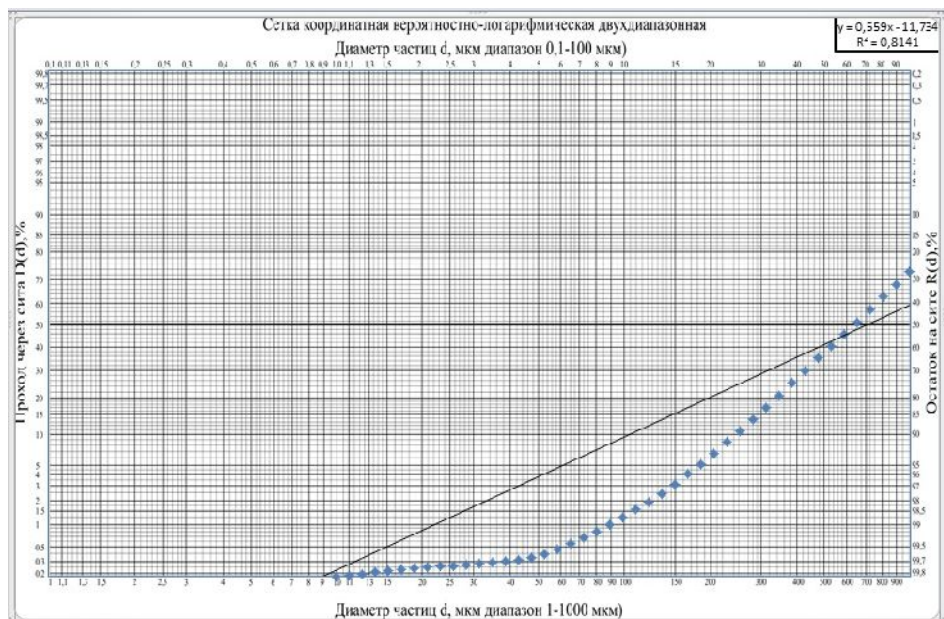


Рис. 6. График логарифмически нормального распределения частиц пыли образца №3

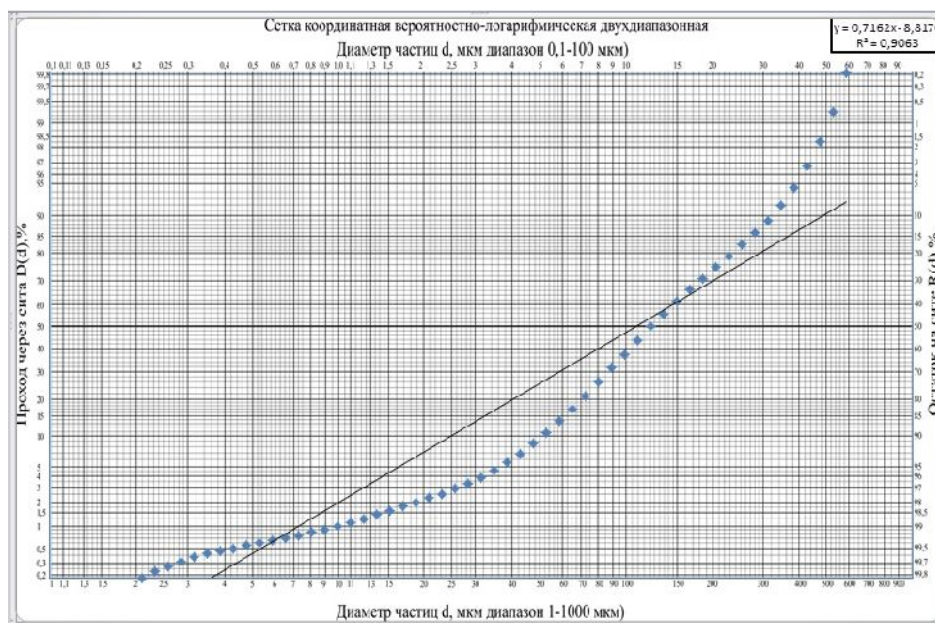


Рис. 7. График логарифмически нормального распределения частиц пыли образца №4

Выводы. В рамках данной работы были получены следующие результаты:

- Определены численные значения истинной плотности проб пыли заточного участка (таблица 1);
- Получены гранулометрические составы проб пыли заточного участка, опираясь на которые, можно получить процентное содержание пыли конкретной фракции;
- Определены численные значения медианного диаметров и дисперсий (таблицы 6-7);

Полученные в ходе проведения исследования значения позволяют дополнить перечень исходных данных, необходимых для компьютерного моделирования течений пылевых аэрозолей в кожухах – пылеуловителях.

Источник финансирования: грант РНФ (проект 18-79-10025).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Власов А.Ф. Удаление пыли и стружки от режущих инструментов. М.: Машиностроение, 1982, 240 с.
2. Mabbett A.N. Industrial ventilation and air pollution control // Metal Finishing. 2006. Т. 104. № 7. С. 677–695.
3. Fletcher B. The design of local exhaust ventilation hoods for grinding wheels // The Annals of Occupational Hygiene. 1995. Т. 39. №. 5. С. 535–543.
4. DallaValle J. M. Exhaust Hoods: How to Design for Efficient Removal of Dust, Fumes, Vapors and Gases. Heating and ventilating, New York, 1944. 49 p.
5. ACGIH Industrial Ventilation. A Manual of Recommended Practice (19th Edn). American Conference for Industrial Governmental Hygienists, Cincinnati, Ohio, 1988. 514 p.
6. Лужников Е.А. Медицинская токсикология: национальное руководство. Под ред. Е.А. Лужникова. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2012. 928 с.
7. Аверков А.А., Аверкова О.А., Дорошенко Ю. А., Логачев К.И. Экологические проблемы производства прокатных валков. Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2009. Вып. 3. 172–176 с.
8. Аверкова О.А., Крюков И.В., Уваров В.А., Минко В.А., Крюкова О.С. Исследование физико-механических свойств пыли, образуемой в маникюрных кабинетах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 2. С. 69–80.
9. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Издательство академии наук СССР, 1955. 383 с.
10. Щегольков Ю. С., Колосов А. А., Пасечная В. Ю. Влияние дисперсности производственной пыли на профзаболеваемость работников // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. 2017. С. 175–177.
11. Маринин Н.А., Иванов В.А. Об исследовании дисперсного состава пыли // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2014. С. 54.
12. Чомаева М.Н. Промышленная пыль и здоровье человека // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. 2014. Т.3. № 8. С. 37–40.
13. Бабанов С., Аверина О. Пылевые заболевания легких: диагностика, лечение // Врач. 2013. № 2. С. 21–24.

14. Purkiss R. An assessment of the airborne dust in podiatric treatment areas, and its relevance to the use of respiratory protective equipment // *Brit Pod Med.* 1997. Vol. 52. Pp. 129–136.

15. Зиганшин А.М., Зиганшин М.Г., Колесник А.А.. Проектирование аппаратов пылегазоочистки: 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Лань, 2014. 244 с.

16. Азаров В.Н. О фракционном составе пыли в рабочей зоне и инженерно-экологических системах // Междунар. науч.-техн. конф. "Технология, строительство и эксплуатация инженерных систем". СПб, 2002. С. 10–13.

17. Азаров В.Н. Комплексная оценка пылевой обстановки и разработка мер по снижению запыленности воздушной среды промышленных

предприятий: автореф. дис.... д-ра техн. наук. М., Ростов н/Д., 2004. 47 с.

18. Павловский Е.И. Методы определения фракционной и общей эффективности инерционных пылеуловителей: дис.... канд. техн. наук. М., 1972. 169 с.

19. Колмогоров А.Н. О логарифмически нормальном законе распределения частиц при дроблении // *ДАН СССР.* 1941. Т. 31. № 2. С. 1030–1039.

20. Программа для ЭВМ «Расчетный комплекс для аппаратов улавливания золы и пыли ССАДСД». Зиганшин М.Г., Зиганшин А.М. Дата гос регистрации 21.03.2014, № гос. регистрации RU 2014613288, правообладатель Зиганшин М.Г., опубли. 20.04.2014. Заявка № 2014610724, дата поступления 04.02.2014.

Информация об авторах

Уваров Валерий Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: v_a_uvarov@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

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

Бурьянов Иван Александрович, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: buryanov.vanya@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 22.09.2020 г.

© Бурьянов И.А., Логачев К.И., Уваров В.А., 2020

***Buryanov I.A., Logachev K.I., Uvarov V.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

**E-mail: Buryanov.vanya@yandex.ru*

DETERMINATION OF THE MAIN PROPERTIES OF DUST PARTICLES IN THE GRINDING AREA

Abstract. *The abrasive processing of metal products is accompanied by harmful dust emissions into the work area. Exceeding the MPC of dust particles in the work area has a negative impact on the health of working personnel-it leads to occupational diseases of dust etiology. To localize harmful dust emissions when working on grinding machines, there are various dust collectors and their modifications, which allow to deal with harmful dust emissions with different efficiency. The design of the dust collector shrouds may involve connecting to an aspiration system that creates a low-pressure zone in the housing of the shroud, and thereby helps to remove harmful particles released during work. To correctly calculate the costs of air removed by local suction systems, it is necessary to analyze the dust situation and determine the properties of dust aerosols at a specific enterprise. In this work, the analysis of samples of dust particles selected at the grinding site of the plant for the manufacture of metal-cutting and metal tools, as well as technological equipment of LLC Production Company "Russian tool". Obtaining correct and up-to-date data on the size and chemical analysis of dust particles is necessary for the development of an energy-efficient aspiration system, as well as a mathematical model of the movement of dust particles.*

Keywords: *local exhaust ventilation, dispersed composition, dedusting, grinding machines, abrasive dust, true dust density*

REFERENCES

1. Vlasov A.F. Removal of dust and chips from cutting tools. [Udalenie pyli i struzhki ot rezhushchikh instrumentov]. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 240 p. (rus)
2. Mabbett A.N. Industrial ventilation and air pollution control //Metal Finishing. 2006. Vol. 104. No. 7. Pp. 677–695.
3. Fletcher B. The design of local exhaust ventilation hoods for grinding wheels. The Annals of Occupational Hygiene. 1995. Vol. 39. No. 5. Pp. 535–543.
4. DallaValle J.M. Exhaust Hoods: How to Design for Efficient Removal of Dust, Fumes, Vapors and Gases. Heating and ventilating, New York, 1944. 49 p.
5. ACGIH Industrial Ventilation. A Manual of Recommended Practice (19th Edn). American Conference for Industrial Governmental Hygienists, Cincinnati, Ohio, 1988. 514 p.
6. Luzhnikov E.A. Medical toxicology: national guidelines. Edited by E.A. Luzhnikov. [Medicinskaya toksikologiya: nacional'noe rukovodstvo. Pod red. E.A. Luzhnikova]. Moscow: GEOTAR-Media, 2012, 928 p.
7. Averkov A.A., Averkova O.A., Doroshenko Y.A., Logachev K.I. Ecological problems of rolling rolls production. [Ekologicheskie problemy proizvodstva prokatnykh valkov]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2009. No. 3. Pp. 172–176. (rus)
8. Averkova O.A., Kryukov I.V., Uvarov V.A., Minko V.A., Kryukova O.S. Investigation of physical and mechanical properties of dust formed in nail salons. [Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv pyli, obrazuemoj v manikurnykh kabine-takh]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2019. No. 2. Pp. 69–80. (rus)
9. Fuks N.A. mechanics of aerosols. [Mekhanika aerolej]. Moscow: publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1955. 383 p. (rus)
10. Shchegolkov Y.S., Kolosov A.A., Pasechnaya V.Y. Influence of industrial dust dispersion on occupational diseases of workers. [Vliyanie dispersnosti proizvodstvennoj pyli na profzabolevayemost' rabotnikov]. Fundamental and applied scientific research: current issues, achievements and innovations. 2017. Pp. 175–177. (rus)
11. Marinin N.A., Ivanov V.A. On the study of the dispersed composition of dust [Ob issledovanii dispersnogo sostava pyli]. Biosphere compatibility: man, region, technologies. 2014. 54p.
12. Chomaeva M.N. Industrial dust and human health. [Promyshlennaya pyl' i zdorov'e cheloveka]. Fundamental and applied research in the modern world. 2014. Vol. 3. No. 8. Pp. 37–40. (rus)
13. Babanov S., Averina O. Dusty lung diseases: diagnosis, treatment. [Pylevye zabolevaniya legkikh: diagnostika, lechenie]. Doctor, 2013, No. 2. Pp. 21–24. (rus)
14. Purkiss R. An assessment of the airborne dust in podiatric treatment areas, and its relevance to the use of respiratory protective equipment. Brit Pod Med. 1997. Vol. 52. Pp. 129–136.
15. Ziganshin A.M., Ziganshin M.G., Kolesnik A.A. Design of dust and gas cleaning devices: 2nd ed., reprint. [Proektirovanie apparatov pylegazochistki: 2-e izd., pererab. i dop.]. St. Petersburg: LAN, 2014, 244 p. (rus)
16. Azarov V.N. On the fractional composition of dust in the work zone and engineering and environmental systems. [O frakcionnom sostave pyli v rabochej zone i inzhenerno-ekologicheskikh sistemakh]. International. scientific and technical Conf. "Technology, construction and operation of engineering systems". Saint Petersburg, 2002. Pp. 10–13. (rus)
17. Azarov V.N. Comprehensive assessment of the dust situation and development of measures to reduce the dustiness of the air environment of industrial enterprises: abstract of dissertation Phd M. [Kompleksnaya ocenka pylevoj obstanovki i razrabotka mer po snizheniyu zapylenosti vozduшной sredy promyshlennykh predpriyatij: avtoref. dis.... d-ra tekhn. nauk]. Rostov on Don, 2004. 47 p. (rus)
18. Pavlovsky E.I. methods for determining the fractional and total efficiency of inertial dust Collectors: dissertation Phd. [Metody opredeleniya frakcionnoj i obshchej effektivnosti inercionnykh pyleulovitelej: dis.... kand. tekhn. nauk.]. M., 1972. 169 p. (rus)
19. Kolmogorov A.N. On the logarithmically normal law of particle distribution during crushing. [O logarifmicheski normal'nom zakone raspredeleniya chastic pri droblenii]. DAN SSSR. 1941. Vol. 31. No. 2. Pp. 1030–1039. (rus)
20. Ziganshin M.G., Ziganshin A.M. Computer program "Calculation complex for ash and dust capture devices CCADCD". [Programma dlya EVM «Raschetnyj kompleks dlya apparatov ulavlivaniya zoly i pyli CCADCD»]. Patent RF. no. 2014613288, 2014. (rus)

Information about the authors

Uvarov, Valeriy A. DSc, Professor. E-mail: v_a_uvarov@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

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

Buryanov, Ivan A. Postgraduate student. E-mail: buryanov.vanya@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 22.09.2020

Для цитирования:

Бурьянов И.А., Логачев К.И., Уваров В.А. Определение основных свойств пылевых частиц заточного участка // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 10. С. 23–32. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-23-32

For citation:

Buryanov I.A., Logachev K.I., Uvarov V.A. Determination of the main properties of dust particles in the grinding area. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 10. Pp. 23–32. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-23-32

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-33-40

***Елистратова Ю.В., Семиненко А.С., Минко В.А.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: yulis3790@mail.ru

АКТУАЛЬНОСТЬ МОДЕЛЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Аннотация. В статье проведен анализ различных теоретических подходов к описанию процессов формирования слоев накипи на рабочих поверхностях теплообменных аппаратов. К основным задачам относятся анализ существующих моделей загрязнения каналов теплообмена, определение основного механизма солеотложения на поверхности нагрева пластинчатых теплообменных аппаратов систем теплоснабжения, определение основных факторов, определяющих интенсивность солеотложений на рабочей пластине в соответствии с динамикой тепло-гидравлических процессов в каналах теплообмена, образованных гофрированными пластинами, а также сформировать тенденции дальнейшего исследования. В статье представлены основные результаты исследований, посвященных изучению процессов загрязнения на поверхностях нагрева. Определены неточности в предложенных подходах по описанию характера образования слоев солеотложения. Методом обобщения существующих подходов математического описания процессов загрязнения, выявлены основные допущения при описании процессов образования солеотложений на рабочих пластинах. Предложена гипотеза о влиянии расположения каналов относительно входного патрубка на равномерность распределения потоков между параллельными каналами в аппарате. Отмечен достаточно большой разрыв между существующими расчетными методами моделирования процессов загрязнения и реальным распределением слоев накипи в ходе работы теплообменного оборудования систем теплоснабжения.

Ключевые слова: теплопотребление, энергоемкость, энергоэффективность, пластинчатые теплообменные аппараты, модель загрязнения, интенсивность теплообмена, дополнительные слои сопротивления, поверхность нагрева, накипеобразование, каналы теплообмена, потокораспределение, кристаллизационный механизм загрязнения, факторы формирования накипи.

Введение. В России наибольшая доля затрат потребляемой энергии приходится на сферу теплоснабжения, что подтверждается рядом исследований [1–4], посвященных оптимизации технических решений в этой области. При этом, основными категориями теплопотребления являются коммунально-бытовые службы и потребители тепла для технологических нужд [5].

Тенденция ввода в эксплуатацию современного модернизированного теплообменного оборудования решает вопросы повышения энергоэффективности работы пунктов распределения тепла, что в свою очередь снижает энергоемкость водогрейных аппаратов [6, 7]. Также известно, что теплообменники, как часть производственных процессов, выполняющие важную роль по обработке и передачи тепловой энергии, в период эксплуатации подвержены образованию коррозии, накипеобразующих солей, а также накоплению различного рода загрязнений на поверхности нагрева [8, 9]. При этом данный фактор существенным образом оказывает влияние на гидродинамические, тепловые и эксплуатационные характеристики теплообменника, изменение которых, в свою очередь, отражают экономические показатели, как отдельного агрегата, так и всего предприятия по переработке тепла в целом [10, 11].

Так для теплообменных аппаратов с расчетным коэффициентом теплопередачи свыше 3000 (Вт/м²К) характерно снижение тепловой эффективности более 50 % уже при толщине накипи от 0,5 мм [12].

Согласно исследованиям [9], потеря тепловой эффективности одного из теплообменников, установленного на ЦТП составила за 1-й год эксплуатации – 5 %, за 2-й год -15%, после 3-го более 25 %. В некоторых случаях потери энергии могли составить до 50–70 % за период от 3 до 6 недель. Поэтому с целью поддержания работы теплообменных устройств на заданном уровне, целесообразно своевременное принятие мер по борьбе и устранению продуктов накипеобразования.

В коммунально-бытовой сфере теплопотребления эффективность теплообменных устройств, принято оценивать коэффициентом «чистоты»:

$$\frac{K}{K_c} = \frac{1}{1 + K_c \left(\frac{\delta_n}{\lambda_n} \right)}, \quad (1)$$

где K и K_c – коэффициенты теплопередачи «загрязненного» и чистого теплообменника, (Вт/м²К); δ_n и λ_n – толщина и коэффициент теплопроводности дополнительно образованного слоя накипи на поверхности теплообмена.

Зависимость (1) характеризует техническое состояние теплообменного оборудования на основании эмпирического соотношения коэффициентов теплоотдачи чистой и «загрязненной» поверхностей теплообмена, но не раскрывает механизмов образования отложений [13].

Процессы загрязнения пластинчатых теплообменников достаточно сложны и зависят от многих факторов [4, 14–17], поэтому описание теплогидродинамических режимов в межпластинных каналах в условиях образования дополнительных отложений на поверхностях нагрева, представляют в виде математических моделей загрязнения.

Исследования закономерностей формирования накипеобразующих слоев сопротивления с практической точки зрения, являются основой в разработке информационно-диагностических систем контроля эффективности работы теплообменников, которые в свою очередь выполняют функции контроля качества работы аппарата [18, 19]. Своевременная диагностика эффективности эксплуатации водогрейных устройств обеспечивает условие поддержания бесперебойной и длительной работы оборудования. Поэтому теория описания процессов солеотложения требует высокой точности и соответствия экспериментальным данным.

Исследования теплогидродинамических процессов в каналах теплообмена пластинчатых водонагревателей, являются весьма актуальными и направлены на решение таких задач как: повышение эффективности пластинчатого теплообменного оборудования и рост его конкурентоспособности, а также на экономию энергетических и трудовых ресурсов.

Цель исследования. Определить справедливость существующих математических моделей загрязнения поверхностей нагрева в качестве интеллектуальной составляющей для информационно-диагностических систем контроля теплообменных водоподогревателей систем теплоснабжения.

Методы исследования. Анализ работ посвященных исследованию загрязнений поверхности теплопередачи пластинчатых теплообменников [9, 20–25 и др.], используемых с целью нагрева воды в сфере ЖКХ, показал, что низкие температуры теплоносителя образуют преимущественно иловые отложения, а повышение температуры способствует выпадению солей накипи. При этом процесс накипеобразования характеризуется образованием твердых слоев карбоната кальция, сульфата кальция или силикатов на поверхности теплопередачи в зависимости от химического состава теплоносителя. Именно та-

кие виды загрязнения характерны для теплообменников систем теплоснабжения. Согласно исследованиям [13, 16, 26], для каналов, образованных гофрированными пластинами характерен кристаллизационный механизм формирования загрязнений. Поэтому для пластинчатых теплообменных аппаратов справедливы модели загрязнения, учитывающие закономерности кристаллизационного формирования дополнительных слоев загрязнения, образованных из неорганических солей, растворенных в рабочей жидкости. Кроме того, при рассмотрении теоретических подходов по представлению механизмов солеотложения в пластинчатых теплообменных водонагревателях, следует учитывать описание характера интенсивности солеотложения и распределения толщины накипи по длине канала и пакета пластин.

Основная часть. Рассмотрим основные теоретические подходы к описанию процессов загрязнения в каналах нагрева.

Теоретическому изучению образования коллоидно-дисперсных отложений посвящены работы Керна и Сетона (Kern-Seaton) [20, 27]. Согласно модели загрязнения Керна и Сетона скорость отложения пропорциональна разности концентрации загрязняющего вещества на входе и выходе из теплообменника. Также учитывается и скорость удаления, которая зависит от величины касательных напряжений сдвига, в результате развитого движения потока теплоносителя на поверхности отложений. Показана связь теплоотдачи с касательным напряжением сдвига, что позволяет получить соотношения между теплоотдачей и интенсивностью формирования слоя накипи на рабочих поверхностях теплообмена [25, 28]. Недостатком предложенного математического описания процессов загрязнения является, то что авторы модели допускают применение зависимостей коллоидно-дисперсного осаждения для кристаллизационного типа.

Модель автора Beal [8] определяет пропорциональное отношение интенсивности образования дополнительных слоев сопротивления к коэффициенту броуновской и вихревой диффузии, а также к градиенту разности концентраций загрязняющего вещества в теплоносителе. При этом не учитывается гидродинамический снос частиц, что является существенным недостатком данной модели, так как в действительности данное явление имеет место быть и оказывает определенное влияние на работоспособность теплообменников.

Необходимо отметить, что модели Kern-Seaton и Beal справедливы для дисперсного механизма образования твердых отложений на тепло-

передающих поверхностях. В то время как, исследования, посвященные прогнозированию накипеобразования в пластинчатых водонагревателях [8, 16, 23, 29, 30] подтверждают, что большинство отложений, формирующихся на поверхности теплообмена пластинчатых аппаратов, имеют кристаллическую структуру и подчиняются закономерностям кристаллизационного типа загрязнения. Поэтому при описании процессов образования солеотложения в пластинчатом водогрейном оборудовании справедливо применять методы и зависимости, разработанные в теории кристаллизации.

Модели Hasson, Reitzer, Taborek, Najibi, [21, 31–33] основаны на закономерностях развития кристаллизационного механизма загрязнения, однако, между ними имеются разночтения при описании характера интенсивности отложений и факторов, оказывающих влияние на скорость образования отложений.

Также модели загрязнения Hasson, Reitzer, Najibi, Beal описывают процесс интенсивности отложений линейной зависимостью, что подразумевает образование твердого слоя, для которого процессами удаления и гидродинамического сноса можно пренебречь. При этом термическое сопротивление слоев накипи возрастает по линейному закону, а скорость осаждения частиц постоянна во времени.

Экспериментальные и теоретические исследования [29, 34–36 и др.] подтверждают асимптотическую зависимость интенсивности отложений на рабочей пластине, которая определяет закономерность равенства количества удаляемого с поверхности вещества в единицу времени количеству осаждаемого через определенный промежуток времени работы оборудования. Такое явление подразумевает влияние гидродинамического смыва частиц с поверхности твердого слоя накипи в результате сужения межпластинного канала при его зарастании.

Сагань И.И. [37] описывает процессы накипеобразования, основываясь на механизме кристаллизационного загрязнения с учетом асимптотической зависимости характера интенсивности солевых отложений. Обобщая подходы Kern и Reitzer, Сагань И.И. раскрывает связь факторов формирования и удаления накипи для определения интенсивности накипеобразования.

Научная теория Дахина О.Х. [38] описывает процесс формирования отложений на теплообменных поверхностях и их влияние на параметры работы теплообменников. Согласно данной модели динамика солеотложения описывается зависимостью, определяющей изменение толщины твердого слоя во времени:

$$\delta_n (1 - \delta_n^*) = e^{-k\tau}, \quad (2)$$

где δ_n^* – предельная толщина накипи, при которой поток образования отложений равен потоку сноса, м; τ – время процесса образования накипи (время работы аппарата), сек; k – коэффициент.

Подходы к описанию процесса накипеобразования в теплообменных аппаратах Дахина О.Х. подобны результатам исследований Саганя И.И. и Райтцера. Главным недостатком указанных моделей является, то что наибольшее значение пересыщения раствора, определяющее интенсивность накипеобразования [36], предполагается в начале сечения канала (при противоточной схеме движения теплоносителей в каналах теплообмена). При этом минимальную толщину накипи следует ожидать в конце канала, а максимальную в начале, что противоречит экспериментальным данным [9, 16, 39].

Достаточно детальный анализ работ по исследованию процессов накипеобразования на теплопередающих стенках теплообменных аппаратов представлен в работе Чернышева Д.В. [14]. Сделан вывод, что процесс накипеобразования подразумевает взаимодействие и взаимовлияние химических, гидродинамических и тепловых процессов между собой [39], но существующие экспериментальные исследования и математические модели загрязнения не устанавливают связи между показателями надежности теплообменного аппарата и показателями надежности оборудования.

Обобщив существующие подходы теоретического описания математической модели накипеобразования, Чернышевым Д.В. предложено решение двух задач, направленных на прогнозирование процесса солеотложений в каналах теплообмена пластинчатых аппаратов (прямая и обратная):

- определение толщины слоя накипи и коэффициента теплопередачи в определенный момент времени;
- прогнозирование момента времени, при котором толщина накипи достигнет определенного предельного значения.

При описании особенностей образования слоев солеотложения в каналах сложной формы пластинчатых теплообменников, Чернышевым Д.В. получены зависимости процесса формирования накипи в пластинчатых теплообменниках, которые учитывают совместное влияние периода эксплуатации оборудования, гидравлических характеристик пластин и скорости движения рабочих сред. Недостатком рассмотренной модели является, то что теоретическое описание процессов загрязнения межпластинных каналов справедливо для одинакового распределения слоев

накипи по длине пакета пластин, в то время как экспериментальные исследования самого же автора доказывают неравномерное загрязнение каналов, расположенных последовательно от входа теплоносителя в транзитный коллектор.

Заключение. Обзор моделей загрязнения на рабочих поверхностях теплообменников показал, что существующие модели загрязнения характеризуют равномерное распределение слоев накипи по длине пакета пластин, независимо от их расположения относительно входного патрубка. Данное допущение объясняется сложностью течения процессов накипобразования на рабочих поверхностях, а также использованием зависимостей, не учитывающих характер распределения потоков и потерь давления в каналах теплообмена в ходе образования слоев накипи.

Неравномерное образование наростов накипи как по каналу теплообмена, так и по длине пакета пластин подтверждается исследованиями [10, 14, 40] и характеризует сужение межпластинного канала, что может послужить причиной изменения гидравлической и тепловой устойчивости всего теплообменного аппарата, за счет перераспределения расхода теплоносителя между последующими каналами и изменения характеристики сопротивления загрязненного канала. Поэтому, существует достаточно большой разрыв между расчетными методами моделирования процессов загрязнения и реальным распределением слоев накипи в ходе работы аппарата. Пренебрежение неравномерностью распределения расходов теплоносителей в каналах теплообмена в процессе образования слоев загрязнения является значительным недостатком рассмотренных моделей.

Таким образом, математическое описание теплового и гидравлического режимов в каналах пластинчатых водонагревателей, требует уточнения и проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований. Кроме того, необходимо рассмотреть основные способы контроля, предупреждения и очистки пластинчатых теплообменников, с целью определения наиболее информативных и рациональных способов, особенности работы, которые будут учитываться в математическом описании теплового и гидравлического режимов в каналах теплообмена.

Источник финансирования. ГРАНТ ПСР по программе развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова до 2021 года.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Допшак В.Н., Асташев С.Ю. Оптимизация технических решений в теплоэнергетике // Вестник КузГТУ. 2014. №3. С. 96–99.
2. Немировский И.А. Энергоэффективность систем теплоснабжения // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2012. №8. С. 25–29.
3. Прохоренков А.М. Моделирование процессов теплообмена, протекающих в пластинчатых теплообменных аппаратах // Вестник МГТУ. 2014. №1. С. 92–101.
4. Коваленко Л.М., Глушков А.Ф. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи. М.: Энергоатомиздат, 1986. 240с.
5. Зысин Л.В., Калютин А.А. Теплообменное оборудование. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 230 с.
6. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л., Арсеньева О.П. Пластинчатые теплообменники в теплоснабжении. Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. 232 с.
7. Калабин С.Е. Экономический эффект от внедрения энергосберегающего оборудования: пластинчатых теплообменников, блочных индивидуальных тепловых пунктов // С.О.К. 2005. №8. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.c-o-k.ru/articles/ekonomicheskij-effekt-ot-vnedreniya-energoberegayuschego-oborudovaniya-plastinchatyh-teploobmennikov-blochnyh-individualnyh-teplovyyh-punktov> (дата обращения 03.09.2020)
8. Зеттлер Х.У. Влияние свойств поверхности и распределения потока на загрязнение поверхностей теплообмена. СПб.: Страта, 2014. 452 с.
9. Жаднов О.В. Пластинчатые теплообменники – дело тонкое // Интернет-журнал «Новости теплоснабжения». 2015. №4, [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://elibrary.ru/title_about.asp?id=9670 (дата обращения 04.09.2020)
10. Kananeh A. B. Fouling in Plate Heat Exchangers: Some Practical Experience. Heat Exchangers // Basics Design Applications. 2012. Pp. 533–550.
11. Steinhagen R., Mueller-Steinhagen H., Maani K. Problems and costs due to heat exchanger fouling in New Zealand industries. Heat Transfer Engineering. 1993. Pp. 19–30.
12. Минко В.А., Семенов А.С., Гунько И.В., Елистратова Ю.В. Влияние отложений на рабочих поверхностях системы отопления на показатели работы элементов системы // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2014. №5. С. 32–35.
13. Müller-Steinhagen H. C4 Fouling of Heat Exchanger Surfaces. In: VDI e. V. (eds) VDI Heat Atlas. VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg. 2010. Pp. 79–104.
14. Чернышев Д.В. Прогнозирование накипобразования в пластинчатых водонагревателях

для повышения надежности их работы. дис. канд. техн. наук. Тула, 2002. 182 с.

15. Bott T.R. Fouling of Heat Exchangers. Elsevier Science & Technology Books, 1995. 546 p.

16. Kho T., Muller-Steinhagen H. An experimental and numerical investigation of heat transfer fouling and fluid flow in flat plate heat exchangers // Institution of Chemical Engineers. 1999. Pp. 124–130.

17. Клименюк И. В., Арапко А. А. Процесс образования отложений на теплообменных поверхностях // Вестник Дальневосточного государственного технического университета. 2011. С. 144–152.

18. Трухний А.Д., Зройчиков Н.А., Ломакин Б.В., Седов И.В. Информационно-диагностическая система контроля подогревателей сетевой воды турбоустановки Т-250/300-240 // Теплоэнергетика. 1998. №1. С. 30–34.

19. Елистратова Ю.В., Глазков Р.А., Семенов А.С. Роль системы контроля эффективности пластинчатых теплообменников в области теплоэнергетики // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2020. (в печати)

20. Kern D.Q., Seaton R.E. A Theoretical Analysis of Thermal Surface Fouling // British Chemical Engineering. 1959. Vol. 4, No. 5. Pp. 258–262.

21. Hasson D., Zaghavi J. Mechanism of Calcium Sulphate Scale Deposition on Heat Transfer Surfaces // I & EC Fundamentals. 1970. Vol. 9, No. 1. Pp. 1–10.

22. Hesselgreaves J.E. Compact heat exchangers. Selection, Design and Operation // An Imprint of Elsevier Science. 2001. 437 p.

23. Rybacki K.S. Calcium carbonate precipitation mechanisms and geochemical analysis of particulate material found within the waters of Maramec Spring // St. James, Missouri. Missouri S&T. 2010. 47 p.

24. Жданов О.В. Накипь и проблемы теплоэнергетики // Интернет-журнал «Новости теплоснабжения». 2006. №4. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.nts.ru (дата обращения 04.09.2020)

25. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А. К вопросу о загрязнениях поверхности теплопередачи пластинчатых теплообменников // Известия ВУЗов. Энергетика, 1984. №6. С. 101–102.

26. Kho T., Muller-Steinhagen H. An experimental and numerical investigation of heat transfer fouling and fluid flow in flat plate heat exchanger // IChemE. 1999. Vol 77. Pp. 124–130.

27. Kern D.Q., Seaton R.E. Surface Fouling: How to Calculate Limits // Chem. Eng. Prog. 1959. Vol. 55, Issue 6. Pp. 71–73.

28. Tovazhnyanski L.L., Kapustenko P.A. Intensification of Heat and Mass Transfer in Channels of Plate Condensers // Chem. Eng. Commun. 1984. Vol. 31. Pp. 351–366.

29. Li W., Kan Z., Manglik R.M., Li, G.-Q. Investigation of CaCO_3 fouling in plate heat exchangers // Heat and Mass Transfer. 2016. Pp. 1–14.

30. Bansal B. Crystallisation fouling in plate heat exchangers, PhD Diss, (Department of Chemical and Materials Engineering, University of Auckland, New Zealand). 1994.

31. Taborek J., Aoki T., Ritter R.B., Palen J.W. and Knudsen J.G. Fouling, the Major Unresolved Problem in Heat Transfer // Chem. Eng. Progress. 1972. Vol. 68. Pp. 59–67.

32. Reitzer B.J. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. 1964. No. 3. Pp. 345–348. DOI: 10.1021/i260012a013.

33. Najibi S.H. Heat Transfer and Heat Transfer during Subcooled Flow Boiling for Electrolyte Solutions, Ph.D. Thesis, University of Surrey. 1997. 271p.

34. Zhiming Xu, Zhao Yu, Zhimin Han, Jingtao Wang. Numerical simulation of calcium sulfate (CaSO_4) fouling in the plate heat exchanger // Heat and Mass Transfer. 2018. DOI: 10.1007/s00231-018-2282-x

35. Yang Qirong, Zhang Zhenglin, Yao Erren, Zhang Ning, Li Nan. Experimental Study of the Particulate Dirt Characteristics on Pipe Heat Transfer Surface // Journal of Thermal Science. 2019. Pp. 1–11.

36. Кекин П.А., Почиталкина И.А. Изучение свойств твердой фазы в процессе кристаллизации карбоната кальция // Успехи в химии и химической технологии. 2014. Т. 28. № 5. С. 111–113.

37. Сагань И.И., Разладин Ю.С. Борьба с накипеобразованием в теплообменниках. К.: Техника, 1986. С. 134.

38. Дахин О.Х. Исследование кинетики образования отложений осадка на стенках теплообменной аппаратуры // Химия и химическая технология. Волгоград. 1978. С. 237–286.

39. Чернышев Д.В., Купленов Н.И. Особенности распределения накипи по поверхности пластинчатого водонагревателя // Энергосбережение. 2000 Международная научно-техническая конференция. ТулГУ. 2000. 127 с.

40. Kho T. Effect of flow distribution on scale formation in plate and frame heat exchangers. Chem Eng Res Des. 1997. Pp. 635–640.

Информация об авторах

Елистратова Юлия Васильевна, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: yulis3790@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Семенов Артём 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 03.09.2020 г.

© Елистратова Ю.В., Семенов А.С., Минко В.А., 2020

**Elistratova J.V., Seminenko S.A., Minko V.A.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: yulis3790@mail.ru*

RELEVANCE OF CONTAMINATION MODELS FOR DIAGNOSTICS OF PLATE HEAT EXCHANGERS

Abstract. The article analyzes various theoretical approaches to describing the processes of formation of scale layers on the working surfaces of heat exchangers. The main tasks include analyzing existing models of contamination of heat exchange channels, determining the main mechanism of salt deposition on the heating surface of plate heat exchangers of heat supply systems, determining the main factors that determine the intensity of salt deposition on the working plate in accordance with the dynamics of heat and hydraulic processes in heat exchange channels formed by corrugated plates, as well as forming trends for further research. The article presents the main results of research devoted to the study of contamination processes on heating surfaces. Inaccuracies in the proposed approaches to describing the nature of the formation of salt deposition layers are identified. By generalizing existing approaches to the mathematical description of pollution processes, the main assumptions are revealed when describing the processes of salt deposition on working plates. A hypothesis is proposed about the influence of the location of channels relative to the inlet pipe on the uniformity of the flow distribution between parallel channels in the device. There is a fairly large gap between the existing computational methods for modeling pollution processes and the actual distribution of scale layers during the operation of heat exchange equipment of heat supply systems.

Keywords: heat consumption, energy intensity, energy efficiency, plate heat exchangers, pollution model, heat exchange intensity, additional resistance layers, heating surface, scale formation, heat exchange channels, flow distribution, crystallization mechanism of pollution, scale formation factors.

REFERENCES

1. Dopshak V.N., Astashev S.Yu., Byakov A.G. Optimization of technical solutions in heat power engineering [Optimizaciya tekhnicheskikh reshenij v teloenergetike]. Bulletin of KuzSTU. 2014. No3. Pp. 96–99. (rus)
2. Nemirovskiy I.A. Energy Efficiency of heat supply systems [Energoeffektivnost' sistem teplosnabzheniya]. Energy saving. Energy. Energy audit. 2012. No.8. Pp. 25–29. (rus)
3. Prokhorenkov A.M. Modeling of heat transfer processes occurring in plate heat exchangers. [Modelirovanie processov teploobmena, protekayushchih v plastinchatyh teploobmennyyh apparatah]. MSTU Bulletin. 2014. No. 1. Pp. 92–101. (rus)
4. Kovalenko L.M., Glushkov A.F. heat Exchangers with heat transfer intensification. [Teploobmenniki s intensivatsiej teplootdachi] Moscow: Energoatomizdat, 1986. 240 p. (rus)
5. Zysin L.V., Kalyutik A.A. Heat Exchange equipment. [Teploobmennoe oborudovanie]. SPb.: Publishing house of Polytechnical Institute, 2010. 230 p. (rus)
6. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Khavin G.L., Arsenyeva O.P. Plate heat exchangers in heat supply. [Plastinchatye teploobmenniki v teplosnabzhenii]. Kharkiv: NTU "KHPI", 2004. 232 p. (rus)
7. Kalabin S.E. Economic effect from the introduction of energy-saving equipment: plate heat exchangers, block individual heat points. [Ekonomich-

eskij effekt ot vnedryaemogo energosberegayushchego oborudovaniya: plastinchatyh teploobmennikov, blochnyh individual'nyh teplovyh punktov]. Journal "S. O.K." 2005. No. 8. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/ekonomicheskij-effekt-ot-vnedreniya-energoberegayushchego-oborudovaniya-plastinchatyh-teploobmennikov-blochnyh-individual'nyh-teplovyh-punktov> (date of treatment: 04.09.2020) (rus)

8. Zettler H.U. Influence of surface properties and flow distribution on contamination of heat exchange surfaces [Vliyanie svoystv poverhnosti i raspredeleniya potoka na zagryaznenie poverhnostej teploobmena]. St. Petersburg: Strata, 2014. 452 p. (rus)

9. Zhadnov O.V. Plate heat exchangers-a delicate matter [Plastinchatye teploobmenniki-delo tonkoe]. Heat supply news. 2005. No. 3. URL: http://elibrary.ru/title_about.asp?id=9670 (date of treatment: 04.09.2020) (rus)

10. Kananeh A.B. Fouling in Plate Heat Exchangers: Some Practical Experience. Heat Exchangers. Basics Design Applications. 2012. Pp. 533–550.

11. Steinhagen R., Mueller-Steinhagen H., Maani K. Problems and costs due to heat exchanger fouling in New Zealand industries. Heat Transfer Engineering. 1993. Pp. 19–30.

12. Minko V. A., Seminenko A. S., Gunko I. V., Elistratova Yu. V. Influence of deposits on the working surfaces of the heating system on the performance of system elements [Vliyanie otlozhenij na rabochih poverhnostyah sistemy otopleniya na pokazateli raboty elementov sistemy]. Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov. 2014. No. 5. Pp. 32–35. (rus)

13. Müller-Steinhagen H. C4 Fouling of Heat Exchanger Surfaces. In: VDI e. V. (eds) VDI Heat Atlas. VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg. 2010. Pp. 79–104.

14. Chernyshev D.V. Predicting scale formation in plate water heaters to improve the reliability of their operation [Prognozirovanie nakipeobrazovaniya v plastinchatyh vodonagrevatelyah dlya povysheniya nadezhnosti ih sistemy]. Cand. tech. nauk-Tula, 2002. 182 p. (rus)

15. Bott T.R. Fouling of Heat Exchangers. Elsevier Science & Technology Books, 1995. 546 p.

16. Kho T., Muller-Steinhagen H. An experimental and numerical investigation of heat transfer fouling and fluid flow in flat plate heat exchangers. Institution of Chemical Engineers. 1999. Pp. 124–130.

17. Klimenyuk I.V., Arapko A.A. The process of formation of deposits on heat exchange surfaces [Process obrazovaniya otlozhenij na teploobmennyyh

poverhnostyah]. Bulletin of the far Eastern state technical University. 2011 Pp. 144–152. (rus)

18. Trukhny A.D., Zroychikov N. A., Lomakin B.V., Sedov I.V. Information and diagnostic system for monitoring network water heaters of the t turbine unit-250/300-240 [Informacionno-dagnosticheskaya sistema kontrolya podogrevatelej setевой vody turboustanovki T-250/300-240]. Teploenergetika. 1998. No. 1. Pp. 30–34. (rus)

19. Elistratova Yu.V., Glazkov R.A., Seminenko A.S. The Role of the system for monitoring the efficiency of plate heat exchangers in the field of heat power engineering [Rol' sistemy kontrolya effektivnosti plastinchatyh teploobmennikov v oblasti teploenergetiki]. In the collection: International scientific and technical conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov Belgorod state technological University named after V. G. Shukhov. 2020. (in print). (rus)

20. Kern D.Q., Seaton R.E. A Theoretical Analysis of Thermal Surface Fouling: British Chemical Engineering. 1959. Vol. 4, No. 5. Pp. 258–262.

21. Hasson D., Zaghavi J. Mechanism of Calcium Sulphate Scale Deposition on Heat Transfer Surfaces. I & EC Fundamentals. 1970. Vol. 9, No. 1. Pp. 1–10.

22. Hesselgreaves J.E. Compact heat exchangers. Selection, Desing and Operation. An Imprint of Elsevier Science. 2001. 437 p.

23. Rybacki K.S. Calcium carbonate precipitation mechanisms and geochemical analysis of particulate material found within the waters of Maramec Spring, St. James, Missouri. Missouri S&T. 2010. 47 p.

24. Zhdanov O.V. Scale and problems of heat power engineering [Nakip' i problemy teploenergetiki]. Heat supply news. 2006. No. 4. URL: www.nts.ru (date of treatment: 05.09.2020) (rus)

25. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A. On the issue of contamination of the heat transfer surface of plate heat exchangers [K voprosu o zagryazneniyah poverhnosti teploperedachi plastinchatyh teploobmennikov]. Izvestiya Vuzov. Energetika, 1984. No. 6. Pp. 101–102. (rus)

26. Kho T., Muller-Steinhagen H. An experimental and numerical investigation of heat transfer fouling and fluid flow in flat plate heat exchanger. IChemE. March 1999. Vol 77, Pp. 124 -130.

27. Kern D.Q. Surface Fouling: How to Calculate Limits. Kern D.Q., Seaton R.E. Chem. Eng. Prog. 1959. Vol. 55, Issue 6. Pp. 71–73.

28. Tovazhnyanski L.L., Kapustenko P.A. Intensification of Heat and Mass Transfer in Channels of Plate Condensers. Chem. Eng. Commun. 1984. Vol. 31. Pp. 351–366.

29. Li Wei, Zhou Kan, Manglik Raj, Li G.-Q. Investigation of CaCO_3 fouling in plate heat exchangers. *Heat and Mass Transfer*. 2016. Pp. 1–14.
30. Bansal B. Crystallisation fouling in plate heat exchangers, PhD Diss, (Department of Chemical and Materials Engineering, University of Auckland, New Zealand). 1994.
31. Taborek J., Aoki T., Ritter R.B., Palen J.W., Knudsen J.G. Fouling, the Major Unresolved Problem in Heat Transfer. *Chem. Eng. Progress*. 1972. Vol. 68. Pp. 59–67.
32. Reitzer B.J. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. 1964. No. 3. Pp. 345–348. DOI: 10.1021/i260012a013.
33. Najibi S.H. Heat Transfer and Heat Transfer during Subcooled Flow Boiling for Electrolyte Solutions, Ph.D. Thesis, University of Surrey. 1997. 271 p.
34. Xu Zhiming, Zhao Yu, Han Zhimin, Wang Jingtao. Numerical simulation of calcium sulfate (CaSO_4) fouling in the plate heat exchanger. *Heat and Mass Transfer*. DOI: 10.1007/s00231-018-2282-x
35. Yang Qirong, Zhang Zhenglin, Yao Erren, Zhang Ning, Li Nan. Experimental Study of the Particulate Dirt Characteristics on Pipe Heat Transfer Surface. *Journal of Thermal Science*. 2019. No. Pp. 28.
36. Kekin P.A. Crystallization of calcium carbonate in technological water systems [Izucheniye svoystv tverdoj fazy v processe kristallizacii karbonata kal'ciya]. 05.17.01-Dissertation for the degree of candidate of technical Sciences. Moscow. 2017. (rus)
37. Sagan I.I., Razladin Yu.S. fight against scale formation in heat exchangers [Bor'ba s nakipeobrazovaniem v teploobmennikah]. K.: Technika. 1986. 134 p. (rus)
38. Dakhin O.H. Investigation of the formation of deposits on the walls of heat exchange equipment and their influence on changes in hydrodynamic and thermal parameters of heat exchangers [Issledovanie kinetiki obrazovaniya otlozhenij osadka na stenkah teploobmennoj apparatury]. Cand. tech. science. Volgograd. 1971. 168 p. (rus)
39. Chernyshev D.V., Kuplenov N.I. Features of scale distribution on the surface of a plate water heater [Osobennosti raspredeleniya nakipi po poverhnosti plastinchatogo vodonagrevatelya]. Energy saving 2000 international scientific and technical conference: Tulu. Tula, 2000. Pp. 127 (rus)
40. Kho T. Effect of flow distribution on scale formation in plate and frame heat exchangers. *Chem Eng Res Des*. 1997. Pp. 635–640.

Information about the authors

Elistratova, Yulia V. Postgraduate student. E-mail: yulis3790@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

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

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

Received 03.09.2020

Для цитирования:

Елистратова Ю.В., Семененко А.С., Минко В.А. Актуальность моделей загрязнения для диагностики состояния пластинчатых теплообменников // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 10. С. 33–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-33-40

For citation:

Elistratova J.V., Semenenko S.A., Minko V.A. Relevance of contamination models for diagnostics of plate heat exchangers. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No. 10. Pp. 33–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-33-40

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-41-46

Глухова А.В.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: iolanta71@yandex.ru

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТИПОЛОГИЮ КОНЦЕРТНЫХ ЗАЛОВ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Аннотация. Развитие типологии общественных зданий происходит постоянно, и выявление рациональных путей эволюции концертных залов считается актуальной задачей. Разработка новых типов концертных залов требует комплексного учета факторов, как общих, так и региональных, влияющих на требования, предъявляемые к концертным учреждениям и системе концертной деятельности в целом. В Российской Федерации наблюдается активные процесс открытия новых концертных площадок, однако процесс развития происходит хаотично, без учета условий конкретных городов – социальных, демографических, экономических. Их качество и принципы размещения не соответствуют потребностям посетителей. Таким образом выявляется необходимость анализа факторов, выявленные в ходе изучения опыта проектирования концертных залов. Базовые факторы влияют на типологию концертных залов в целом, их необходимо учитывать для развития типологии концертных залов. Также в статье рассмотрены региональные факторы на примере города Санкт-Петербурга. Выявлены специфические особенности, взаимосвязи и характер воздействия факторов в архитектурном аспекте. В статье отмечена неравнозначность факторов по степени их влияния на формирование архитектурной типологии концертных залов. К наиболее значимым факторам можно отнести: культурные, градостроительные, социально-демографические, экономические, функционально-планировочные факторы.

Ключевые слова: концертные залы, типология, общественные здания, влияние факторов, Санкт-Петербург, условия региона.

Санкт-Петербург по праву считается культурной столицей России и одним из ведущих городов с развитой концертной деятельностью в мире.

Анализ условий в Санкт-Петербурге позволил выявить основные факторы и их влияние на концертные учреждения, которые необходимо учитывать в создании типологии концертных залов. К ним относятся градостроительные, функционально-планировочные, инженерно-конструктивные факторы, а также факторы регионального уровня: природно-климатические, политические, экономические, культурные, социально-демографические факторы. Определенные группы факторов оказывают доминирующее влияние на определенный вид пространства в зависимости от условий [1].

Рассмотрим более подробно каждую из перечисленных групп (рис. 1).

Градостроительные факторы.

К градостроительным факторам относятся градостроительные условия размещения объектов инфраструктуры, стратегия градостроительного развития города, архитектурно-художественные условия организации участка для концертного зала, как объекта. Повышение качества городской среды требует принятия долгосрочной стратегии градостроительного развития, включающей в себя направления развития концертной деятельности в городе.

Основной градостроительной проблемой Санкт-Петербурга является перенасыщенность исторического центра, выполняющего роль главного культурного, туристического и коммуникационного пространства. В городе, как и в мире, существует проблема сочетания новых объектов с исторической средой города, требующая профессионального осознания [2, 3]. Специфика концертного строительства диктует размещение КЗ в выигрышных местах, при этом периферийные районы остаются недостаточно оснащенными объектами культурно-досуговой направленности. Перспектива полицентричного развития Санкт-Петербурга позволит создать новые центры притяжения горожан и туристов, способствуя развитию новых районов, а также перераспределению транспортных потоков [4]. Актуальным направлением в архитектуре становится создание открытых зрелищных пространств в курортных районах с использованием природного рельефа [5], что возможно и в прибрежной зоне Санкт-Петербурга с выходом к Финскому заливу.

Архитектурно-планировочные факторы.

К архитектурно-планировочным факторам относят функционально-планировочную структуру, архитектурные решения, которые, в свою очередь, выражаются в требованиях к комфорту и безопасности и в требованиях к акустике и условиям видимости.

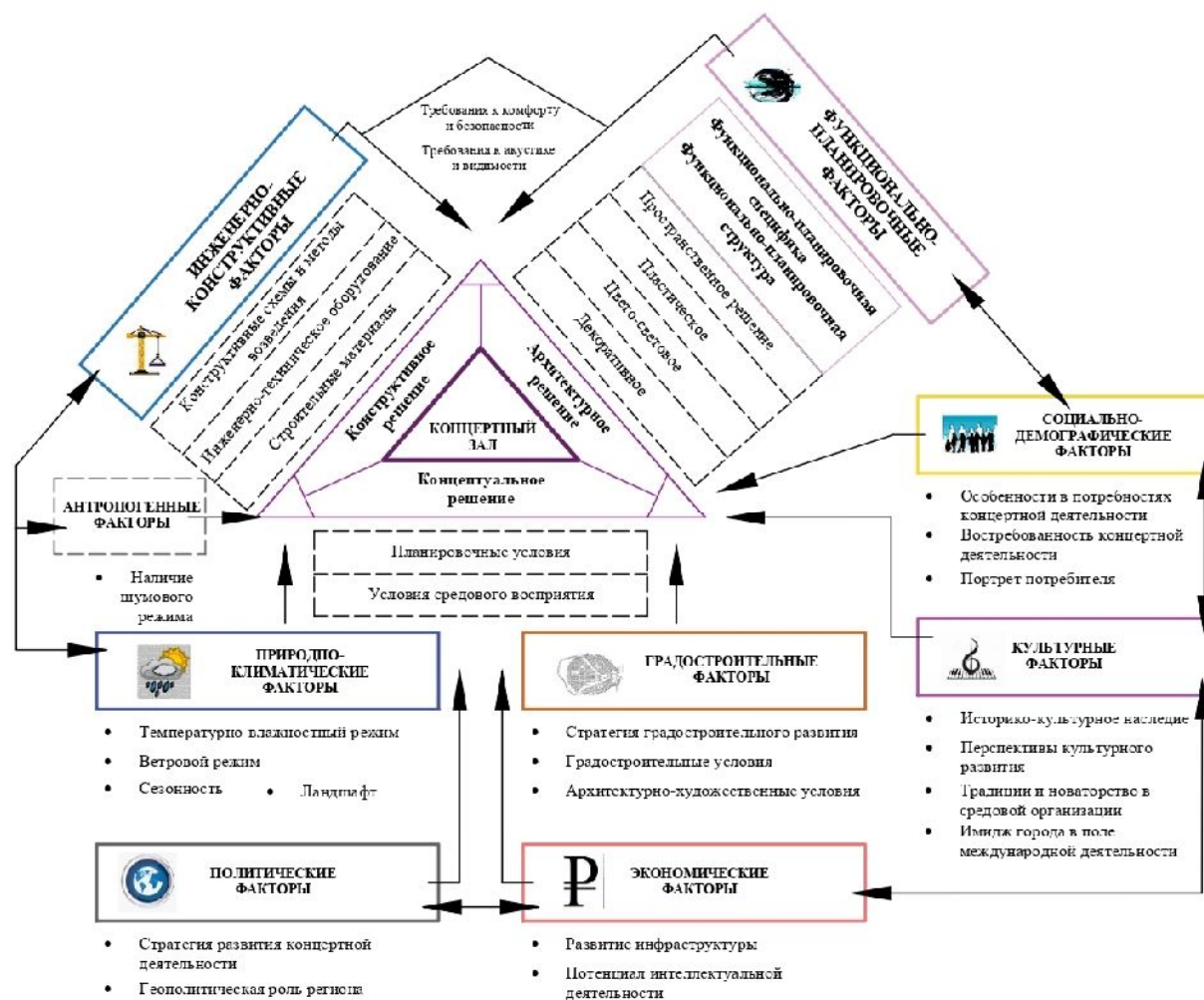


Рис. 1. Факторы, влияющие на типологию современных концертных залов

Оптимальное архитектурное решение для конкретного концертного зала достигается средствами пространственных, пластических и цветовых решений, декоративных элементов. Фактор привлекательности интерьерных и экстерьерных решений играет важную роль в создании уникального образа концертного зала. Определяющим же фактором являются его акустические свойства [6]. Функционально-планировочная структура должна отвечать назначению концертного зала и наличию в нем дополнительных функций. Отличительным свойством концертных залов является разделение его объемов на общедоступное пространство и зону со специализированным доступом (для артистов, музыкантов, сотрудников концертного зала), что отражается на удобстве организации потоков людей внутри здания и вокруг него. Для удовлетворения требований различных по жанру концертов применяются планировочные и пространственные трансформации, а также их сочетания [7].

Инженерно-конструктивные факторы.

К данной группе относятся конструктивные схемы и методы возведения, инженерно-техническое оборудование, строительные материалы.

Характер материальной оболочки и объемно-пространственное решение здания непосредственно определяют выбранной конструкцией, что особенно важно в связи с наличием в структуре здания большого объема (коробки зала), в частности, применением большепролетных конструкций. Разнообразное инженерное оборудование концертных залов предназначено для обеспечения надлежащего воздушно-теплого режима, пожарной безопасности. Концертные залы оснащаются современными акустическими системами, оптимизирующими условия слышимости, а также системами освещения, что особенно влияет на их привлекательность. Важное влияние на акустические условия оказывает грамотный выбор строительных материалов и материалов обшивки внутренних поверхностей зала, важно также предусмотреть применение экологических решений [8, 9]. Проблема наличия шумового режима, относящаяся к **антропогенным факторам**, устраняется также с помощью ряда технических решений (конструкции принципа «помещение в помещении», устройство акустических швов и тамбуров, разделение на блоки и др. [10]).

Политические факторы.

Приоритетные направления развития концертной деятельности зависят от политических факторов, к которым относятся стратегия развития концертной деятельности в Санкт-Петербурге, основывающаяся на особенностях геополитической роли региона и города и его возможностях.

Расположенный в западной части страны, на берегу Финского залива, Санкт-Петербург имеет выгодное геополитическое положение вблизи границ с Европейским союзом, на пересечении международных транспортных направлений. Санкт-Петербург в значительной степени интегрирован в мировые культурные связи и является одним из крупнейших культурных центров, на протяжении многих десятилетий успешно оправдывая звание «культурной столицы» России. В городе ежегодно проводятся международные фестивали, музыкальные конкурсы, укрепляя международные культурные связи с зарубежными странами, что способствует достижению устойчивого экономического роста, повышению благосостояния и качества жизни города. Санкт-Петербург становится наиболее престижным городом, привлекающим внимание мировых звезд сцены. Необходимо совершенствовать уровень организации международных культурных мероприятий в Санкт-Петербурге, развивать практику проведения комплексных мероприятий в формате культурных миссий.

Не смотря на появление в городе новых концертных площадок, очевидно, что в Санкт-Петербурге недостаточно современных концертных залов для проведения международных мероприятий. Проводимый в 2011, 2015 и 2019 Международный конкурс им. П.И. Чайковского задействовал несколько разрозненных объектов, в том числе исторические залы, которые в силу своей недостаточной вместимости и адаптированного оснащения не могли обеспечить комфортных условий для проведения мероприятий международного уровня. В январе 2020 года был утрачен СКК «Петербургский», долгое время собиравший многотысячные аудитории на концертах мировых культовых групп и звезд эстрады.

Экономические факторы.

В тесной связи с политическими факторами находятся экономические, оказывающие влияние на типологию концертных залов. К ним относятся развитие инфраструктуры сферы культуры, осуществляемая за счет создания благоприятных условий для привлечения инвестиций. В городе реализуются различные инвестиционные проекты, целью которых является формирование имиджа культуры в качестве основного конкурентного преимущества города с сохранением и

развитием культурно-исторического наследия и профессионального искусства [11].

Необходимо отметить, что индустрия исполнительских искусств в России представлена двумя основными сегментами: эстрадная музыка и сфера академического искусства (классическая музыка). Если первая максимально ориентирована на запросы аудитории и коммерчески успешна, то вторая является в большей степени дотационной и реализуется средствами государственных субсидий [12].

С целью повышения качества и совершенствования деятельности концертных организаций необходимо обеспечивать совершенствование и развитие материально-технической базы, включая их оснащение современным техническим оборудованием, внедрения инновационных технологий и подходов в деятельности музыкальных организаций.

Немаловажным фактором является создание финансовых возможностей для повышения международной конкурентоспособности музыкальных организаций с помощью привлечения в сферу музыкальной культуры высококвалифицированных кадров.

Социально-демографические факторы.

В данной группе факторов следует выделить вовлеченность в концертную деятельность, особенности потребностей и общий портрет потребителя.

Понятие слушателя (потребителя концертной индустрии) не сводится к понятию «любитель музыки». Но можно провести разделение на группы в зависимости от целей посещения концертных мероприятий, соответствующих следующему ряду: культурное, образовательное, развлекательное, деловое мероприятия [13].

В рамках задачи повышения вовлеченности населения в сферу культуры повышение интереса жителей и гостей Санкт-Петербурга необходимо обеспечивать разнообразие и доступность музыкальных мероприятий в городе, расширение их специализации, обеспечить развитие сети концертных организаций, в том числе отдаленных от исторического центра районах для обеспечения равного доступа к услугам в сфере музыкальной культуры. Также сеть музыкальных организаций должна пополняться организациями дополнительного музыкального образования детей, активизируя и развивая образовательный ресурс сферы музыкальной культуры для всех возрастов и социальных групп населения, реализуя эстетический и нравственный потенциал музыкального искусства как средства формирования и личностного развития в векторе традиционных ценностей и этики.

Культурный потенциал города.

Культурный потенциал города является основой развития концертной деятельности и концертных залов. Санкт-Петербург активно реализует современные культурные проекты, отражающие уникальную специфику петербургской музыкальной культуры и традиций.

Город обладает огромным историко-культурным наследием, который наряду с туристским потенциалом является его ключевым ресурсом, обуславливающим интерес к нему со стороны российской и зарубежной общественности. Культурное достояние Санкт-Петербурга является важнейшим фактором и базовым элементом его идентичности, формирующим особое отношение к нему со стороны жителей и гостей, позволяя стать местом притяжения, культурным и общественно-деловым центром мирового уровня.

В Санкт-Петербурге ежегодно возрастает количество концертных событий, проводятся массовые мероприятия по популяризации музыкальной культуры (например, ежегодный международный фестиваль «Опера всем», музыкальный уличный фестиваль «Piter for life», ежегодная акция «Ночь музыки в Гатчине»). «С 2012 года ежегодно проводится Санкт-Петербургский международный культурный форум - культурное событие мирового уровня, дискуссионная площадка, ежегодно притягивающая несколько тысяч экспертов в области культуры со всего мира: представителей драматического театра, оперы и балета, выдающихся режиссеров и музыкантов, общественных деятелей, представителей власти и бизнеса, академического сообщества. Число участников указанного форума увеличилось с 370 в 2012 году до 33 тыс. участников в 2017 году», - говорится в Стратегии социально-экономического развития Санкт-Петербурга до 2035 года [14].

Природно-климатические факторы.

К природно-климатическим факторам относятся температурно-влажностный и ветровой режимы, сезонность, состояние ландшафта. Данные факторы оказывают особое влияние на выбор пространственной организации КЗ, конструктивной схемы, строительных материалов, также природные особенности региона влияют на расположение КЗ на местности, определяя возможности их размещения у водных пространств и зеленой зоне.

Концертный сезон напрямую связан со временами года: концертная деятельность начинается, как правило, осенью, а завершается различными фестивалями в разгар «белых ночей» и в летний период меняет формат – концерты дополняются гастрольными внутрироссийскими программами, перемещаются на открытые площадки

и загород, являясь фактором притяжения к уникальным историческим объектам, расположенным в пригородных районах Санкт-Петербурга – Петергофе, Гатчине, Павловске, Пушкине и др., что с XIX века стало традиционной частью культурной жизни гостей и жителей города в летний период.

Представленные факторы не равнозначно влияют на формирование типологии КЗ. Факторы взаимосвязаны между собой и оказывают комплексное воздействие на КЗ, выступающего совокупностью концептуальных, архитектурных и конструктивных решений. К наиболее значимым можно отнести культурные, социально-демографические, градостроительные и экономические группы факторов. Учет данных факторов улучшает эффективность развития типологии КЗ, способствует их развитию в целом, оказывает влияние на формирование модели и рациональной концепции КЗ, позволяет оптимизировать функциональную структуру, определяя тип и принципы проектирования КЗ, повышая их рентабельность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гельфонд А.Л. Архитектурное проектирование общественных зданий и сооружений. М.: Архитектура-С, 2006. 277 с.
2. Анисимов А. В. Проблемы архитектуры новых объектов культуры в исторической среде // Academia. Архитектура и строительство. 2019. № 2. С. 19–29.
3. Hammond M. Performing Architecture: Opera Houses, Theatres and Concert Halls for the Twenty-first Century. L.: Merrell Publishers, 2010. 239 p.
4. Фёдорова О.О. Развивающийся центр города как среда формирования многофункциональных комплексов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2009. № 11. С. 9-12.
5. Трибельская А.М., Латыева Е.В., Театр выходит на площадь // Системные технологии. 2019. №30. С. 114–121.
6. Jaffe C. The Acoustics of Performance Halls: Spaces for Music from Carnegie Hall to the Hollywood Bowl. L.: W. W. Norton & Company, 2010. 208 p.
7. Дектерев С.А. Зрелищное здание сложной технологической структуры [Электронный ресурс]. URL: <http://arch-usaaa-mag.blogspot.com/2014/09/blog-post.html> (дата обращения 25.05.2020).
8. Newhouse V. Site and Sound: The Architecture and Acoustics of New Opera Houses and Concert Halls. L.: Monacelli Press, 2012. 256 p.

9. Тетиор А.Н. Социальные и экологические основы архитектурного проектирования: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Архитектура». М.: Академия, 2009. 231 с.

10. Анисимов А. В. Архитектурная премьера Мариинского театра // Academia. Архитектура и строительство. 2013. № 4. С. 83–99.

11. Инвестиционный портал Санкт-Петербурга. URL: <http://spbinvestment.ru/ru> (дата обращения: 21.07.2020).

12. Седых И.А. Индустрия исполнительских искусств [Электронный ресурс]. URL:

<https://dcenter.hse.ru/data/2018/08/21/1154843600/> (дата обращения: 19.01.2020).

13. Глухова А.В. Тенденции развития архитектуры концертных залов в аспекте изменения концертной деятельности // Перспективы науки. 2020. №7(30). С. 104–109.

14. Стратегия социально-экономического развития Санкт-Петербурга до 2035 года [Электронный ресурс]. URL: https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2019/04/17/19/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D0%B8%D1%8F_2035_%D0%BE%D1%84%D0%B8%D1%86.pdf (дата обращения: 29.03.2020).

Информация об авторах

Глухова Александра Викторовна, аспирант кафедры архитектурного проектирования. E-mail: iolanta71@yandex.ru Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4

Поступила 31.07.2020

© Глухова А.В., 2020

Gluhova A.V.

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: iolanta71@yandex.ru

FACTORS INFLUENCING THE TYPOLOGY OF CONCERT HALLS IN SAINT PETERSBURG

Abstract. *The typology of public buildings is constantly developing, and identifying rational ways to evolve concert halls is considered an urgent task. The development of new types of concert halls requires a comprehensive consideration of factors, both General and regional, that affect the requirements for concert institutions and the concert system as a whole. In the Russian Federation, there is an active process of opening new concert venues, but the development process is chaotic, without taking into account the conditions of specific cities – social, demographic, and economic. Their quality and principles of placement do not match the needs of visitors. Thus, the need to analyze the factors identified in the course of studying the experience of designing concert halls is revealed. The basic factors affect the typology of concert halls in general, they must be taken into account for the development of the typology of concert halls. The article also discusses regional factors using the example of the city of St. Petersburg. The specific features, relationships and the nature of the impact of factors in the architectural aspect are revealed. The article notes the inequality of factors in terms of the degree of their influence on the formation of the architectural typology of concert halls. The most significant factors include: cultural, urban planning, socio-demographic, economic, functional and planning factors.*

Keywords: *concert halls, typology, public buildings, influence of factors, St. Petersburg, conditions of the region.*

REFERENCES

1. Gel'fond A.L. Architectural design of public buildings and structures [Arkhitekturnoe proektirovanie obshchestvennykh zdaniy i sooruzhenii]. M.: Arkhitektura-S, 2006. 277 p. (rus)

2. Anisimov A.V. Problems of architecture of new cultural objects in the historical environment [Problemy arkhitektury novykh ob"ektov kul'tury v istoricheskoi srede]. Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. 2019. No. 2. Pp. 19–29. (rus)

3. Hammond M. Performing Architecture: Opera Houses, Theatres and Concert Halls for the Twenty-first Century. L.: Merrell Publishers, 2010. 239 p.

4. Fedorova O.O. The developing city center as an environment for the formation of multifunctional complexes [Razvivayushchiysya tsentr goroda kak sreda formirovaniya mnogofunktsional'nykh kompleksov]. Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk. 2009. No. 11. Pp. 9–12. (rus)

5. Tribel'skaya A.M., Latyeva E.V., The theater goes to the square [Teatr vykhodit na ploshchad']. (rus)

Sistemnye tekhnologii. 2019. No. 30. Pp. 114–121. (rus).

6. Jaffe C. The Acoustics of Performance Halls: Spaces for Music from Carnegie Hall to the Hollywood Bowl. L.: W. W. Norton & Company, 2010. 208 p.

7. Dekterev S.A. Spectacular building of complex technological structure [Zrelishchnoe zdanie slozhnoi tekhnologicheskoi struktury]: [Elektronnyi resurs]. URL: <http://arch-usaaa-mag.blogspot.com/2014/09/blog-post.html> (accessed 25.05.2020). (rus)

8. Newhouse V. Site and Sound: The Architecture and Acoustics of New Opera Houses and Concert Halls. L.: Monacelli Press, 2012. 256 p.

9. Tetior A.N. Social and Environmental Foundations of Architectural Design [Sotsial'nye i ekologicheskie osnovy arkhitekturnogo proektirovaniya]: ucheb. posobie dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedenii, obuchayushchikhsya po spetsial'nosti «arkhitektura». A.N. Tetior. M.: Akademiya, 2009. 231 p. (rus)

10. Anisimov A.V. Architectural premiere of the Mariinsky Theater [Arkhitekturnaya prem'era Mariinskogo teatra]. Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. 2013. No. 4. Pp. 83–99. (rus).

11. Investment portal of St. Petersburg [Investitsionnyi portal Sankt-Peterburga]. URL: <http://spbinvestment.ru/ru> (accessed 21.07.2020).

12. Sedykh I.A. Performing Arts Industry [Industriya ispolnitel'skikh iskusstv]: [Elektronnyi resurs]. URL: <https://dcenter.hse.ru/data/2018/08/21/1154843600/> (accessed 19.01.2020). (rus).

13. Glukhova A.V. Trends in the development of architecture of concert halls in the aspect of changing concert activities [Tendentsii razvitiya arkhitektury kontsertnykh zalov v aspekte izmeneniya kontsertnoi deyatel'nosti]. Perspektivy nauki. 2020. No. 7(30). Pp. 104–109 (rus).

14. Strategiya sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Sankt-Peterburga do 2035 goda [Elektronnyi resurs]. URL: https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2019/04/17/19/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D0%B8%D1%8F_2035_%D0%BE%D1%84%D0%B8%D1%86..pdf (accessed 29.03.2020). (rus)

Information about the authors

Glukhova, Aleksandra V., Postgraduate student. E-mail: iolanta71@yandex.ru St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4

Received 31.07.2020

Для цитирования:

Глухова А.В. Факторы, влияющие на типологию концертных залов в Санкт-Петербурге // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 10. С. 41–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-41-46

For citation:

Glukhova A.V. Factors influencing the typology of concert halls in saint petersburg. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 10. Pp. 41–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-41-46

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-47-56

Трубицын М.А., *Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

*E-mail: hung.hoangviet191290@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИНТЕЗА НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИОМИМЕТИЧЕСКОГО КАЛЬЦИЙ-ФОСФАТНОГО НАНОКОМПОЗИТА, ДОПИРОВАННОГО СИЛИКАТ- И КАРБОНАТ-АНИОНАМИ

Аннотация. Объектом исследования в настоящей работе является биомиметический кальций-фосфатный нанокompозит, допированный силикат- и карбонат-анионами (БМГАП), синтезированный методом химического осаждения из водных растворов. Полученные образцы исследованы с помощью рентгенофазового анализа (РФА), ИК-Фурье-спектроскопии и низкотемпературной адсорбции азота (метод БЭТ). Оценено влияние технохимических параметров синтеза на характеристики продуктов (фазовый состав, параметры кристаллической решетки, средний размер кристаллитов, удельная поверхность). Проведенное исследование влияния температуры синтеза показало, что с возрастанием температуры от 22 °С до 80 °С обнаруживается незначительное увеличение параметров a и c , что приводит к повышению объема элементарной ячейки. Также наблюдается тенденция снижения среднего размера областей когерентного рассеяния (ОКР) кристаллитов (от 7,52 до 4,65 нм) и удельной поверхности (от 192,51 до 74,72 м²/г), но объем и средний размер пор синтезированных порошков увеличиваются. Изучено влияние времени старения осадка в маточном растворе от 0,5 до 24 часов. Выявлено, что при повышении времени созревания осадка улучшается степень кристаллическости порошков в 1,7 раз, наблюдается увеличение удельной поверхности от 163,43 до 192,51 м²/г, происходит небольшое уменьшение объема и среднего размера пор образцов. Исследовали влияние скорости перемешивания реагентов. Установлено, что при увеличении скорости от 300 до 1300 об/мин. отмечается уменьшение среднего размера кристаллитов от 8,80 до 6,41 нм и, что обуславливает увеличение удельной поверхности синтезированных образцов от 178,58 до 192,51 м²/г, соответственно.

Ключевые слова: биомиметический нанокompозит, кальций-фосфат, гидроксипатит, допирование, силикат-анионы, карбонат-анионы, средний размер кристаллитов.

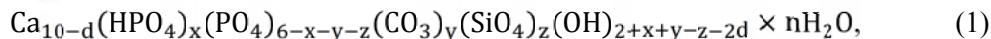
Введение. К числу приоритетных направлений медицинского материаловедения на сегодняшний день следует отнести разработку биоматериалов высокой функциональности и специфичности, способных воспроизводить биологические функции живого. В этом плане значительный интерес вызывает создание и использование биомедицинских материалов на основе синтетического гидроксипатита $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2]$, ГАП для регенерации поврежденных дефектов костей из-за его близкого фазового и химического сходства к минеральной составляющей костной ткани человека [1–4]. Кроме того, гидроксипатит проявляет превосходную биосовместимость, биоактивность и остеокондуктивность, что делает его полезным материалом для медицинских целей [5, 6]. Однако, препараты на основе ГАП, используемые в настоящее время в медицинской практике, обладают неоптимальной биорезорбируемостью, как вследствие, они остаются в организме в течение длительного периода после имплантации, что является их существенным недостатком [7, 8].

Одним из способов регулирования биологической активности данных биоматериалов является допирование кристаллохимической структуры гидроксипатита биосовместимыми силикат- (SiO_4^{4-}) и карбонат (CO_3^{2-}) – анионами. В ряде опубликованных работ [9–17] сообщается, что введение данных анионов в кристаллическую структуру ГАП приводит к изменению параметров кристаллической решетки и повышению дефектности, что способствует более высокой скорости растворения *in vivo*. Поэтому синтез биомиметического кальций-фосфатного нанокompозита, допированного силикат- и карбонат-анионами (БМГАП) к настоящему времени является актуальным направлением исследования.

Направленный синтез кальций-фосфатных материалов, в частности БМГАП с заданными характеристиками представляет достаточно сложную физико-химическую задачу. Из литературных источников следует, что наиболее важными параметрами, влияющими на формирование структуры и свойства ГАП, являются температура реакционной среды, время отстаивания

осадка в маточном растворе и скорость перемешивания реагентов.

Вследствие вышеизложенного, целью настоящего исследования было изучение влияния технотехимических параметров на физико-химические характеристики биомиметического кальций-фосфатного нанокompозита, допированного силикат- и карбонат-анионами.



где d – степень дефицитности ионов Ca^{2+} ; y и z – коэффициенты замещения фосфат-ионов на карбонат- и силикат-анионы.

В качестве прекурсора для получения БМГАП использовали: нитрат кальция 4-водный (х. ч.); гидрофосфат аммония (ч. д. а.); тетраэтоксисилан (ос. ч.); карбонат аммония (ч. д. а.) и лимонную кислоту 1-водную (ч. д. а.). Для поддержания pH реакционной среды на уровне $10 \pm 0,5$ применяли 25% раствора гидроксида аммония. Подробное описание методики синтеза приведено в [18, 19].

Рентгенофазовый анализ (РФА) порошковых образцов выполняли с помощью дифрактометра *Rigaku Ultima IV* с детектором *D/teX Ultra* ($\text{CuK}\alpha$ – излучение, средняя длина волны $\lambda = 1,54178 \text{ \AA}$, диапазон углов съемки $20^\circ \leq 2\theta \leq 55^\circ$, шаг сканирования $0,02^\circ$, скорость регистрации спектров $3^\circ/\text{мин.}$). Идентификацию и анализ фазового состава полученных образцов проводили с использованием программного обеспечения PDXL Qualitative Analysis и использованием картотеки PDF 2008 (ICDD, USA).

Размеры областей когерентного рассеяния (ОКР) вычисляли по формуле Селякова-Шеррера [20]:

$$D_{hkl} = \frac{n\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2)$$

где D_{hkl} – размер ОКР; n – коэффициент, зависящий от формы частицы и близкий к 1; λ – длина волны мономатического рентгеновского излучения; β – интегральная полуширина дифракционной линии; θ – дифракционный угол.

Объем элементарной ячейки гексагональной сингонии рассчитывали по формуле [20]:

Материалы и методы. В качестве объекта исследования выбран биомиметический кальций-фосфатный нанокompозит, допированный силикат- и карбонат-анионами (БМГАП), отвечающий формуле 1:

$$V_{\text{гекс}} = \frac{\sqrt{3}a^2c}{2} \quad (3)$$

где a и c – кристаллические параметры ячейки.

Степень кристалличности X_s полученных образцов определяли по данным РФА с применением формулы [21]:

$$X_s = \frac{\sum A_c}{\sum A} \times 100\% \quad (4)$$

где $\sum A_c$ – интегрированная площадь под всеми пиками кристаллов и $\sum A$ – общая интегрированная площадь под всеми пиками дифракции рентгеновских лучей при $2\theta = 20 \div 55^\circ$.

Съемку ИК – спектров полученных образцов проводили на ИК-Фурье-спектрометре *IRPrestige-21* (фирма Shimadzu, Япония) в диапазоне волновых чисел $400 \div 4000 \text{ см}^{-1}$. Образцы готовились методом прессования таблеток с KBr. Анализ полученных спектров, идентификацию полос поглощения осуществляли по таблицам характеристических частот при использовании литературных и справочных данных.

Удельную площадь поверхности ($S_{уд}$) полученных порошков определяли методом Брюнера – Эммета – Теллера (БЭТ) с использованием адсорбционного прибора *TriStar II 3020* (фирма Micromeritics, США) на основании изотерм низкотемпературной сорбции-десорбции азота.

Основная часть. При синтезе БМГАП варьировали температуру реакционной среды, время старения осадка под маточным раствором, скорость перемешивания реагентов. Интервалы варьирования технотехимических параметров синтеза БМГАП приведены в табл. 1.

Таблица 1

Варьируемые технотехимические параметры синтеза БМГАП

Исследуемый образец	$T_{\text{син.}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{стар.}}, \text{ч}$	$v, \text{об/мин.}$
БМГАП $d = 1; y = z = 1$ $\text{Ca}/(\text{P}+\text{Si}+\text{C}) = 1,50$	22	0,5	300
	40	6	700
	60	12	1000
	80	24	1300

Обозначение: $T_{\text{син.}}$ – температура синтеза; $t_{\text{стар.}}$ – время старения осадка; v – скорость перемешивания реагентов.

Влияние температуры синтеза. В данной работе для исследования влияния температуры «мокрого» синтеза на свойства конечных продуктов были синтезированы образцы БМГАП в присутствии цитрат-ионов ($\omega=0,46$ масс. %). Синтез проводили при температурах 22, 40, 60 и 80 °C с погрешностью ± 3 °C. Реакционную смесь

отстаивали при комнатной температуре в течение 24 часов для завершения процесса фазообразования.

На рис. 1 представлены рентгеновские порошковые дифрактограммы образцов БМГАП, синтезированных при различных температурах синтеза.

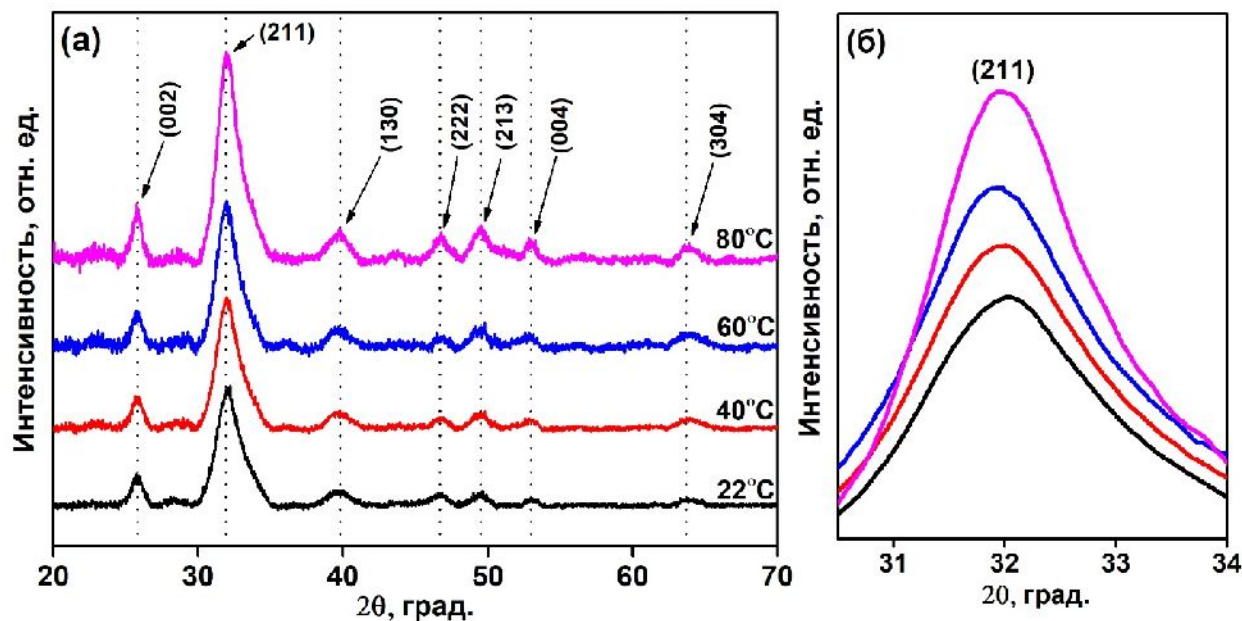


Рис. 1. Рентгенограммы образцов БМГАП, полученных при различных температурах: а) – общий вид; б) – вид основного пика при $2\theta = 31,9^\circ$

Согласно данным РФА (рис. 1, а, б), все твердые фазы БМГАП, полученные при варьировании температуры в интервале от 22 °C до 80 °C, представляют собой однофазный гидроксипатит (по ICDD № 01-072-1243). С увеличением температуры синтеза, дифракционные пики исследуемых порошков становятся более интенсивными и четкими. Это различие наблюдается на рис. 1, б: показан наиболее интенсивный пик БМГАП с рефлексом отражения плоскости (211) при $2\theta = 31,9^\circ$.

Для серии порошкообразных образцов БМГАП, используя данные РФА (рис. 1, а), были рассчитаны параметры кристаллической решетки порошков, синтезированных при различных температурах. На рис. 2 приведены закономерности изменения параметров кристаллических решеток a , c , а также зависимости объема элементарной ячейки и среднего размера ОКР кристаллитов от температуры синтеза.

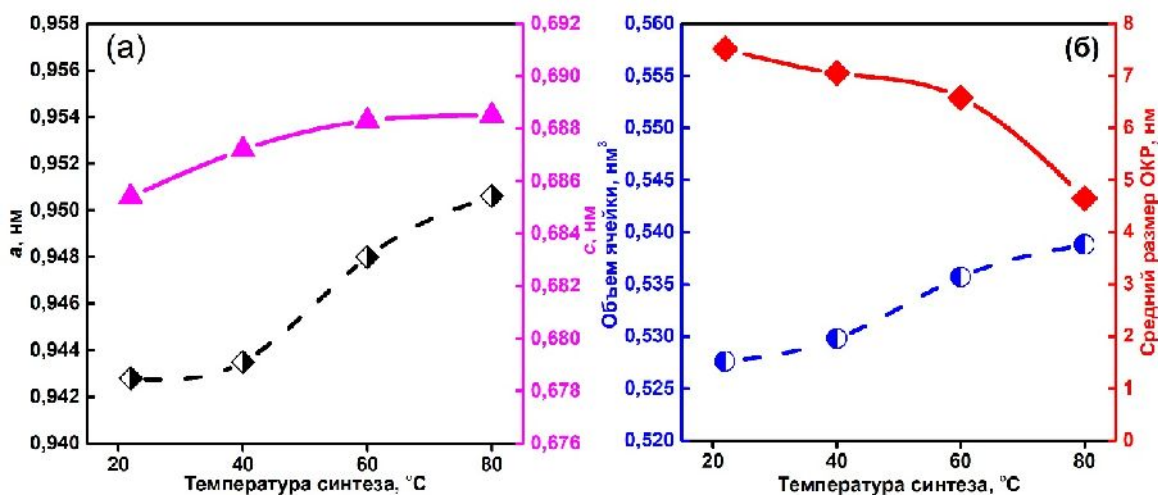


Рис. 2. Влияние температуры синтеза на параметры элементарной ячейки a , c (а), объем элементарной ячейки и средний размер ОКР (б)

Следует отметить, что при повышении температуры синтеза от 22 до 80 °С обнаруживается незначительное увеличение параметров элементарных ячеек: от 0,943 до 0,951 нм параметра a и для параметра c – от 0,685 до 0,689 нм (рис. 2, а). Увеличение данных параметров приводит к увеличению объема элементарной ячейки (рис. 2, б).

С использованием формулы Селякова-Шеррера по данным РФА при помощи программы «ORIGIN PRO 9.0» были рассчитаны средние размеры ОКР кристаллитов. На рис. 2, б видно,

что с увеличением температуры синтеза наблюдается тенденция снижения размеров кристаллитов исследуемых образцов от 7,52 до 4,65 нм.

Качественный и количественный анализ структурно-функциональных групп в различных позициях кристаллической структуры БМГАП был проведен методом ИК-спектроскопии. На рис. 3 представлены ИК-спектры порошков, синтезированных при заданных температурах синтеза.

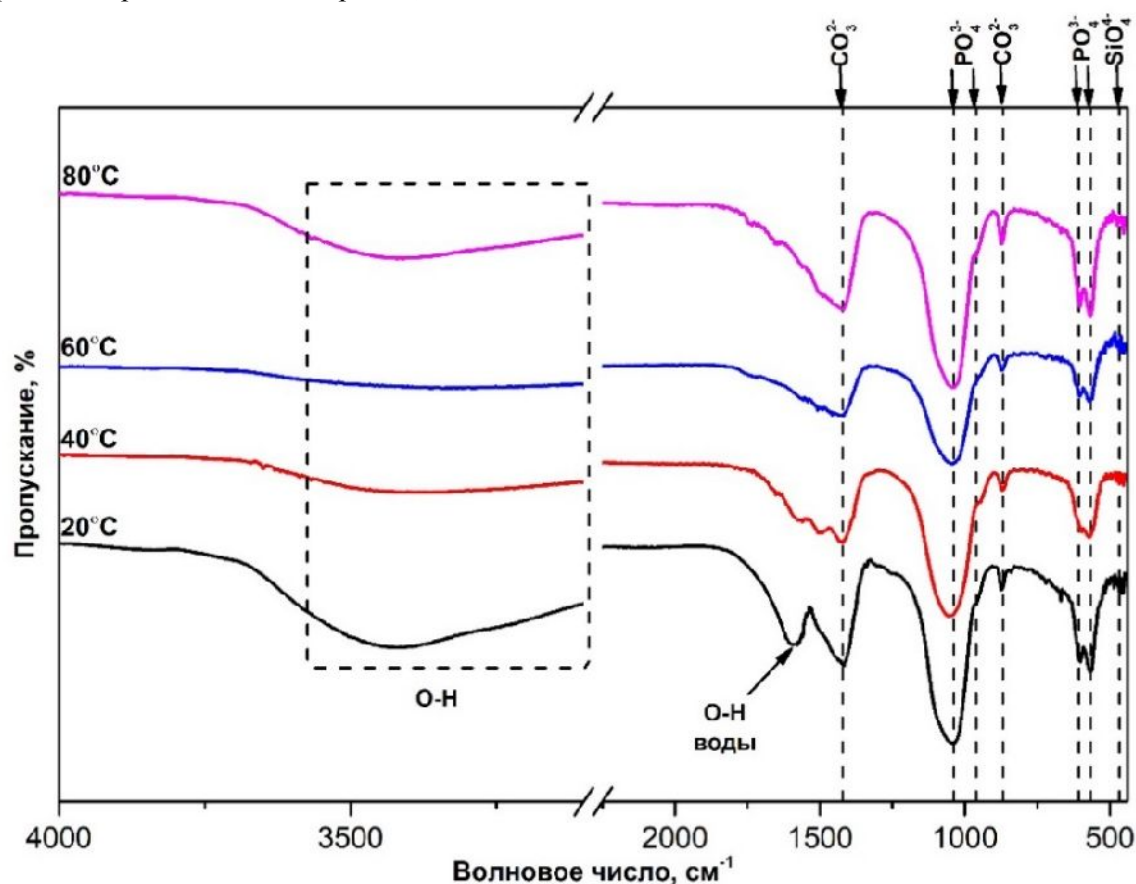


Рис. 3. ИК-спектры исследуемых образцов, полученных при различных температурах

На ИК – спектрах всех образцов БМГАП обнаруживаются полосы поглощения, которые характерны для структуры ГАП (рис. 3). Полосы поглощения при 571, 605, 959 и 1039 см^{-1} соответствуют колебаниям связей P-O в составе фосфатных тетраэдров. Широкая полоса в интервале 2700 – 3570 см^{-1} относится к валентным колебаниям гидроксильных групп в молекулах структурно - связанной воды. Кроме того, на ИК – спектрах проявляются полосы поглощения с волновыми числами 870 и 1423 см^{-1} , которые могут быть отнесены к модам колебаний карбонатных групп. Согласно данным ИК-спектроскопии в составе полученных порошков помимо фосфатных, гидроксильных и карбонатных групп присут-

ствуют силикат-анионы, что подтверждается появлением на ИК – спектрах образцов полосы при 466 см^{-1} .

С повышением температуры синтеза интенсивность полос в области 2700 – 3570 см^{-1} и 571 – 605 см^{-1} , соответствующих гидроксильным и фосфатным группам незначительно снижается. Также у образцов БМГАП, полученных при более высоких температурах (60 – 80°C) наблюдается исчезновение полосы, соответствующей колебаниям O-H связей в молекулах адсорбционной воды. Это может быть связано с десорбцией молекулы воды с поверхности порошков.

Результаты определения удельной поверхности, объема и среднего размера пор порошков, осажденных при различных температурах приведены в табл. 2.

Таблица 2

Текстуальные характеристики образцов БМГАП, полученных при различных температурах синтеза

$T_{\text{синт.}}, ^\circ\text{C}$	$S_{\text{уд.}}, [\text{м}^2/\text{г}]$	$V_{\text{пор.}}, [\text{см}^3/\text{г}]$	$D_{\text{пор.}}, [\text{\AA}]$
22	192,51	0,25	50,67
40	74,72	0,33	172,34
60	117,90	0,36	121,37
80	137,02	0,36	100,68

Сравнительный анализ данных табл. 2 показал, что с возрастанием температуры осаждения наблюдается понижение удельной поверхности, в то время как объем и средний размер пор линейно увеличиваются.

Таким образом, методом химического осаждения из водных растворов при варьировании температуры синтеза от 22 до 80 °C получены однофазные нанокристаллические БМГАП со средним размером ОКР от 4,65 до 7,52 нм. На основании экспериментальных данных установлено, что при увеличении температуры синтеза характеристики БМГАП меняются, соответственно: увеличиваются параметры кристаллических решеток a , c и следовательно объем элементарной

ячейки, снижается удельная поверхность порошков, но объем и средний размер пор возрастают.

Отстаивание осадка в маточном растворе. Исследование влияния времени созревания осадка в маточном растворе было проведено после синтеза образцов БМГАП в присутствии цитрат-ионов ($\omega=0,46$ масс. %) при комнатной температуре $22 \pm 2^\circ\text{C}$.

Порошковые рентгеновские дифрактограммы исследуемых образцов БМГАП, полученных при варьировании времени созревания осадка в маточном растворе, представлены на рис. 4.

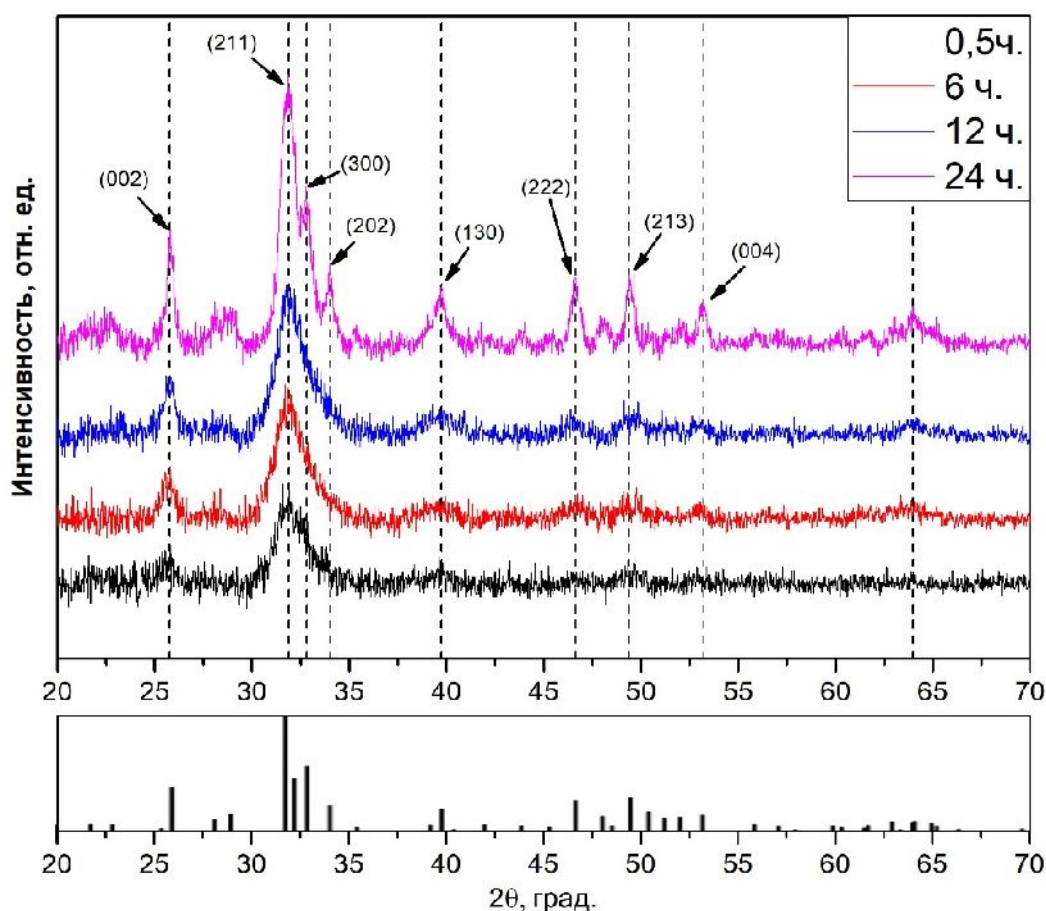


Рис. 4. Порошковые рентгеновские дифрактограммы образцов БМГАП, при заданном времени старения и комнатной температуре

На рентгенограмме (рис. 4) у порошка, состаренного в течение 0,5 ч. присутствует интенсивный дифракционный пик при $2\theta=31,9^\circ$ с межплоскостным расстоянием $2,81\text{\AA}$, соответствующим плоскости (211) кристаллической решетки ГАП. Это свидетельствует об образовании ГАП на первой стадии синтеза, что, по-видимому, может быть связано с медленным процессом отделения осадка при фильтровании. Однако, другие характерные дифракционные максимумы не наблюдаются. С увеличением времени созревания осадка обнаруживаются дополнительные дифракционные пики, принадлежащие фазе гидроксипатита, которые становятся более интенсивными и четкими. На рис. 4 видно, что рентгенограмма образца, состаренного в течение 24 ч.

сов хорошо соответствует стандарту для гексагональной структуры ГАП с пространственной группой $P6_3/m$ (по ICDD № 01-072-1243).

Увеличение интенсивности характерных дифракционных максимумов с повышением времени старения осадка в маточном растворе указывает на возрастание степени кристалличности продуктов синтеза. При этом степень кристалличности полученных образцов БМГАП увеличивается от 51,60 ($t_{\text{стар.}}=0,5$ ч.) до 88,18% ($t_{\text{стар.}}=24$ ч.).

На рис. 5 представлены зависимости степени кристалличности, величины удельной поверхности, объема и среднего размера пор образцов БМГАП от времени созревания осадка под маточным раствором.

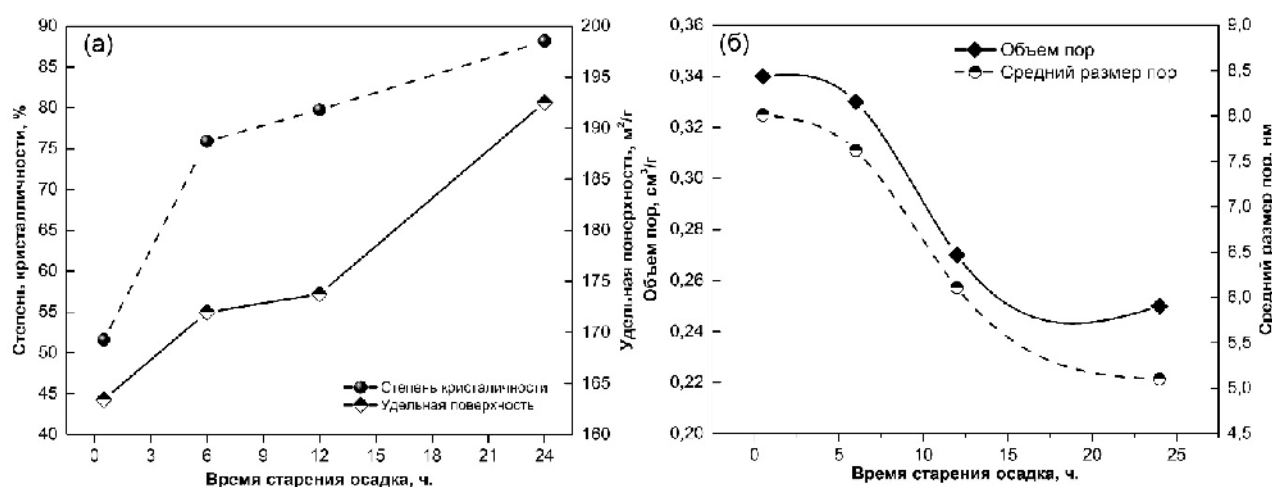


Рис. 5. Влияние времени созревания осадка на степень кристалличности, величины удельной поверхности, объем и средний размер пор полученных образцов

Из рис. 5, а видно, что при увеличении времени выдержки осадка в маточном растворе от 0,5 до 24 ч. степень кристалличности порошков улучшается в 1,7 раз. Также наблюдается повышение удельной поверхности образцов БМГАП от 163,43 до 192,51 м²/г. Наиболее заметным увеличением этого показателя оказалось у образцов БМГАП при созревании осадка в течение 24 ч. (на 17,8% относительно образца при выдержке осадка – 0,5 ч.). На графиках 4, б видно, что при повышении времени старения осадка в маточном растворе от 0,5 до 24 ч. происходит небольшое уменьшение объема и среднего размера пор образцов: объем пор уменьшается от 0,34 до 0,25 см³/г, а средний размер пор – от 8,01 до 5,67 нм. В целом средние размеры частиц, рассчитанные по данным РФА (средний размер ОКР) и по удельной поверхности (метод БЭТ) хорошо согласуются между собой.

Влияние скорости перемешивания реакционной смеси. Известно, что скорость перемешивания исходных реагентов существенно влияет

на процесс нуклеации. Поскольку скорость процесса образования зародышей при интенсивном перемешивании возрастает быстрее, чем скорость процесса роста кристаллов, то в конечном итоге происходит уменьшение их средних размеров и увеличение количества новых кристаллов. Результаты исследования скорости перемешивания реагентов на физико-химические и текстурные характеристики синтезированных порошков представлены на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что при увеличении скорости перемешивания реагентов от 300 до 1300 об/мин. отмечается тенденция к уменьшению среднего размера ОКР кристаллитов от 8,80 до 6,41 нм и, соответственно, к увеличению величины удельной поверхности от 178,58 до 192,51 м²/г. Однако полученные средний размер кристаллитов и величина удельной поверхности при скорости $v = 1000$ и 1300 об/мин. незначительно отличаются, поэтому рекомендуется приводить синтез при v не более 1000 об/мин.

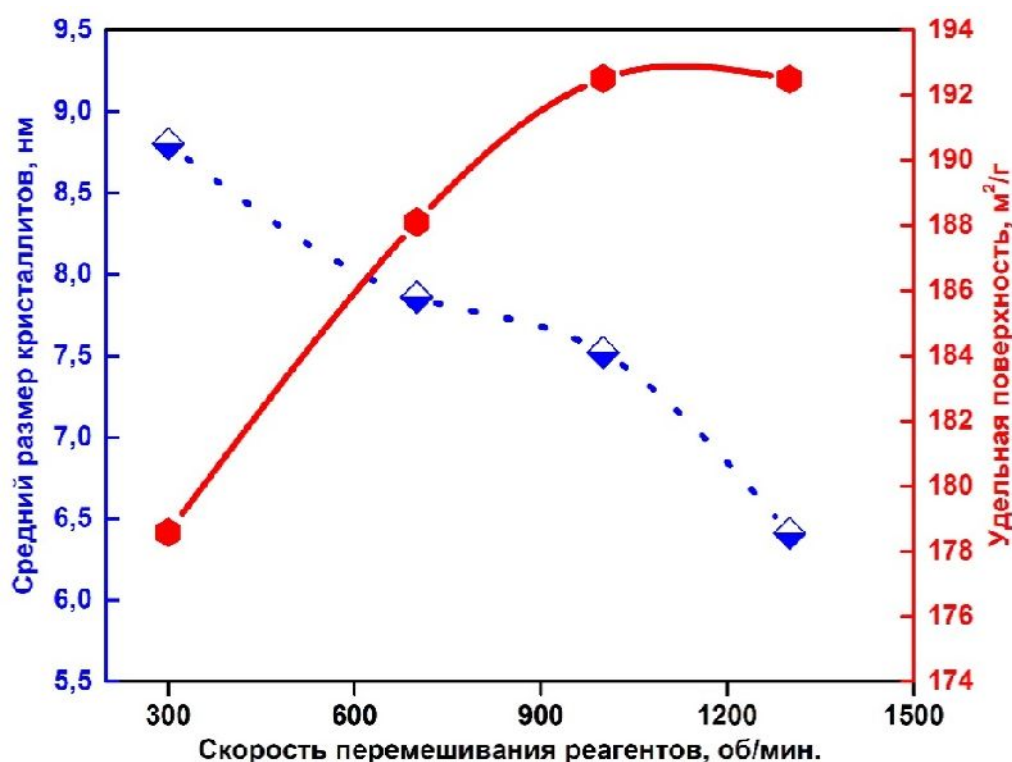


Рис. 6. Влияние скорости перемешивания реагентов на средний размер кристаллитов и удельную поверхность синтезированных порошков

Выводы. На основе проведенных исследований установлено, что биомиметический кальций-фосфатный наноккомпозит, допированный силикат- и карбонат-анионами можно успешно синтезировать путем химического осаждения из водных растворов, используя следующие оптимальные технхимические параметры синтеза: температура $t = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, время созревания осадка $t_{\text{стар.}} = 24$ часов и скорость перемешивания реагентов $v = 1000$ об/мин. Предложенное условие синтеза позволяет контролировать качественные и количественные характеристики порошков БМГАП, что является важным требованием при производстве биоматериалов медицинского назначения.

Источник финансирования. Работа выполнена с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования "Технологии и Материалы НИУ "БелГУ".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Juhasz J.A., Best S.M. Bioactive ceramics: processing, structures and properties // *Journal of Materials Science*. 2012. Vol. 47, № 2. Pp. 610–624. doi: 10.1007/s10853-011-6063-x.
2. Valletregi M., Gonzalezcalbet M.J. Calcium phosphates as substitution of bone tissues // *Progress in Solid State Chemistry*. 2004. Vol. 32, № 1–2. Pp. 1–31. doi: 10.1016/j.progsolidstchem.2004.07.001.

3. Zhou H., Lee J. Nanoscale hydroxyapatite particles for bone tissue engineering // *Acta Biomaterialia*. 2011. Vol. 7, № 7. Pp. 2769–2781. doi: 10.1016/j.actbio.2011.03.019.

4. Kolmas J., Krukowski S., Laskus A., Jurkitewicz M. Synthetic hydroxyapatite in pharmaceutical applications // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42, № 2. Pp. 2472–2487. doi: 10.1016/j.ceramint.2015.10.048.

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. Биоккомпозиты на основе кальцийфосфатных покрытий, наноструктурных и ультрамелкозернистых биоинертных металлов, их биосовместимость и биодеградация. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. 596 с.

7. Ishikawa K., Matsuya S., Miyamoto Y., Kawate K. Bioceramics // *Comprehensive Structural Integrity, Bioengineering*. 2003. Vol. 9. Pp. 169–214. doi: 10.1016/B0-08-043749-4/09146-1.

8. Jones J.R., Lin S., Yue S., Lee P. D., Hanna J. V., Smith M. E., Newport R. J. Bioactive glass scaffolds for bone regeneration and their hierarchical characterisation // *Proceedings of the Institution of*

Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine. 2010. Vol. 224, № 12. Pp. 1373–1387. doi: 10.1243/09544119JEIM836.

9. Khan A.F., Saleem M., Afzal A., Ali A. Bioactive behavior of silicon substituted calcium phosphate based bioceramics for bone regeneration // Materials science & engineering. C, Materials for biological applications. 2014. Vol. 35. Pp. 245–252. doi: 10.1016/j.msec.2013.11.013.

10. Casarrubios L., Matesanz M., Sanchez-Salcedo S., Arcos D., Vallet-Regí, M., Portolés M. Nanocrystallinity effects on osteoblast and osteoclast response to silicon substituted hydroxyapatite // Journal of colloid and interface science. 2016. Vol. 482. Pp. 112–120. doi: 10.1016/j.jcis.2016.07.075.

11. Landi E., Celotti G., Logroscino G., Tampieri A. Carbonated hydroxyapatite as bone substitute // Journal of The European Ceramic Society. 2003. Vol. 23, № 15. Pp. 2931–2937. doi:10.1016/S0955-2219(03)00304-2.

12. Boanini E., Gazzano M., Bigi A. Ionic substitutions in calcium phosphates synthesized at low temperature // Acta Biomater. 2010. Vol. 6, № 6. Pp. 1882–1894. doi: 10.1016/j.actbio.2009.12.041.

13. Bang L.T., Ramesh S., Purbolaksono J., Ching Y., Long B.D., Chandran, H., & Othman R. Effects of silicate and carbonate substitution on the properties of hydroxyapatite prepared by aqueous co-precipitation method // Materials & Design. 2015. Vol. 87. Pp. 788–796. doi: 10.1016/J.MATDES.2015.08.069.

14. Mostafa N.Y., Hassan H.M., Mohamed F.H. Sintering behavior and thermal stability of Na⁺, SiO₄⁴⁻ and CO₃²⁻ co-substituted hydroxyapatites // J. Alloys Compd. 2009. Vol. 479, № 1–2. Pp. 692–698. doi: 10.1016/j.jallcom.2009.01.037.

15. Landi E., Uggeri J., Sprio S., Tampieri A., Guizzardi S. Human osteoblast behavior on as-synthesized SiO₄ and B-CO₃ co-substituted apatite //

Journal of biomedical materials research. A. 2010. Vol. 94A, № 1. Pp. 59–70. doi: 10.1002/jbm.a.32671.

16. Matesanz M.C., Linares J., Lilue Isabel, Sanchez-Salcedo S., Feito M.J., Arcos D., Vallet-Regí M., Portolés M. T. Nanocrystalline silicon substituted hydroxyapatite effects on osteoclast differentiation and resorptive activity // Journal of materials chemistry. B. 2014. Vol. 2, № 19. Pp. 2910. doi: 10.1039/C3TB21697G.

17. Трубицын М.А., Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В., Ле В.Т. Синтез и исследование физико-химических свойств наноразмерного гидроксиапатита, допированного карбонат- и силикат-анионами // Вестник БГТУ им. Шухова. 2019. Т. 4, № 11. С. 86–93.

18. Трубицын М.А., Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В. Влияние цитрат-ионов на структурно-морфологические и биологические свойства наноразмерного биомиметического гидроксиапатита, допированного силикат- и карбонат-анионами // Вестник технологического университета. 2020. Т. 23. №4. С. 19–23.

19. Трубицын М.А., Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В. Синтез и исследование свойства биомиметического гидроксиапатита, допированного карбонат- и силикат-анионами в присутствии цитрат-ионов // Вестник БГТУ им. Шухова. 2020. Т. 5, № 6. С. 106–113.

20. Cullity B.D., Weymouth J.W. Elements of X-Ray Diffraction // Am. J. Phys. 1957. Vol. 25, № 6. Pp. 394–395. doi: 10.1063/1.3060306.

21. Singh G., Singh S., Prakash S. Surface characterization of plasma sprayed pure and reinforced hydroxyapatite coating on Ti6Al4V alloy // Surf. Coat. Technol. 2011. Vol. 205, № 20. Pp. 4814–4820. doi: 10.1016/J.SURFCOAT.2011.04.064.

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 01.10.2020 г.

© Трубицын М. А., Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л. В., 2020

Troubitsin M.A., *Hoang Viet Hung, Furda L.V.

Belgorod State National Research University

*E-mail: hung.hoangviet191290@gmail.com

INFLUENCE OF SYNTHESIS TECHNO-CHEMICAL PARAMETERS ON PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF BIOMIMETIC CALCIUM-PHOSPHATE NANOCOMPOSITE DOPED BY SILICATE AND CARBONATE ANIONS

Abstract. The object of our investigation is a biomimetic calcium-phosphate nanocomposite doped by silicate and carbonate anions (BMHAP) synthesized by chemical deposition from aqueous solutions. The obtained samples are investigated using X-ray phase analysis (XRD), FTIR spectroscopy, and low-temperature nitrogen adsorption (BET method). The influence of the techno chemical synthesis parameters on the products characteristics (including phase composition, crystal lattice parameters, average crystallite size, specific surface area) is evaluated. The study on the effect of the synthesis temperature shows that with increasing in temperature from 22°C to 80°C, reveals a slight increase in the parameters of unit cells a and c , which leads to an increase in its volume. There is also a tendency towards a decrease in the average size of coherent scattering regions of crystallites (from 7,52 to 4,65 nm) and specific surface area (from 192,51 to 74,72 m²/g), but the pore volume and average pore diameter of the synthesized powders increases. The effect of the aging time of the sediment in the mother liquor is studied from 0,5 to 24 hours. It is found that with an increase in the maturation time of the sediment, the percent crystallinity of the powders improves by 1,7 times, an increase in the specific surface area from 163,43 to 192,51 m²/g and a slight decrease in the pore volume and average pore size of the samples are observed. The impact of the stirring rate of the reagents is investigated. An increase in speed from 300 to 1300 rpm has been shown to decrease the average crystallite size from 8,80 to 6,41 nm, and as a result, to increase the specific surface area of the synthesized samples from 178,58 to 192,51 m²/g, respectively.

Keywords: biomimetic nanocomposite, calcium phosphate, hydroxyapatite, doping, silicate anions, carbonate anions, average crystallite size.

REFERENCES

1. Juhasz J.A., Best S.M. Bioactive ceramics: processing, structures and properties. *Journal of Materials Science*. 2012. Vol. 47, No. 2. Pp. 610–624. doi: 10.1007/s10853-011-6063-x.
2. Valletregi M., Gonzalezcalbet M. J. Calcium phosphates as substitution of bone tissues. *Progress in Solid State Chemistry*. 2004. Vol. 32. No. 1–2. Pp. 1–31. doi: 10.1016/j.progsolidstchem.2004.07.001.
3. Zhou H., Lee J. Nanoscale hydroxyapatite particles for bone tissue engineering. *Acta Biomaterialia*. 2011. Vol. 7. No. 7. Pp. 2769–2781. doi: 10.1016/j.actbio.2011.03.019.
4. Kolmas J., Krukowski S., Laskus A., Jurkitewicz M. Synthetic hydroxyapatite in pharmaceutical applications. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. No. 2. Pp. 2472–2487. doi: 10.1016/j.ceramint.2015.10.048.
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. Ishikawa K., Matsuya S., Miyamoto Y., Kawate K. Bioceramics. *Comprehensive Structural Integrity, Bioengineering*. 2003. Vol. 9. Pp. 169–214. doi: 10.1016/B0-08-043749-4/09146-1.
8. Jones J.R., Lin S., Yue S., Lee P.D., Hanna J.V., Smith M.E., Newport R.J. Bioactive glass scaffolds for bone regeneration and their hierarchical characterisation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 2010. Vol. 224. No. 12. Pp. 1373–1387. doi: 10.1243/09544119JEIM836.
9. Khan A. F., Saleem M., Afzal A., Ali A. Bioactive behavior of silicon substituted calcium phosphate based bioceramics for bone regeneration. *Materials science & engineering. C, Materials for biological applications*. 2014. Vol. 35. Pp. 245–252. doi: 10.1016/j.msec.2013.11.013.
10. Casarrubios L., Matesanz M., Sanchez-Salcedo S., Arcos D., Vallet-Regí, M., Portolés M. Nanocrystallinity effects on osteoblast and osteoclast response to silicon substituted hydroxyapatite. *Journal of colloid and interface science*. 2016. Vol. 482. Pp. 112–120. doi: 10.1016/j.jcis.2016.07.075.
11. Landi E., Celotti G., Logroscino G., Tampieri A. Carbonated hydroxyapatite as bone substitute. *Journal of The European Ceramic Society*. 2003.

Vol. 23. No. 15. Pp. 2931–2937. doi:10.1016/S0955-2219(03)00304-2.

12. Boanini E., Gazzano M., Bigi A. Ionic substitutions in calcium phosphates synthesized at low temperature. *Acta Biomater.* 2010. Vol. 6. No. 6. Pp. 1882–1894. doi: 10.1016/j.actbio.2009.12.041.

13. Bang L.T., Ramesh S., Purbolaksono J., Ching Y., Long B.D., Chandran, H., & Othman R. Effects of silicate and carbonate substitution on the properties of hydroxyapatite prepared by aqueous co-precipitation method. *Materials & Design.* 2015. Vol. 87. Pp. 788–796. doi: 10.1016/J.MATDES.2015.08.069.

14. Mostafa N.Y., Hassan H. M., Mohamed F. H. Sintering behavior and thermal stability of Na⁺, SiO₄⁴⁻ and CO₃²⁻ co-substituted hydroxyapatites. *J. Alloys Compd.* 2009. Vol. 479. No. 1–2. Pp. 692–698. doi: 10.1016/j.jallcom.2009.01.037.

15. Landi E., Uggeri J., Sprio S., Tampieri A., Guizzardi S. Human osteoblast behavior on as-synthesized SiO₄ and B-CO₃ co-substituted apatite. *Journal of biomedical materials research. A.* 2010. Vol. 94A. No. 1. Pp. 59–70. doi: 10.1002/jbm.a.32671.

16. Matesanz M.C., Linares J., Lilue Isabel, Sanchez-Salcedo S., Feito M.J., Arcos D., Vallet-Regi M., Portolés M.T. Nanocrystalline silicon substituted hydroxyapatite effects on osteoclast differentiation and resorptive activity. *Journal of materials chemistry. B.* 2014. Vol. 2. No. 19. Pp. 2910. doi: 10.1039/C3TB21697G.

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 [Синтез і дослідження фізико-хімічних властивостей нанорозмірного гідроксиапатита, допированного карбонат- і силікат-аніонами]. *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. Troubitsin M.A., Hoang Viet Hung, Furda L.V. Influence of citrate ions on structural, morphological and biological properties of nanosized biomimetic hydroxyapatite doped by silicate and carbonate anions [Влияние цитрат-ионов на структурно-морфологические и биологические свойства наноразмерного биомиметического гидроксиапатита, допированного силікат- і карбонат-аніонами]. *Bulletin of the Technological University.* 2020. Vol. 23. No. 4. Pp. 19–23. (rus)

19. 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 [Синтез і дослідження властивостей біоміметического гідроксиапатита, допированного силікат- і карбонат-аніонами в присутствії цитрат-іонів]. *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)

20. Cullity B.D., Weymouth J.W. Elements of X-Ray Diffraction. *Am. J. Phys.* 1957. Vol. 25. No. 6. Pp. 394–395. doi: 10.1063/1.3060306.

21. Singh G., Singh S., Prakash S. Surface characterization of plasma sprayed pure and reinforced hydroxyapatite coating on Ti6Al4V alloy. *Surf. Coat. Technol.* 2011. Vol. 205. No. 20. Pp. 4814–4820. doi: 10.1016/J.SURFCOAT.2011.04.064.

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 01.10.2020

Для цитирования:

Трубицын М.А., Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В. Влияние технотехимических параметров синтеза на физико-химические характеристики биомиметического кальций-фосфатного нанокompозита, допированного силикат- и карбонат-анионами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 10. С. 47–56. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-47-56

For citation:

Troubitsin M.A., Hoang Viet Hung, Furda L.V. Influence of synthesis techno-chemical parameters on physicochemical characteristics of biomimetic calcium-phosphate nanocomposite doped by silicate and carbonate anions. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.* 2020. No. 10. Pp. 47–56. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-47-56

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-57-62

Павленко З.В., *Бондаренко Н.И.*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: bondarenko-71@mail.ru*

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОЛЕМАНИТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭМАЛЕЙ ПО СТАЛИ

Аннотация. Соединения бора обладают комплексом различных свойств, которые определяют многообразие его применения. Основной областью потребления бора и его соединений является стекольная и керамическая промышленности. Более половины уходит на производство оптических стекол, кислото- и термически стойких изделий, теплоизолирующих стекловолокон, стекловидных покрытий, фарфора и т.д. В работе рассмотрена возможность использования колеманита для получения эмали по стали. Разработан оптимальный температурно-временной режим обжига для получения качественного покрытия и достижения необходимого эффекта. Установлено, что колеманитом можно частично заменить буру для покровной эмали. На основании проведенных исследований было установлено, что полученная экспериментальная эмаль более тугоплавкая, чем эмаль ЭСП-210. Установлен оптимальный температурный режим обжига для экспериментального покрытия – 950 °С, для покрытия ЭСП-210 – 825 °С. Для равномерного оплавления экспериментального покрытия необходима температура, превышающая температуру оплавления ЭСП-210 на 125 °С. Была проведена варка шихты, содержащая колеманит. Варка велась в электрической печи при температуре 1300 °С в течение 5 часов. Для дальнейшего исследования из экспериментальной эмали был приготовлен шликер и нанесён методом полива на пластины.

Ключевые слова: эмали, покрытие, колеманит, шликер, обжиг, фритта.

Введение. Нанесение покрытий, качество и характеристики которого играют немаловажную роль в получении изделия, является одним из распространенных способов декорирования [1–3]. Они позволяют придать особые эстетические свойства материалам, такие как художественная выразительность и целостность композиции [4–8].

Колеманит является ценным природным промышленным источником нерастворимого бора [9, 10] и борной кислоты, которые применяются в самых различных областях промышленности: химической, фармацевтической и др. [11, 12].

При введении колеманита ускоряются процессы силикато- и стеклообразования в шихте, существенно облегчается варка стёкол за счёт вовлечения в реакцию силикатообразования большего количества оксида бора, чем в шихте на основе борной кислоты. Образующиеся в ходе реакций боро- и алюмосиликаты кальция способствуют более быстрому переходу тугоплавких компонентов системы в расплав. Однако в процессе термообработки при температуре около 500 °С, шихта на основе колеманита увеличивается в объёме на 10–20 %, что вызвано дегидратацией $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot \text{H}_2\text{O}$. Это следует принимать во внимание при производственных варках кальций-алюмоборосиликатного стекла на основе колеманита [9, 10, 13–15].

Также при использовании колеманита сокращаются потери оксида бора при варке стёкол.

Большая его часть в процессе стекло- и силикатообразования находится в химически связанном состоянии: колеманит переходит в борат кальция, а затем в боросиликат кальция. Снижение летучести борного ангидрида позволит повысить качество продукции, уменьшить вредное воздействие B_2O_3 на экологию в целом.

Термостойкие керамические материалы обладают значительным водопоглощением. В настоящее время расширяется использование посудомоечных машин, поэтому стало важным получение материалов, обладающих плотной структурой, что обеспечит улучшение таких свойств изделий как прочность, термическая стойкость и др. [16].

С целью регулирования структурно-технологических факторов производства керамики в состав исходной шихты вводят различные добавки, способные образовывать жидкую фазу в области температур обжига. Преимущество на рынке отдается соединениям бора, которые способны плавиться при пониженных температурах, снижать вязкость и ТКЛР стеклофазы [16]. При этом материалы с их использованием обладают повышенной хим- и термостойкостью, а также механической прочностью [16].

Материалы и методы. Для исследований были использованы стеклоэмали марок ЭСГ-26 и ЭСП-210.

В качестве составных частей шликера для нанесения грунтовой эмали, помимо ЭСГ-26, применяли песок, буру и бентонитовую глину.

Для приготовления экспериментальной покровной эмали использовали песок Кормиловского месторождения, полевошпатовый концентрат, поташ, соду кальцинированную, буру и колеманит следующего химического состава (таблица 1).

Таблица 1

Химический состав колеманита

Химический состав, мас. %			
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	B ₂ O ₃
6,85	0,27	35,3	52,49

В качестве подложки использовали стальные пластины марки СТ-3. Стеклоэмали измельчали в фарфоровой ступке. Варка экспериментальной фритты производилась в электрической печи. Сушка и обжиг – в лабораторной муфельной печи СНОЛ-1,6.

Основная часть. Поверхность любого изделия всегда имеет достаточное количество загрязнений, которые влияют на силу сцепления эмали с металлом, а это, в свою очередь, ведёт к появлению дефектов на эмалевом покрытии. Для исследований использовали следующие методы подготовки поверхности образцов: механическое удаление ржавчины и загрязнений с помощью наждачной бумаги, обезжиривание с использованием ацетона.

Шликер наносили на зафиксированные и обработанные пластины методом полива по всей поверхности. Сушка эмали проходила в сушильном шкафу в течение 25 минут при температуре 150 °С. Чтобы избежать обогащения печной атмосферы парами воды, потому что это может повлиять на сцепление эмали с основой, была произведена тщательная сушка эмалевого покрытия.

Наиболее ответственной операцией эмалирования является обжиг грунтовой эмали, в результате чего происходит сцепление покрытия с металлической основой. Для производства эмали по стали проводили расчёт шихты следующего химического состава (табл. 2).

Таблица 2

Химический состав эмали

Химический состав, мас. %					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	B ₂ O ₃
49,0	10,5	7,0	17,0	2,5	14,0

Для определения количества сырьевых материалов в шихте составляли систему уравнений, которую решали с использованием программы Shichta. Для приготовления брикетов все сырьевые компоненты смешивали в нужных пропорциях и увлажняли.

Варка полученных образцов (рис. 1) проводилась в электрической печи с нагревом до 1300 °С в течение 5 часов, затем шла выдержка тиглей, которая длилась 2 часа. После выдержки

следовала студка образцов при комнатной температуре (рис. 2).



Рис. 1. Приготовленные брикеты



Рис. 2. Экспериментальная эмаль

С целью исследований экспериментальной покровной эмали и ЭСП-210, шликера из этих эмалей, наносили на пластины с грунтовой эмалью. Приготовление шликеров проходило путем измельчения в фарфоровой ступке и просеивания через сито 0071. Пропорции шликеров следующие: 100 % эмали, 10 % бентонитовой глины, 50 % воды. Шликер в керамическом сосуде подвергся «старению» в течение 24 часов. На зафиксированные пластины, покрытые грунтовой эмалью, шликер наносили методом полива по всей поверхности, излишки с поверхности удаляли методом разгона массы шликера относительно подложки динамическими воздействиями.

Для определения оптимального температурно-временного режима обжига покрытий, термообработка образцов велась в интервале температур от 825 до 950 °С с шагом 25, продолжительностью 5 мин. Получены следующие результаты по экспериментальной эмали (рисунок 3):

- при температуре 825 °С оплавления эмали не произошло;
- при температурах 850, 875, 900 и 925 °С покрытие оплавилось, но наблюдался недожог эмали;
- при температуре 950 °С получилось ровно оплавленное покрытие с хорошей силой сцепления.

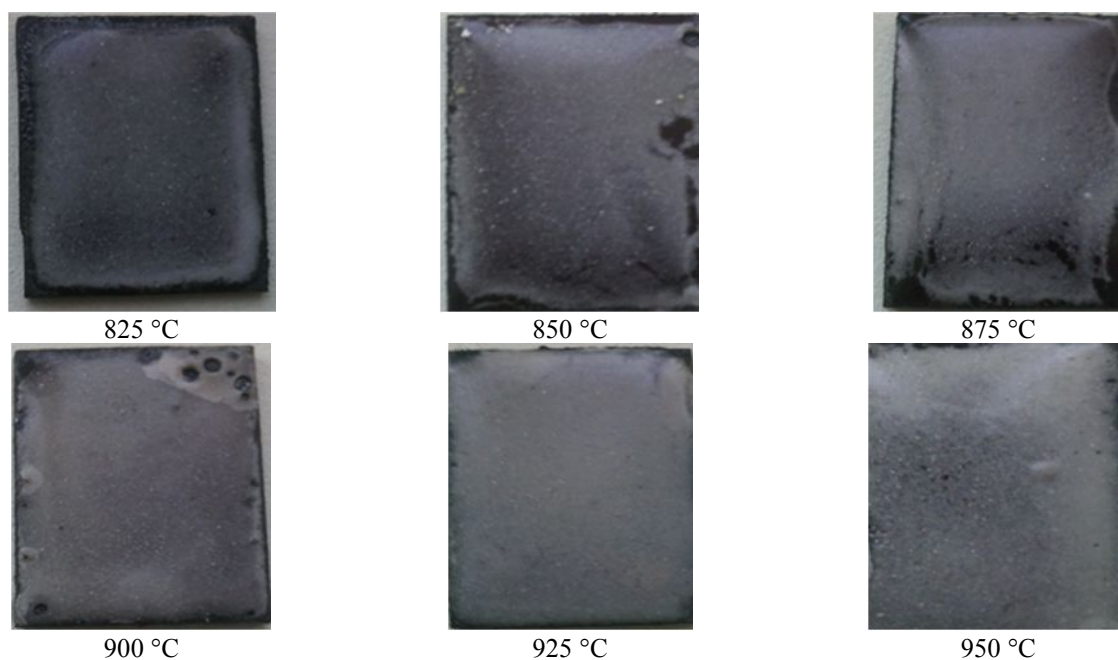


Рис. 3. Образцы после обжига, покрытые экспериментальной эмалью

Получены следующие результаты по эмали ЭСП-210 (рис. 4):

– при температуре 825 °С на образце, покрытом эмалью ЭСП-210, получили ровно оплавленное покрытие с хорошей силой сцепления;

– при температурах 850, 875, 900, 925 и 950 °С покрытие оплавилось, но наблюдался пережог эмали.

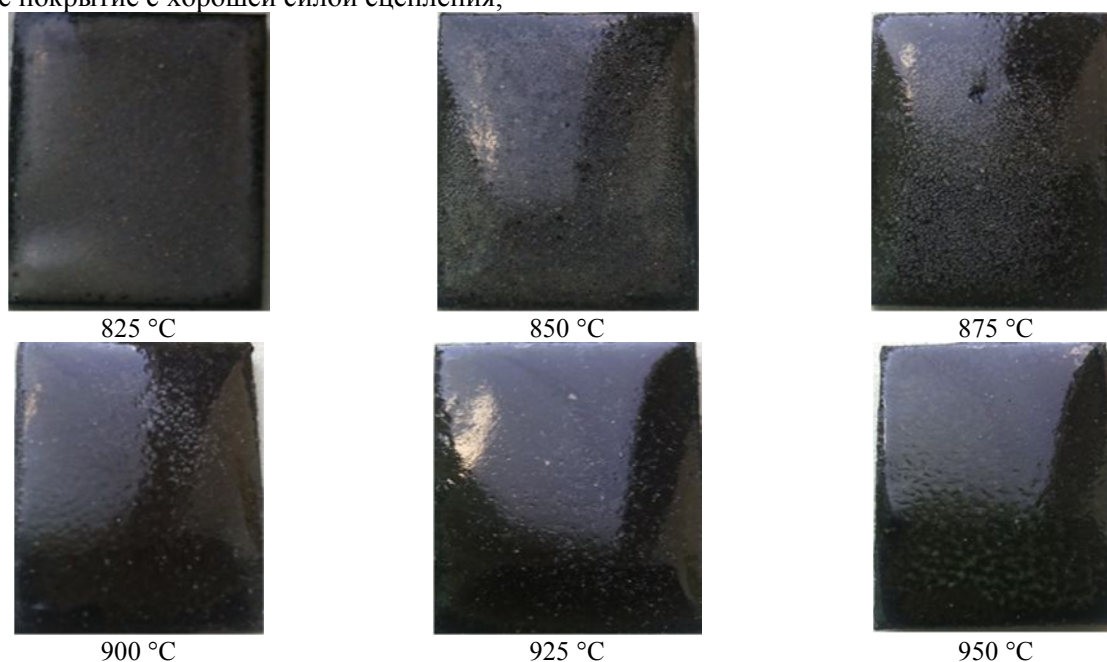


Рис. 4. Образцы после обжига, покрытые эмалью ЭСП-210

Выводы. В ходе эксперимента выявлено, что колеманитом можно частично заменить буру при приготовлении шликера для покровной эмали. Установлено, что полученная экспериментальная эмаль более тугоплавкая, чем эмаль ЭСП-210. Подобранные температурно-временные условия позволили установить, что оптимальной температурой обжига для экспериментального покрытия является 950 °С, а для эмали ЭСП-210 – 825 °С.

Источник финансирования. Программа развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова с использованием оборудования ЦВТ на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bessmertnyi V.S., Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Makarov A.V., Kochurin D.V., Chuev S.A., Izotova I.A. Energy- and resource-saving technology for obtaining decorative coatings on

sheet glass // *Glass and Ceramics*. 2020. Vol. 77. Issue 3–4. P. 154–156. DOI: 10.1007/s10717-020-00260-1.

2. Бондаренко Н.И., Бондаренко Д.О., Кочурин Д.В., Брагина Л.Л., Яловенко Т.А. Листовые строительные стёкла с защитно-декоративными покрытиями // *Строительные материалы и изделия*. 2019. Т. 2. № 1. С. 11–16. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-1-11-16.

3. Bondarenko D.O., Strokova V.V., Timoshenko T.I., Rozdol'skaya I.V. Plasma-chemical modification of facing composite material on the basis of hollow glass microspheres with decorative protective coating // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019. Vol. 10. Issue 2. P. 445–450. DOI: 10.1134/S2075113319020072.

4. Bondarenko D.O., Strokova V.V. Operating properties of the coating, depending on the composition during plasma-chemical modification // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 341. Article number 012141. DOI: 10.1088/1755-1315/341/1/012141.

5. Bondarenko D.O., Bondarenko N.I., Bessmertnyi V.S., Strokova V.V. Plasma-chemical modification of concrete // *Advances in Engineering Research*. 2018. Vol. 157. P. 105–110. DOI: 10.2991/aime-18.2018.21.

6. Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Valusikh K.A. Smalt based on the broken colored container glasses // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 95. P. 274–279. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6_41.

7. Zhernovaya N.F., Burchakova Y.V., Zhernovoi F.E., Miroshnikov E.V. Low-melting non-frit glazes for construction and artistic ceramics // *Glass and Ceramics*. 2013. Vol. 70. Issue 3–4. P. 104–106. DOI: 10.1007/s10717-013-9519-4.

8. Kovalchenko N.A., Pavlenko Z.V. Waste-bearing decorative glazes for facade ceramics // *Glass and Ceramics*. 2006. Vol. 63. Issue 1–2. P. 26–28. DOI: 10.1007/s10717-006-0027-7.

9. Жерновая Н.Ф., Дороганов Е.А., Бессмертный В.С., Дорохова Е.С., Жерновой Ф.Е.,

Здоренко Н.М., Изотова И.А. Стеклокерамический композит с мультифункциональной колеманитовой добавкой // *Перспективные материалы*. 2016. № 5. С. 51–58.

10. Dorokhova E.S., Zhernovoi F.E., Izotova I.A., Bessmertnyi V.S., Zhernovaya N.F., Tarasova E.E. Shrink-free face material based on cullet and colemanite // *Glass and Ceramics*. 2016. Vol. 73. Issue 3–4. P. 103–106. DOI: 10.1007/s10717-016-9835-6.

11. Жерновая Н.Ф., Скурятин Е.Ю., Онищук В.И., Затаковская Р.А. Априорная оценка эффективности и границ применимости колеманита как стекольного сырья // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 3. С. 70–75. DOI: 10.12737/24710.

12. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Жукова И.И. Модификация химического состава и повышение износостойкости полуфриттовой глазури напольной керамической плитки путем добавления плавящего корунда // *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2017. № 2. С. 83–94.

13. Dorokhova E.S., Zhernovaya N.F., Bessmertnyi V.S., Zhernovoi F.E., Tarasova E.E. Control of the structure of porous glass-ceramic material // *Glass and Ceramics*. 2017. Vol. 74. Issue 3–4. P. 95–98. DOI: 10.1007/s10717-017-9936-x.

14. Жерновая Н.Ф., Дороганов Е.А., Жерновой Ф.Е., Степина И.Н. Исследование материалов, полученных спеканием в системе «глина – стеклобой» // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2013. № 1. С. 20–23.

15. Onishchuk V.I., Zhernovaya N.F., Skuryatina E.Y., Marieva A.V. Glass formation in the materials system quartz sand – colemanite – soda // *Glass and Ceramics*. 2019. Vol. 75. Issue 9–10. P. 335–339. DOI: 10.1007/s10717-019-00081-x.

16. Кичкайло О.В., Левицкий И.А. Влияние борсодержащих добавок на свойства литиевой термостойкой керамики // *Труды БГТУ*. № 3. Химия и технология неорганических веществ. 2010. Т. 1. № 3. С. 74–79.

Информация об авторах

Павленко Зоя Владимировна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: belpavlenko@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

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

Поступила 13.10.2020 г.

© Павленко З.В., Бондаренко Н.И., 2020

Pavlenko Z.V., *Bondarenko N.I.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: bondarenko-71@mail.ru

STUDYING THE POSSIBILITY OF USING COLEMANIT TO OBTAIN ENAMELS ON STEEL

Abstract. The practical use of boron and its compounds is extremely diverse due to its different properties. About 55 % of boron raw materials are consumed by the glass and ceramic industries for the manufacture of optical glasses, heat-insulating glass fibers, acid-resistant and refractory products, enamels, glazes, porcelain, etc. The paper considers the possibility of using colemanite to obtain enamel over steel. The optimal temperature-time regime of firing has been developed to obtain a high-quality coating and achieve the desired effect. It has been established that colemanite can partially replace cover enamel drill. On the basis of the studies carried out, it was found that the obtained experimental enamel is more refractory than the ESP-210 enamel. The optimal firing temperature for the experimental coating was established – 950 ° C, for the ESP-210 coating – 825 ° C. For uniform reflow of the experimental coating, a temperature is required that exceeds the reflow temperature of ESP-210 by 125 ° C. Colemanite-containing batch was cooked. Cooking was carried out in an electric oven at 1300 ° C for 5 hours. For further research, a slip was prepared from the experimental enamel and applied by pouring onto the plates.

Keywords: enamels, coating, colemanite, slip, firing, frit.

REFERENCES

1. Bessmertnyi V.S., Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Makarov A.V., Kochurin D.V., Chuev S.A., Izotova I.A. Energy- and resource-saving technology for obtaining decorative coatings on sheet glass. *Glass and Ceramics*. 2020. Vol. 77. No. 3–4. Pp. 154–156. doi: 10.1007/s10717-020-00260-1.
2. Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Kochurin D.V., Bragina L.L., Yakovenko T.A. Sheet construction glass with protective and decorative coatings [Listovyye stroitel'nyye stakla s zashchitno-dekorativnymi pokrytiyami]. *Construction Materials and Products*. 2019. Vol. 2. No. 1. Pp. 11–16. doi: 10.34031/2618-7183-2019-2-1-11-16. (rus)
3. Bondarenko D.O., Strokova V.V., Timoshenko T.I., Rozdol'skaya I.V. Plasma-chemical modification of facing composite material on the basis of hollow glass microspheres with decorative protective coating. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019. Vol. 10. No. 2. Pp. 445–450. doi: 10.1134/S2075113319020072.
4. Bondarenko D.O., Strokova V.V. Operating properties of the coating, depending on the composition during plasma-chemical modification. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 341. Article number 012141. doi: 10.1088/1755-1315/341/1/012141.
5. Bondarenko D.O., Bondarenko N.I., Bessmertnyi V.S., Strokova V.V. Plasma-chemical modification of concrete. *Advances in Engineering Research*. 2018. Vol. 157. Pp. 105–110. doi: 10.2991/aime-18.2018.21.
6. Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Valusikh K.A. Smalt based on the broken colored container glasses. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 95. Pp. 274–279. doi: 10.1007/978-3-030-54652-6_41.
7. Zhernovaya N.F., Burchakova Y.V., Zhernovoi F.E., Miroshnikov E.V. Low-melting non-frit glazes for construction and artistic ceramics. *Glass and Ceramics*. 2013. Vol. 70. No. 3–4. Pp. 104–106. doi: 10.1007/s10717-013-9519-4.
8. Kovalchenko N.A., Pavlenko Z.V. Waste-bearing decorative glazes for facade ceramics. *Glass and Ceramics*. 2006. Vol. 63. No. 1–2. Pp. 26–28. doi: 10.1007/s10717-006-0027-7.
9. Zhernovaya N.F., Doroganov E.A., Bessmertnyy V.S., Dorokhova E.S., Zhernovoy F.E., Zdorenko N.M., Izotova I.A. Glassceramic composite with multifunctional colemanite additive [Steklokeramicheskiy kompozit s mul'tifunktsional'noy kolemanitovoy dobavkoy]. *Perspektivnye Materialy*. 2016. No. 5. Pp. 51–58. (rus)
10. Dorokhova E.S., Zhernovoi F.E., Izotova I.A., Bessmertnyi V.S., Zhernovaya N.F., Tarasova E.E. Shrink-free face material based on cullet and colemanite. *Glass and Ceramics*. 2016. Vol. 73. No. 3–4. Pp. 103–106. doi: 10.1007/s10717-016-9835-6.
11. Zhernovaya N.F., Skuryatina E.Y., Onischuk V.I., Zatakovaya R.A. Apriori assessment of the effectiveness and limits of applicability of colemanite as glass raw materials [Apriornaya otsenka effektivnosti i granits primenimosti kolemanita kak stekol'nogo syr'ya]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 3. Pp. 70–75. doi: 10.12737/24710. (rus)
12. Anufrik S.S., Kurian N.N., Znosko C.F., Zhukova I.I. Modification of the chemical structure and the wear-resistance improvement of semifritted glaze of floor ceramic tiles by addition of fused corundum [Modifikatsiya khimicheskogo povysheniya i povysheniye iznosostoykosti polufritrovoy glazuri

napol'noy keramicheskoy plitki putem dobavleniya plavlenogo korunda]. Journal of the Belarusian State University. Physics. 2017. No. 2. Pp. 83–94.

13. Skuryatina E.Y., Onischuk V.I., Zhernovaya N.F., Zatkovaya R.A. Feasibility study on use of colemanite in the technology of float glass [Issledovaniye vozmozhnosti ispol'zovaniya kolemanita v tekhnologii listovogo stekla]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 12. Pp. 200–205. DOI: 10.12737/22804. (rus)

14. Dorokhova E.S., Zhernovaya N.F., Bessmertnyi V.S., Zhernovoi F.E., Tarasova E.E. Control of the structure of porous glass-ceramic material. Glass and Ceramics. 2017. Vol. 74. No. 3–4. Pp. 95–98. doi: 10.1007/s10717-017-9936-x.

15. Zhernovaya N.F., Doroganov E.A., Zhernovoy F.E., Stepina I.N. Materials study, obtained by

sintering in the system of «clay – glass» [Issledovaniye materialov, poluchennykh spekaniyem v sisteme «glina – stekloboy»]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No. 1. Pp. 20–23.

16. Onishchuk V.I., Zhernovaya N.F., Skuryatina E.Y., Marieva A.V. Glass formation in the materials system quartz sand – colemanite – soda. Glass and Ceramics. 2019. Vol. 75. No. 9–10. Pp. 335–339. doi: 10.1007/s10717-019-00081-x.

17. Kichkailo O.V., Levitsky I.A. Influence of boron-containing additives on the properties of lithium heat-resistant ceramics [Vliyaniye borsoderzhashchikh dobavok na svoystva litiyevoy termostoykoy keramiki]. Trudy BGTU. No. 3. Khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv. 2010. Vol. 1. No. 3. Pp. 74–79. (rus)

Information about the authors

Pavlenko, Zoya V. PhD, Assistant professor. E-mail: belpavlenko@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Bondarenko, Nadezhda I. PhD. E-mail: bondarenko-71@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 13.10.2020

Для цитирования:

Павленко З.В., Бондаренко Н.И. Изучение возможности использования колеманита для получения эмалей по стали // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 10. С. 57–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-57-62

For citation:

Pavlenko Z.V., Bondarenko N.I. Studying the possibility of using colemanite to obtain enamels on steel. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 10. Pp. 57–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-57-62

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-63-71

*Вирабян Л.Г., Демин В.Д.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: rl_bgtu@intbel.ru

ПОСТРОЕНИЕ МУЛЬТИРОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО СОБЫТИЙНОГО «СУПЕР-ТВИСТ» УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. В данной статье представлена разработка “Супер-Твист” контроллера, основанного на стохастических событиях для решения проблемы управления построением в сетевой много-агентной системе при наличии внешнего возмущения. Стохастичность в системе вводится случайностью сетевых неопределенностей, то есть потерь и задержек пакетов данных. Предлагаемая структура контроллера состоит из двух частей. Первая часть выводит условие запуска события для обновлений входных управляющих данных каждого агента в системе. Вторая часть гарантирует желаемое построение за конечное время путем определения верхнего предела времени достижения заданной поверхности скольжения каждого агента. Предложенная стохастическая структура была протестирована на мобильных роботах. Результаты показывают тройную эффективность стохастической структуры. Они: а) сохраняют преимущества стратегии запуска событий, б) сохраняют преимущества контроллера скользящего “Супер-Твист” режима, в) устойчивы к сетевым неопределенностям.

Ключевые слова: стохастический, потеря пакетов, задержка, событие-триггер, скользящая поверхность, стабильность.

Введение. Консенсус в мультироботизированной системе (МС) привлек большое внимание исследователей в разных областях из-за её применения в различных областях. Подход, основанный на событиях, является эффективным решением для задачи управления МС. К настоящему времени выполнено несколько работ по событийному управлению МС на основе неориентированной топологии [1], коммутационной топологии [2], последовательно связной топологии [3], направленной топологии [4]. Различные схемы управления на основе событий, относящиеся к консенсусу в МС, включают протокол консенсуса [1], кооперативное управление [5], адаптивное управление [6], децентрализованное управление [2], пиннинг-управление (pinning-управление) [7], управление на основе выборочных данных [4], распределенное управление [8] и так далее. Для всех вышеперечисленных работ требуется идеальная связь между агентами, что не всегда возможно в режиме реального времени. Обмен информацией между агентами может быть подвержен сетевым неопределенностям. Методы управления, запускаемые событиями, позволяют обрабатывать сетевые неопределенности индивидуально [9], или одновременно несколькими агентами [10]. Результаты в [9] основаны только на предположении, что задержки в сети передачи короче временных интервалов между каждым

набором триггеров событий. На практике это может быть нереально.

Управление скользящим режимом (SMC) улучшает работу системы при наличии неопределенностей. Это хорошо известный надежный и эффективный метод регулирования. SMC второго порядка (SOSMC) и SMC высшего порядка (HOSMC) очень эффективно выполняют эту задачу. Одним из таких контроллеров является «Супер-твист» SMC (STSMC) [11]. Подходы к построению, инициируемые событиями, основанные на консенсусе, для МС первого порядка, подверженного возмущениям, с использованием обычных SMC и интегральных SMC были предложены в [12]. Обе эти работы рассматривали только возмущения. Для обработки изменяющихся во времени задержек и структурных неопределенностей в системе, Вонг и др. [13] предложили интегральный SMC с синхронизацией по времени. Ю и др. [14] предложили управление по событию для многоагентных систем «лидер-последователь» с проблемой потери пакетов и изменяющихся во времени задержек на основе информации о соседях второго порядка с использованием распределенного контроллера динамического отслеживания на основе наблюдателя. Задача событийного управления стохастическими нелинейными системами с запаздыванием экзогенных возмущений и событийный контроллер с

обратной связью исследованы в [15]. Новая проблема ∞ управления для стохастической системы с дискретным временем и событийной схемой при наличии потерь пакетов решается в [16]. Сейчас хорошо известно, что в результате конечной частоты дискретизации в системах с дискретным временем траектории состояний не могли оставаться на заранее спроектированной идеальной поверхности скольжения. Вместо этого траектории оставались бы в пограничном слое вокруг заданной поверхности скольжения, называемой полосой квази-скольжения [17]. Та и Ха [18] предложили SMC с дискретным временем для линейной системы с задержкой по времени и помехами детерминированным образом. В [19] рассматривается надежный SMC для дискретной стохастической системы со смешанными временными задержками, неопределенностями и нелинейностью. В [20] было разработано надежное управление в дискретном скользящем режиме (DSMC) для стабилизации сетевой системы с изменяющейся во времени задержкой связи. Ху и др. [21] исследовали проблему робастного SMC для смешанной задержки и потерь пакетов при неопределенной вероятности пропуска. SMC, запускаемый по событию, на основе наблюдателя и SMC с обратной связью по событию, рассматриваются для модели системы с дискретным временем в [22]. Эти методы существенно развиты в данной статье для управления мультироботизированной системой, рассмотренной в [23].

Разработка математической модели. Неголономные мобильные роботы в рамках мультироботизированной системы движутся в плоскости X-Y. Каждый агент в группе имеет одинаковый строй и динамику. Кинематическая модель агента i на рис. 1 аналогична [24] и задана формулой

$$\dot{x}_i = v_i \cos(\theta_i), \dot{y}_i = v_i \sin(\theta_i), \dot{\theta}_i = \omega_i \quad (1)$$

где $\bar{x}_i = [\bar{x}_i \bar{y}_i]^T$ и θ_i представляют вектор положения и угол поворота соответственно, v_i и ω_i - линейная и угловая скорости соответственно.



Рис. 1. Схема модели робота

Внеосевая точка Q считается рабочей точкой

для робота i . Кинематическая модель (1) сначала преобразуется в форму с одним интегратором. Внеосевая точка расположена в точке (x_i, y_i) , где $x_i = \bar{x}_i + l \cos(\theta_i)$ и $y_i = \bar{y}_i + l \sin(\theta_i)$ с расстоянием l между центром тяжести (c) и Q. Динамика агента на основе внеосевой точки определяется выражением

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= v_i \cos \theta_i - l \omega_i \sin \theta_i \\ \dot{y}_i &= v_i \sin \theta_i + l \omega_i \cos \theta_i \end{aligned} \quad (2)$$

Линейная и угловая скорости определяются как

$$\begin{aligned} v_i &= u_{ix} \cos \theta_i + u_{iy} \sin \theta_i \\ \omega_i &= (-\frac{1}{l})(u_{ix} \sin \theta_i - u_{iy} \cos \theta_i) \end{aligned} \quad (3)$$

где $u_i = [u_{ix} u_{iy}]^T$ - управляющий входной вектор, генерирующий эти скорости. Используя (3), (2) можно упростить как

$$\dot{x}_i = u_{ix}, \dot{y}_i = u_{iy} \quad (4)$$

На движение робота влияют внешние возмущения (d_{ix}, d_{iy}) . Следовательно, динамика (4) после учета возмущения принимает вид

$$\dot{x}_i = u_{ix} + d_{ix}, \dot{y}_i = u_{iy} + d_{iy} \quad (5)$$

Динамику (5) можно компактно записать в виде модели с одним интегратором как

$$\dot{x}_i = u_i + d_i \quad (6)$$

где $x_i = [x_i, y_i]^T$ и $d_i = [d_{ix}, d_{iy}]^T$ представляют вектор положения и сосредоточенную неопределенность для внешних возмущений и немоделированной динамики соответственно.

Распределенная структура MC рассматривается для роботов в качестве агентов. Эти агенты имеют динамику с одним интегратором. Они могут взаимодействовать и передавать данные друг другу. Предполагается, что топология связи между ними - ориентированный и взвешенный граф, лишенный петель, $G = (V, E, A)$. V, E и A - это набор узлов, набор ребер и матрица смежности соответственно. a_{ij} - это компонента A , имеющая значение 1, если $(V_i, V_j) \in E$, в противном случае - 0. L и B - матрица лапласовской и взвешенной связи между лидером и последователями соответственно.

Обозначения: Для любого вектора $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n]^T$, а) $\text{sgn}(\varepsilon) = [\text{sgn}(\varepsilon_1), \text{sgn}(\varepsilon_2), \dots, \text{sgn}(\varepsilon_n)]^T$, б) $|\varepsilon|^\eta = [|\varepsilon_1|^\eta, \dots, |\varepsilon_n|^\eta]^T$, и в) $|\varepsilon|^\eta \text{sgn}(\varepsilon) = [|\varepsilon_1|^\eta \text{sgn}(\varepsilon_1), \dots, |\varepsilon_n|^\eta \text{sgn}(\varepsilon_n)]^T$, где параметр $\eta \in R$. В статье используется норма, которая определяется как $\|\varepsilon\| = \sqrt{\varepsilon^T \varepsilon}$.

Системная динамика и управление. Динамика ведущего и ведомого роботов, подвержен-

ных сетевой неопределенности и внешним возмущениям в рамках МС определяются как

$$\begin{aligned} \text{Последователь: } \dot{x}_i(t) &= \rho_i^u u_i(t - \delta_i^u) + d_i(t), i = 1 \dots p \\ \text{Лидер: } \dot{x}_0(t) &= \rho_0^u u_0(t - \delta_0^u) \end{aligned} \quad (7)$$

где $x_i(t) \in R^n, u_i(t) \in R^n$ и $d_i(t) \in R^n$ представляют положение, управляющий вход и вход ограниченного возмущения соответственно для i -го ведомого робота, $x_0(t) \in R^n$ и $u_0(t) \in R^n$ – вектор положения и управляющий вход соответственно робота-лидера, ρ_i^u и ρ_0^u – случайные коэффициенты потери пакетов для управляющего входа ведомого и ведущего роботов соответственно, δ_i^u и δ_0^u – случайные задержки ведомого

и ведущего робота соответственно. Аналогично ρ_i^x и ρ_0^x являются коэффициентами случайной потери пакетов, а δ_i^x и δ_0^x – это случайные задержки состояний ведомого и ведущего роботов соответственно.

Простая дискретная форма динамики лидер-последователь (7) имеет вид

$$\begin{aligned} \text{Последователь: } x_i(k+1) &= x_{i(\delta_i, \rho_i)}(k) + \Delta T u_i(k) + d_i(k) \\ \text{Лидер: } x_0(k+1) &= x_{0(\delta_0, \rho_0)}(k) + \Delta T u_0(k) \end{aligned} \quad (8)$$

где состояния $x_{i(\delta_i, \rho_i)}$ и $x_{0(\delta_0, \rho_0)}$ являются резуль-

татами их предыдущих состояний и входных данных управления. Они представлены как

$$\begin{aligned} x_{i(\delta_i, \rho_i)}(k) &= \{\rho_i^x x_i(k), \rho_i^x x_i(k-1), \dots, \rho_i^x x_i(k - \delta_i^x), \rho_i^u u_i(k-1), \rho_i^u u_i(k-2), \dots, \rho_i^u u_i(k - \delta_i^u)\} \\ x_{0(\delta_0, \rho_0)}(k) &= \{\rho_0^x x_0(k), \rho_0^x x_0(k-1), \dots, \rho_0^x x_0(k - \delta_0^x), \rho_0^u u_0(k-1), \rho_0^u u_0(k-2), \dots, \rho_0^u u_0(k - \delta_0^u)\} \end{aligned} \quad (9)$$

Ниже приводится определение стохастической модели для (8) с учетом ожидаемого значения состояний из-за сетевых неопределенностей.

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{x_{i,k+1}\} &= \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{x_{i,k}\} + \Delta T u_{i,k} + d_{i,k} \\ \mathcal{E}_{\delta_0, \rho_0} \{x_{0,k+1}\} &= \mathcal{E}_{\delta_0, \rho_0} \{x_{0,k}\} + \Delta T u_{0,k} \end{aligned} \quad (10)$$

где $\mathcal{E}\{x_{i,k}\}$ представляет ожидаемое значение x_i , ΔT – интервал выборки системы. Пусть $\mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{\tilde{x}_{i,k}\} = \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{x_{i,k}\} - \mathcal{E}_{\delta_0, \rho_0} \{x_{0,k}\} + \Gamma_i$ и $\tilde{u}_{i,k} = u_{i,k} - u_{0,k}$ – отклонение в позиции и вход управления робота-последователя от робота-ли-

дера, Γ_i – желаемое отклонение позиции ведомого от лидера. Относительную динамику с использованием (10) можно записать как

$$\mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{\tilde{x}_{i,k+1}\} = \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{\tilde{x}_{i,k}\} + \Delta T \tilde{u}_{i,k} + d_{i,k} \quad (11)$$

Следующая поверхность скользящего режима определена для ведомого агента i в структуре МС.

$$S_{i,k} = \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{\tilde{x}_{i,k}\} - \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{q_{i,k}^a\}, i = 1 \dots n \quad (12)$$

где $S_{i,k} = [s_{1,k}, s_{2,k} \dots s_{n,k}]^T$. С началом фазы скольжения $S_{i,k} = 0$. Для достижения желаемого консенсуса мы рассмотрели закон управления сверхкручением, приведенный ниже

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{i,k} &= \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{q_{i,k}^a\} - K_1 \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \left\{ |S_{i,k}|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(S_{i,k}) \right\} + \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{e_{i,k}\} \\ \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{e_{i,k+1}\} &= \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{e_{i,k}\} - \Delta T K_2 \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{\text{sgn}(S_{i,k})\} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{где } \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{q_{i,k}\} &\approx -\frac{\gamma_i}{p_i+1} \sum_{j \in p} a_{ij} \left\{ \left(\mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{x_{i,k}\} - \mathcal{E}_{\delta_0, \rho_0} \{x_{0,k}\} + \Gamma_i \right) - \left(\mathcal{E}_{\delta_j, \rho_j} \{x_{j,k}\} - \mathcal{E}_{\delta_0, \rho_0} \{x_{0,k}\} + \Gamma_j \right) \right\} + \\ b_i \left(\mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{x_{i,k}\} - \mathcal{E}_{\delta_0, \rho_0} \{x_{0,k}\} + \Gamma_i \right) &= -\frac{\gamma_i}{p_i+1} \sum_{j \in p} a_{ij} \left(\mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{\tilde{x}_{i,k}\} - \mathcal{E}_{\delta_j, \rho_j} \{\tilde{x}_{j,k}\} \right) + b_i \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{\tilde{x}_{i,k}\} \end{aligned} \quad (14)$$

q_i – консенсусный компонент, определенный на основе ошибки отслеживания i -го ведомого и соседних агентов.

В (14) $\gamma_i > 0, \alpha \in (0,1)$ и $p_i (1 \leq p_i < p)$ –

количество агентов, соседних с i -м членом. Матрицы усиления $K_1 = \text{diag}\{k_{11}, k_{12}, \dots, k_{1n}\}$ и $K_2 = \text{diag}\{k_{21}, k_{22}, \dots, k_{2n}\}$ и с каждым из их элементов – положительные выигрыши.

Экспериментальные исследования. Эксперименты в реальном времени проводились с использованием трех мобильных роботов. Они оснащены датчиком сонара и датчиком положения.

Коммуникационный оргграф G показан на рис. 2. Предполагается, что вес коммуникации между агентами равен 1. Консенсусные параметры графа: $L = [0 \ 0; -1 \ 1]$ и $B = [1 \ 0; 0 \ 1]$.

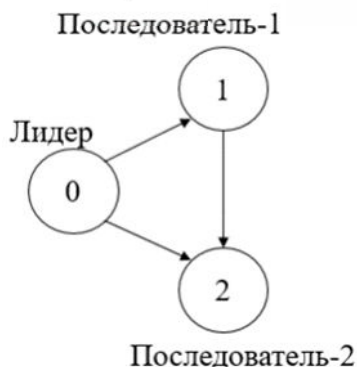


Рис. 2. Оргграф МС для трех роботов

Робот-лидер может свободно перемещаться в любом направлении. Для достижения консенсуса при построении последователи должны следовать траектории лидера.

Начальная позиция лидера $x_0 = [0; 0]$, тогда как последователи изначально находятся в $x_1 = [-2; 0,5]$ и $x_2 = [-2; -0,5]$. Параметры системы следующие: $l = 0,21 \text{ m}$, $K_1 = \text{diag}\{21, 21\}$, $K_2 = \text{diag}\{7, 7\}$, $\Gamma_1 = (0,75 \text{ m}, -0,75 \text{ m})$, $\Gamma_2 = (0,75 \text{ m}, 0,75 \text{ m})$, а $\alpha = 5/7$. Время выборки, учитываемое для экспериментов, составляет 0,01 с. Значение границы помехи Ω равно 1. Данные, передаваемые от роботов, подвержены задержкам и потерям пакетов. Во время реализации, предположим, что изменяющаяся во времени задержка δ_i^x удовлетворяет условию $0 \leq \delta_i^x \leq 2$. Потери пакетов смоделированы с использованием распределения Бернулли с вероятностью $p = 0,15$.

Анализ без потерь пакетов и задержек показан на рис. 3–4. Траектории лидера и ведомого показаны на рис. 3а, а относительное расстояние показано на рис. 3б. Из рисунков видно, что расстояние между агентами остается неизменным с течением времени. Это означает, что агенты могут достичь желаемого построения за конечное время. Линейная (v) и угловая (ω) скорости показаны на рис. 4.

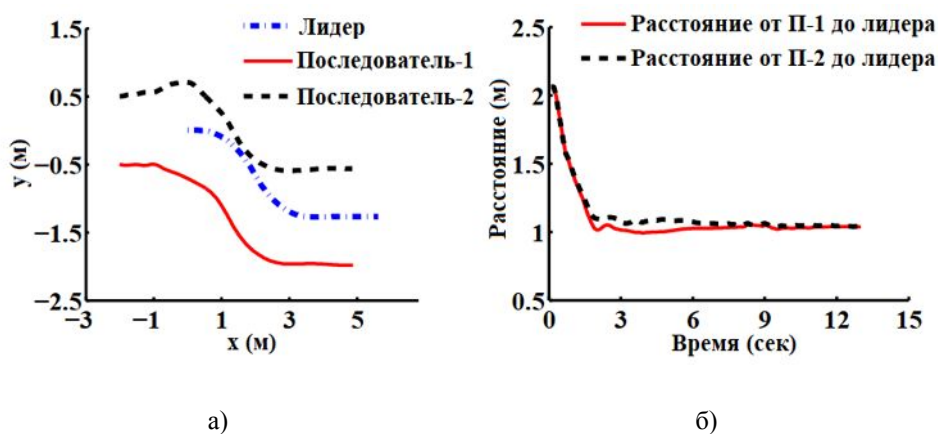


Рис. 3. (а) Траектория роботов во время желаемого построения и (б) Относительное расстояние последователей от лидера

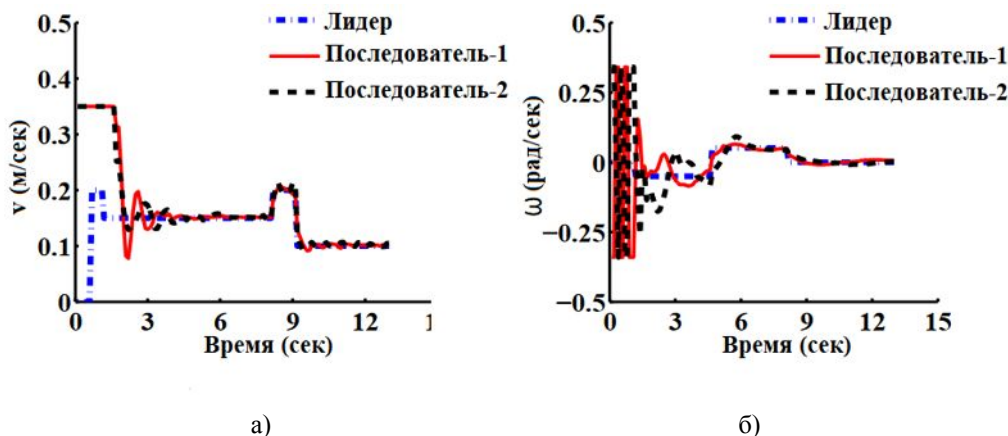


Рис. 4. (а) Линейная скорость и (б) Угловая скорость роботов

Устойчивость предложенного подхода была проверена для случая, когда учитываются потери пакетов и задержки для входных данных состояния и управления ведущего и ведомого роботов. Рис. 7 гарантирует построение даже при наличии

сетевых неопределенностей. Их влияние может быть визуализировано с помощью графиков линейной и угловой скоростей на рис. 7. Скорости робота изменяются, когда происходят потери пакетов, задержки или то, и другое.

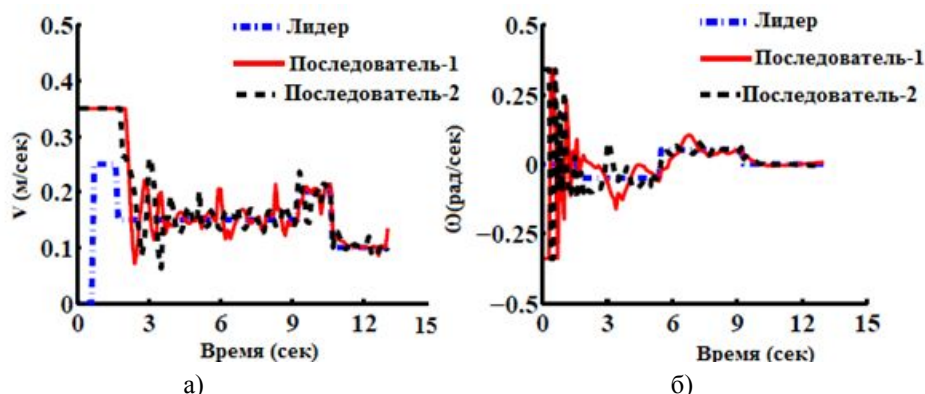


Рис. 5. а) линейная скорость и б) угловая скорость роботов

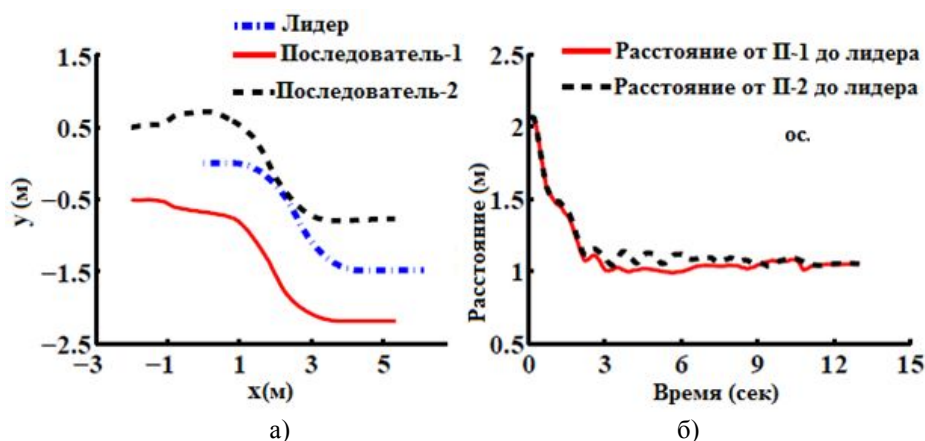


Рис. 6. а) траектория роботов во время желаемого построения и б) относительное расстояние ведомых роботов от ведущего робота.

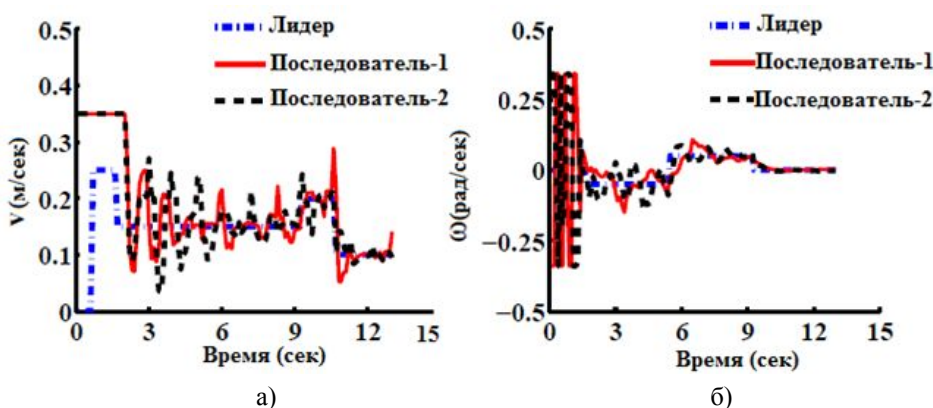


Рис. 7. а) линейная скорость и б) угловая скорость роботов.

Приведенные выше эксперименты подтверждают эффективность предложенного подхода. Консенсус достигается примерно за 3–4 секунды. Предлагаемый подход является достойным выбором для решения проблемы построения на основе консенсуса при наличии помех и сетевых неопределенностей, то есть потерь пакетов и задержек.

Выводы. В этой статье разработано STSMC управление, запускаемое стохастическими событиями, с конечным временем для достижения консенсусного построения для МС при наличии сетевых неопределенностей (потеря и задержка пакетов) и внешних возмущений. Поверхность

скольжения с дискретным временем была разработана для получения условия запуска события для каждого агента. Закон управления на основе событий, устойчивый к сетевым неопределенностям и возмущениям, гарантирует временную стабильность каждого агента во время желаемого построения. Критерии допустимости, удовлетворяемые обновлением управления каждым агентом, позволяют избежать эффекта Зенона во время построения. Эксперименты в реальном времени с использованием трех роботов для желаемого построения подтверждают теоретические разработки, изложенные в статье. Полученные результаты подтверждают, что эффективность предлагаемого подхода не уступает традиционным подходам, запускаемым по времени, и лучше, чем другие существующие подходы, основанные на событиях. Меньшее количество событий значительно уменьшает количество обновлений управления, что еще больше снижает действия исполнительного механизма, необходимые для достижения построения на основе консенсуса. Это обеспечивает экономию вычислительных и коммуникационных ресурсов, доступных во время работы.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и ДНТ в рамках научного проекта № 18-57-45014 ИИД а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhu Y., Guan X., Luo X., Li S. Finite-Time Consensus of Multi-Agent System via Nonlinear Event-Triggered Control Strategy // IET Control Theory Applications. 2015. Vol. 9. No. 17. Pp. 2548–2552.
2. Cheng T.-H., Kan Z., Klotz J. R., Shea J. M., Dixon W. E. Event-Triggered Control of Multiagent Systems for Fixed and Time-Varying Network Topologies // IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. Vol. 62. No. 10, Pp. 5365–5371.
3. Cui Y., Liu Y., Zhang W., Alsaadi F. E. Event-Based Consensus for a Class of Nonlinear Multi-Agent Systems With Sequentially Connected Topology // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2018. Vol. 65. No. 10. Pp. 3506–3518.
4. Peng C., Zhang J., Han Q.-L. Consensus of Multiagent Systems With Nonlinear Dynamics Using an Integrated Sampled-Data-Based Event-Triggered Communication Scheme // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2019. Vol. 49. No. 3. Pp. 589–599.
5. Chen X., Hao F., Ma B. Periodic event-triggered cooperative control of multiple non-holonomic wheeled mobile robots // IET Control Theory Applications. 2017. Vol. 11. No. 6. Pp. 890–899.
6. Qian Y.-Y., Liu L., Feng G. Output Consensus of Heterogeneous Linear Multi-Agent Systems with Adaptive Event-Triggered Control // IEEE Transactions on Automatic Control. 2018. Vol. 64. No. 6. Pp. 2606–2613.
7. Adaldo A., Alderisio F., Liuzza D., Shi G., Dimarogonas D. V., Di Bernardo M., Johansson K. H. Event-Triggered Pinning Control of Switching Networks // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2015. Vol. 2. No. 2. Pp. 204–213.
8. Du C., Liu X., Ren W., Lu P., Liu H. Finite-Time Consensus for Linear Multi-Agent Systems via Event-Triggered Strategy // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2019. Vol. 35. No. 3. Pp. 1338–1350.
9. Dolk V., Borghers D.P., Heemels W. Output-Based and Decentralized Dynamic Event-Triggered Control With Guaranteed Lp-Gain Performance and Zeno-Freeness // IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. Vol. 62. No. 1. Pp. 34–49.
10. Dolk V., Heemels M. Event-triggered control systems under packet losses // Automatica. 2017. Vol. 80. Pp. 143–155.
11. Кешткар С., Позняк А. С., Хернандес Э., Оропеса А. Адаптивный регулятор на скользящих режимах, основанный на “Супер-Твист” наблюдателе состояний с применением к регулированию платформы Стюарта // Автоматика и телемеханика. 2017. № 7. С. 57–75.
12. Sinha A., Mishra R. K. Consensus in First Order Nonlinear Heterogeneous Multi-Agent Systems with Event-Based Sliding Mode Control // International Journal of Control. 2018. Pp. 1–14.
13. Wang S.-G., Bai L., Chen M. Robust sliding mode control of general time-varying delay stochastic systems with structural uncertainties // Control Theory and Technology. 2014. Vol. 12. No. 4. Pp. 357–367.
14. Yu M., Yan C., Xie D., Xie G. Event-triggered Tracking Consensus with Packet Losses and Time-varying Delays // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. 2016. Vol. 3. No. 2. Pp. 165–173.
15. Zhu Q. Stabilization of Stochastic Nonlinear Delay Systems With Exogenous Disturbances and the Event-Triggered Feedback Control // IEEE Transactions on Automatic Control. 2018. Vol. 64. No. 9. Pp. 3764–3771.
16. Hu Z., Shi P., Zhang J., Deng F. Control of Discrete-Time Stochastic Systems With Packet Loss by Event-Triggered Approach // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2018. Pp. 1–10.
17. Gao W., Wang Y., Homaifa A. Discrete-Time Variable Structure Control Systems // IEEE

Transactions on Industrial Electronics. 1995. Vol. 42. No. 2. Pp. 117–122.

18. That N. D., Ha Q. P. Discrete-time sliding mode control with state bounding for linear systems with time-varying delay and unmatched disturbances // IET Control Theory Applications. 2015. Vol. 9. No. 11. Pp. 1700–1708.

19. Hu J., Wang Z., Gao H., Stergioulas L. K. Robust Sliding Mode Control for Discrete Stochastic Systems With Mixed Time Delays, Randomly Occurring Uncertainties, and Randomly Occurring Nonlinearities // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2012. Vol. 59. No. 7. Pp. 3008–3015.

20. Argha A., Li L., Su S. W., Nguyen H. Discrete-time sliding mode control for networked systems with random communication delays // American Control Conference. 2015. Pp. 6016–6021.

21. Hu J., Zhang H., Yu X., Liu H., Chen D., Design of Sliding-Mode-Based Control for Nonlinear

Systems With Mixed-Delays and Packet Losses Under Uncertain Missing Probability // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2019. Pp. 1–12.

22. Yao D., Zhang B., Li P., Li H. Event-Triggered Sliding Mode Control of Discrete-Time Markov Jump Systems // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2018. Vol. 49. No. 10. Pp. 2016–2015.

23. Рыбак Л.А., Бехера Л., Малышев Д.И., Виравян Л.Г. Аппроксимация рабочей области манипуляторов параллельной и последовательной структуры в составе мультироботизированной системы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 8. С. 121–128.

24. Ren W., Sorensen N. Distributed coordination architecture for multi-robot formation control // Robotics and Autonomous Systems. 2008. Vol. 56. No. 4. Pp. 324–333.

Информация об авторах

Виравян Лусине Гарниковна, аспирант кафедры технологии машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. E-mail: lvg181992@mail.ru. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Демин Вячеслав Денисович, аспирант кафедры технологии машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. E-mail: rl_bgtu@intbel.ru. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 30.09.2020 г.

© Виравян Л.Г., Демин В.Д., 2020

***Virabyan L.G., Demin V.D.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: rl_bgtu@intbel.ru*

BUILDING A MULTI-ROBOT SYSTEM BASED ON STOCHASTIC SUPER-TWIST EVENT MODE CONTROLLER

Abstract. This article presents the development of a "Super-Twist" controller based on stochastic events to solve the problem of building control in a network multi-agent system in the presence of an external disturbance. The stochasticity in the system is introduced by randomness of network uncertainties i.e. losses and delays of data packets. The proposed controller structure consists of two parts. The first part outputs an event trigger condition for updates to the input control data of each agent in the system. The second part guarantees the desired construction in a finite time by determining the upper limit of the time to reach the specified sliding surface of each agent. The proposed stochastic design is tested on mobile robots. The results show a triple efficiency of the stochastic structure. They are a) retaining the advantages of event-triggering strategy, b) retaining the advantages of super-twisting sliding mode controller, and c) robust towards network uncertainties.

Keywords: stochastic, packet loss, delay, event-trigger, sliding surface, stability.

REFERENCES

1. Zhu Y., Guan X., Luo X., Li S. Finite-Time Consensus of Multi-Agent System via Nonlinear Event-Triggered Control Strategy. IET Control Theory Applications. 2015. Vol. 9. No. 17. Pp. 2548–2552.

2. Cheng T.-H., Kan Z., Klotz J. R., Shea J. M., Dixon W. E. Event-Triggered Control of Multiagent Systems for Fixed and Time-Varying Network Topologies. IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. Vol. 62. No. 10, Pp. 5365–5371.

3. Cui Y., Liu Y., Zhang W., Alsaadi F. E. Event-Based Consensus for a Class of Nonlinear

Multi-Agent Systems With Sequentially Connected Topology. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2018. Vol. 65. No. 10. Pp. 3506–3518.

4. Peng C., Zhang J., Han Q.-L. Consensus of Multiagent Systems With Nonlinear Dynamics Using an Integrated Sampled-Data-Based Event-Triggered Communication Scheme. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2019. Vol. 49. No. 3. Pp. 589–599.

5. Chen X., Hao F., Ma B. Periodic event-triggered cooperative control of multiple non-holonomic wheeled mobile robots. *IET Control Theory Applications*. 2017. Vol. 11. No. 6. Pp. 890–899.

6. Qian Y.-Y., Liu L., Feng G. Output Consensus of Heterogeneous Linear Multi-Agent Systems with Adaptive Event-Triggered Control. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2018. Vol. 64. No. 6. Pp. 2606–2613.

7. Adaldo A., Alderisio F., Liuzza D., Shi G., Dimarogonas D. V., Di Bernardo M., Johansson K. H. Event-Triggered Pinning Control of Switching Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2015. Vol. 2. No. 2. Pp. 204–213.

8. Du C., Liu X., Ren W., Lu P., Liu H. Finite-Time Consensus for Linear Multi-Agent Systems via Event-Triggered Strategy. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2019. Vol. 35. No. 3. Pp. 1338–1350.

9. Dolk V., Borger D.P., Heemels W. Output-Based and Decentralized Dynamic Event-Triggered Control With Guaranteed Lp-Gain Performance and Zeno-Freeness. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2017. Vol. 62. No. 1. Pp. 34–49.

10. Dolk V., Heemels M. Event-triggered control systems under packet losses. *Automatica*. 2017. Vol. 80. Pp. 143–155.

11. Keshtkar, S., Poznyak, A.S., Hernandez, E., Oropeza, A. Adaptive sliding-mode controller based on the super-twist state observer for control of the Stewart platform [Adaptivnyj regulyator na skol'zyashchih rezhimah, osnovannyj na "Super-Twist" nablyudatele sostoyanij s primeneniem k regulirovaniyu platformy Styuarta]. *Automation and Remote Control*, Vol. 78 No. 7. Pp. 1218–1233.

12. Sinha A., Mishra R. K. Consensus in First Order Nonlinear Heterogeneous Multi-Agent Systems with Event-Based Sliding Mode Control. *International Journal of Control*. 2018. Pp. 1–14.

13. Wang S.-G., Bai L., Chen M. Robust sliding mode control of general time-varying delay stochastic systems with structural uncertainties. *Control Theory and Technology*. 2014. Vol. 12. No. 4. Pp. 357–367.

14. Yu M., Yan C., Xie D., Xie G. Event-triggered Tracking Consensus with Packet Losses and Time-varying Delays. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2016. Vol. 3. No. 2. Pp. 165–173.

15. Zhu Q. Stabilization of Stochastic Nonlinear Delay Systems With Exogenous Disturbances and the Event-Triggered Feedback Control. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2018. Vol. 64. No. 9. Pp. 3764–3771.

16. Hu Z., Shi P., Zhang J., Deng F. Control of Discrete-Time Stochastic Systems With Packet Loss by Event-Triggered Approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2018. Pp. 1–10.

17. Gao W., Wang Y., Homaifa A. Discrete-Time Variable Structure Control Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1995. Vol. 42. No. 2. Pp. 117–122.

18. That N. D., Ha Q. P. Discrete-time sliding mode control with state bounding for linear systems with time-varying delay and unmatched disturbances. *IET Control Theory Applications*. 2015. Vol. 9. No. 11. Pp. 1700–1708.

19. Hu J., Wang Z., Gao H., Stergioulas L. K. Robust Sliding Mode Control for Discrete Stochastic Systems With Mixed Time Delays, Randomly Occurring Uncertainties, and Randomly Occurring Nonlinearities. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012. Vol. 59. No. 7. Pp. 3008–3015.

20. Argha A., Li L., Su S. W., Nguyen H. Discrete-time sliding mode control for networked systems with random communication delays. *American Control Conference*. 2015. Pp. 6016–6021.

21. Hu J., Zhang H., Yu X., Liu H., Chen D., Design of Sliding-Mode-Based Control for Nonlinear Systems With Mixed-Delays and Packet Losses Under Uncertain Missing Probability. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2019. Pp. 1–12.

22. Yao D., Zhang B., Li P., Li H. Event-Triggered Sliding Mode Control of Discrete-Time Markov Jump Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2018. Vol. 49. No. 10. Pp. 2016–2015.

23. Rybak L.A., Behera L., Malyshev D.I., Virabyan L.G. Approximation of the workspace of parallel and serial structure manipulators as part of the multi-robot system [Approximaciya rabochej oblasti manipulyatorov parallel'noj i posledovatel'noj struktury v sostave mul'tirobotizirovannoj sistemy]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 8. Pp. 121–128.

24. Ren W., Sorensen N. Distributed coordination architecture for multi-robot formation control. *Robotics and Autonomous Systems*. 2008. Vol. 56. No. 4. Pp. 324–333.

Information about the authors

Virabyan, Lusine G. Postgraduate student. E-mail: lvg181992@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Demin, Vyacheslav D. Postgraduate student. E-mail: rl_bgtu@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 30.09.2020

Для цитирования:

Виравян Л.Г., Демин В.Д. Построение мультироботизированной системы на основе стохастического событийного «Супер-твист» управления // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 10. С. 63–71. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-63-71

For citation:

Virabyan L.G., Demin V.D. Building a multi-robot system based on stochastic super-twist event mode controller. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 10. Pp. 63–71. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-63-71

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-72-83

Любимый Н.С., Романович М.А., Тихонов А.А., Бабкин М.С.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: nslubim@bk.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛ-МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОЙ ДЕТАЛИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ПЛОСКИМ ШЛИФОВАНИЕМ

Аннотация. Знания точной температуры нагревания комбинированной металл-металлополимерной детали при обработке плоским шлифованием помогает при назначении режимов резания, а также прогнозировании долговечности обработанной детали. Точный мониторинг температуры нагрева детали при плоском шлифовании позволяет понять, происходит ли температурная деструкция поверхностных слоев металлополимера, которая может снизить долговечность обрабатываемой детали из-за прожогов поверхностных слоев. В то же время, точное определение температуры в зоне резания дает понимание о необходимости применения смазочно-охлаждающих технологических средств, которые не всегда можно применять без дополнительных исследований при обработке металлополимеров имеющих диеновую матрицу. Исследование температуры в зоне резания необходимо из-за более низкой температуры деструкции металлополимера по отношению к металлу. В этой статье исследуется процесс плоского шлифования комбинированной металл-металлополимерной детали с использованием теоретических расчетов, метода конечно-элементного анализа, аналитической оценки результатов эксперимента. Оценка температуры в зоне резания производилась для детали – формообразующей плиты пресс-формы, что диктовало выбор определенного диапазона режимов резания, позволяющих получить требуемую шероховатость плоскости смыкания формообразующей детали.

Ключевые слова: металлополимер, металл-металлополимер, пресс-формы, заливка, глубина резания, моделирование, нагревание.

Введение. Металлополимерные материалы – это олигоэфиракрилатные многокомпонентные материалы, имеющие в своей основе пластичную матрицу и наполнитель. Как правило в качестве базы (матрицы) выступает модифицированная эпоксидная смола, а в качестве наполнителя может служить любой мелкодисперсный наполнитель [1, 2]. Сочетание пластичных свойств матрицы и физико-механических свойств наполнителя дает составу ряд уникальных свойств, таких как текучесть в не отвержденном состоянии, прочность и твердость в отвержденном состоянии, электропроводность или свойства изолятора, теплопроводность и многие другие свойства, зависящие от того какой именно материал выбран в качестве наполнителя. Различные производители, изменяя состав и пропорции компонентов добиваются получения составов, находящихся свое применение в различных отраслях промышленности. Чаще всего можно встретить вариант [1, 2] когда металлополимеры используют в качестве ремонтных составов, когда ремонтную деталь не представляется возможным вывести из оборудования для её ремонта или замены из-за непрерывности технологического процесса и требуется обеспечить ремонт и восстановление в составе сборочной единицы. Другим вариантом использования металлополимерных составов, яв-

ляется использование металлополимеров для изготовления новых изделий методом литья. Кроме того, металлополимеры могут выполнять и роль защитного состава, когда поверхность изделия обрабатывается составом для придания антикоррозийных или антифрикционных свойств. Так же нередко металлополимеры используют в качестве клеевого состава при сборке различных узлов и агрегатов. Благодаря пренебрежительно низкому проценту объемной усадки металлополимерного состава, его так же используют для герметизации неподвижных соединений деталей.

При изготовлении пресс-форм для литья пластиковых изделий используют как стандартные изделия, изготовленные согласно нормам взаимозаменяемости, так и специальные детали, выполненные непосредственно под то изделие, которое планируется отлить в пресс-форме. Фактически производители оснастки стремятся использовать в конструкции пресс-формы унифицированные детали, объем которых может достигать до 95 % от всего комплекта деталей пресс-формы. Стоимость унифицированных деталей в цене пресс-формы составляет от 15 до 65 %. Изменения процента состава стандартных изделий во многом зависят от конструкции самого изделия которое планируется изготавливать в пресс-форме, а также от опыта и квалификации конструктора оснастки.

К специальным деталям пресс-формы чаще всего относятся формообразующие детали – матрицы и пуансоны. Именно формообразующие детали составляют наибольшую долю в стоимости всей пресс-формы, так как их изготовление является наиболее сложным технологически, а также требует соблюдения высоких точностных и размерных допусков. Формообразующие детали пресс-форм составляют наибольшую часть стоимости пресс-формы, а, следовательно, существует экономическая целесообразность реконструирования таких деталей под вновь изготавливаемые изделия в тех случаях где это возможно.

Авторы статьи работают над совершенствованием технологии реконструирования формообразующих деталей пресс-форм с использованием металлополимера наполненного алюминием марки «LEO». Результаты ранних изысканий приведены в [3, 4].

Способ получения формообразующих деталей с применением металлополимера, а также конструкция самой пресс-формы с комбинированными формообразующими деталями запатентованы [5, 6], однако авторы могут позволить себе в данной работе раскрыть некоторые аспекты и привести общую схему получения комбинированной формообразующей детали, для того чтобы раскрыть актуальность исследований, описываемых в текущей работе. Обобщенная схема получения комбинированной формообразующей детали для изделия «звездочка» с одной плоскостью разреза приведена ниже.

На первом этапе производится изготовление мастер-модели будущего изделия на 3D принтере. Модель изделия «звездочка», которая имеет специальные технологические основания с двумя отверстиями. Данное основание и отверстия необходимы для того, чтобы правильно отцентрировать модель относительно металлической части формообразующей плиты.

Далее напечатанная модель собирается с предварительно подготовленной металлической обоймой (рис. 1). Здесь модель 1 укладывается на основание и сверху накрывается металлической обоймой 3, которая имеет колодец 7. В колодец устанавливается закладная деталь 2 из выполняемого материала. Подвод охлаждающей жидкости осуществляется через отверстия 8, показана позицией 5 и вынесена из сборки. После отверждения металлополимера и извлечения мастер-модели, поверхность разреза 6 подвергается шлифованию.

Выше приведенная схема является упрощенной и не отражает многих нюансов получения комбинированной формообразующей детали пресс-формы, однако она показывает, что одним из заключительных этапов является именно шлифование плоскости смыкания, состоящей из двух материалов: металла обоймы и металлополимера формообразующей части. Шлифование необходимо для того чтобы убрать технологические припуски свойственные мастер-модели при ее получении на 3D принтере. В случае невыполнения требований по шероховатости и плоскостности плоскости смыкания требованиям стандарта [7, 8], деталь в такой пресс-форме может получаться с облоем, что так же недопустимо.

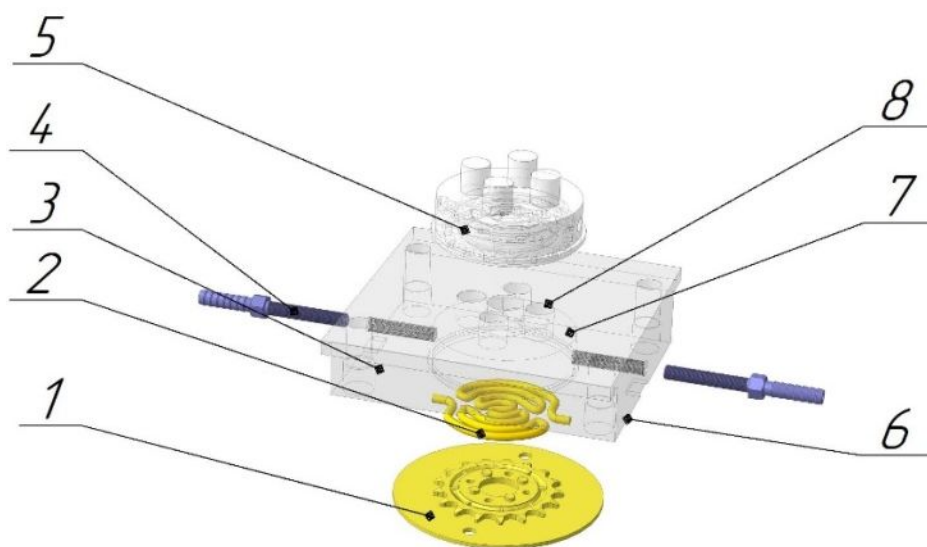


Рис. 1. Компоненты сборки в разнесенном виде:

1 – мастер-модель; 2 – технологические отверстия; 3 – металлическая обойма; 7 – колодец;
5 – мастер-модель; 6 – каналы охлаждения.

Материалы и методы. Согласно теории абразивной обработки [8, 9] разработанной сотрудниками Южно-Уральского государственного университета Кошиным А.А. и Сопельцевым А.В., а также работами Корчака С.Н., с учетом рекомендаций производителей абразивного инструмента, для обработки плоской поверхности смыкания пресс-формы с учетом обеспечения требуемой размерной точности и шероховатости $Ra < 0,80$ рекомендуется использовать круг из электрокорунда марки 25А, зернистостью не выше 16, с углом заострения 85° .

Проблема назначения корректных режимов абразивной обработки, на решение которой направленно настоящее исследование заключается в том, что возникает необходимость одновременной (совместной) обработки изделия, имеющего разные физико-механические свойства и соответственно отличные режимы резания как для металла, так и для металлополимера. Другими словами, необходимо подобрать те режимы шлифования, которые бы позволяли произвести обработку комбинированной детали с требуемой шероховатостью и не допустить возникновения дефектов обоих материалов. В теории могут возникнуть такие дефекты как прижёги и температурная деструкция матрицы металлополимера. Использование СОТС также не рассматривается в работе, так как на сегодняшний день нет данных о воздействии СОТС и металлополимера, что может привести к невидимой химической реакции и разрушению металлополимера или другим непрогнозируемым последствиям.

В соответствии с теорией абразивной обработки [9, 10], при обработке поверхности периферией круга нагрев поверхности имеет циклический характер. Существуют циклы нагрева и охлаждения, время цикла рассчитывается согласно выражению [10 **Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$\tau_n = \frac{2 \cdot h}{S_l} = \frac{\sqrt{D \cdot t}}{S_l \cdot 1000}, \quad (1)$$

где S_l – продольная подача стола, м/мин; D – диаметр шлифовального круга, мм; t – глубина резания при шлифовании, мм; $2 \cdot h$ – ширина плоского источника тепла.

Так как требуется вычислить температуру нагрева металлополимера при шлифовании, необходимо вычислить мощность источника тепла, для чего воспользуемся предложенной учеными Пермского национального технологического университета формулой, Вт [11, 12]:

$$Q_{h.s} = 0,4899 \cdot \mu_h \cdot \sigma_B \cdot V \cdot b_2 \cdot l_2 \cdot n_p \cdot B \cdot l_g, \quad (2)$$

где μ_h – коэффициент трения зерна о заготовку; σ_B – предел прочности обрабатываемого материала, МПа; V – скорость резания при шлифовании, мм/с; b_2 – ширина среза зерна, мм; l_2 – длина контакта зерна с обрабатываемым материалом по задней поверхности, мм; n_p – количество зерен при одновременном контакте; B – высота круга, мм; l_g – длина контакта круга с заготовкой, мм.

Согласно рекомендациям из [8], принимаем $\mu_h = 0,46$, угол зерна принимаем равным – 85° . Длина контакта круга с заготовкой, мм [13, 14]:

$$l_g = \pi D \frac{\arcsin(\frac{D-2t}{D})}{360^\circ}, \quad (3)$$

где D – диаметр круга, мм; t – глубина резания, мм.

Учитывая то, что в выражении (2) присутствует параметр σ_B , имеющий различные данные для стали и металлополимера, то и количество теплоты, выделяющееся при снятии припуска, разное.

Количество зерен в круге (средневероятностное) [9]:

$$n_p = \frac{0,0126}{\chi_{av}^2} \cdot \sqrt{\frac{S_l \cdot \sqrt{tD} \cdot K}{V \cdot 0,25}}, \quad (4)$$

где χ_{av} – среднее вероятный размер зерна (0,55 мм) для выбранного, по требуемой шероховатости круга [15, 16 **Ошибка! Источник ссылки не найден.**]; S_l – продольная подача стола, мм/с; V – скорость резания, мм/с; K – концентрация режущего материала в круге, %.

Для выбранного материала круга производители указывают 100 %-ю концентрацию, или $K = 1$.

На основе выше приведенных выражений для расчета мощности теплового излучения на поверхности обработки, вычислим значения температуры, для этого воспользуемся моделированием процесса теплопереноса с помощью программы конечно-элементного анализа.

Основная часть. Для более простого понимания процесса шлифования необходимо разработать схему абразивной обработки комбинированной детали (рис. 2) [14].

В двух случаях, представленных на рис. 2, производится обработка темплета с размером l, h и ϵ . В расчетах принимаем – $\epsilon = B_k$, так как упростит расчет и не окажет влияния на температуру в зоне $\epsilon/2$. Так же в двух случаях длина обработки, рассчитывается от радиуса ($D_{кр}/2$) круга и глубины резания t .

На схеме б модель представлена двумя участками: 1 – участок из металлополимера, 2 – участок из металла. С учетом технологии изготовления комбинированной детали, длина металлополимерного участка должна стремиться к минимуму, с целью обеспечения максимальной теплопроводности.

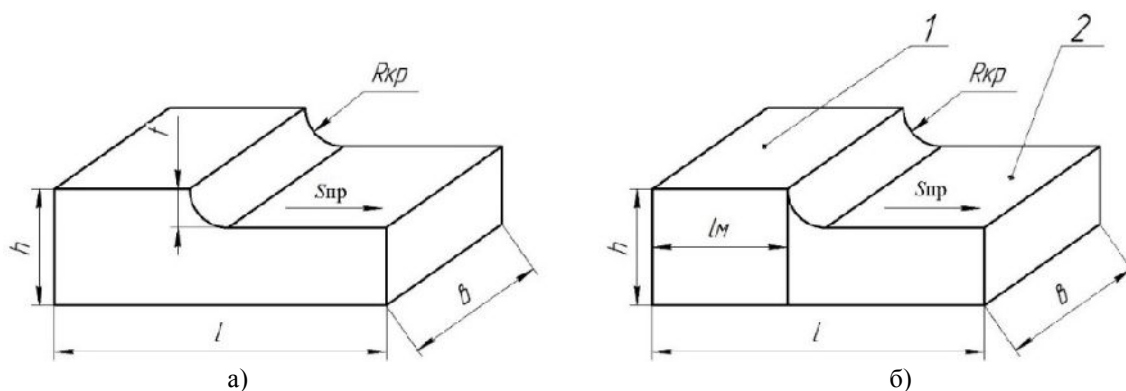


Рис. 2. Схема моделей для определения теплопереноса:
а – металлополимер; б – металлополимерная композиция

Источником тепла является радиусная поверхность, в качестве начальной температуры взята температура 25 °С (Окружающая среда в цеху). Параметры шлифовального круга – материал 25А, высота круга 40 мм, диаметр круга 450 мм, а также режимы резания – глубина резания

изменяется от 0,01 до 0,1 мм, продольная подача стола от 9 до 24 м/мин (0,015 до 0,4 м/с).

В таблицу 1 сведены расчеты мощности тепловыделения на всех диапазонах режимов резания [17, 18] для обоих материалов – стали и металлополимера.

Таблица 1

**Значения мощности тепловыделения кВт при обработке стали 40Х13. ГОСТ 4543
(предел прочности 1840 МПа)**

		Глубина резания, мм									
		0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
Продольная подача стола м/с	0,015	87	103	113	122	129	134	140	144	148	152
	0,03	123	145	161	172	182	190	197	204	210	215
	0,045	150	178	197	211	223	233	242	250	257	263
	0,06	173	206	227	244	257	269	279	288	296	304
	0,075	194	230	254	272	287	300	312	322	331	340
	0,09	212	252	278	298	315	329	342	353	363	372
	0,105	229	272	300	322	340	356	369	381	392	402
	0,12	245	291	321	344	364	380	395	408	419	430
	0,135	260	308	340	365	386	403	419	432	445	456
	0,15	274	325	359	385	407	425	441	456	469	481
	0,165	287	341	376	404	426	446	463	478	492	504
	0,18	300	356	393	422	445	466	483	499	513	527
	0,195	312	370	409	439	464	485	503	519	534	548
	0,21	324	384	425	456	481	503	522	539	555	569
	0,225	335	398	440	472	498	520	540	558	574	589
	0,24	346	411	454	487	514	538	558	576	593	608
	0,255	357	424	468	502	530	554	575	594	611	627
	0,27	368	436	482	517	545	570	592	611	629	645
	0,285	378	448	495	531	560	586	608	628	646	663
	0,3	387	460	508	545	575	601	624	644	663	680
	0,315	397	471	520	558	589	616	639	660	679	697
	0,33	406	482	532	571	603	630	654	676	695	713
	0,345	415	493	544	584	617	645	669	691	711	729
	0,36	424	503	556	597	630	658	683	706	726	745
	0,375	433	514	567	609	643	672	698	720	741	760
	0,39	442	524	579	621	656	685	711	735	756	775
	0,405	450	534	590	633	668	698	725	749	770	790

Выполнив подобные вычисления для металлополимерного материала на базе паспортных данных металлополимера [2] полученные данные сведем в таблицу 2.

Для того чтобы провести конечно-элементные расчеты необходимо также выполнить расчеты времени цикла нагрева и охлаждения согласно выражения (1). Расчетные данные также сведем в таблицу 3.

Таблица 2

**Значения мощности (кВт) тепловыделения при обработке металлополимера, наполненного
алюминием (предел прочности 140 МПа)**

		Глубина резания, мм									
		0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
Продольная подача стола	0,015	7	8	9	9	10	10	11	11	11	12
	0,03	9	11	12	13	14	14	15	16	16	16
	0,045	11	14	15	16	17	18	18	19	20	20
	0,06	13	16	17	19	20	20	21	22	23	23
	0,075	15	17	19	21	22	23	24	25	25	26
	0,09	16	19	21	23	24	25	26	27	28	28
	0,105	17	21	23	25	26	27	28	29	30	31
	0,12	19	22	24	26	28	29	30	31	32	33
	0,135	20	23	26	28	29	31	32	33	34	35
	0,15	21	25	27	29	31	32	34	35	36	37
	0,165	22	26	29	31	32	34	35	36	37	38
	0,18	23	27	30	32	34	35	37	38	39	40
	0,195	24	28	31	33	35	37	38	40	41	42
	0,21	25	29	32	35	37	38	40	41	42	43
	0,225	26	30	33	36	38	40	41	42	44	45
	0,24	26	31	35	37	39	41	42	44	45	46
	0,255	27	32	36	38	40	42	44	45	47	48
	0,27	28	33	37	39	42	43	45	47	48	49
	0,285	29	34	38	40	43	45	46	48	49	50
	0,3	29	35	39	41	44	46	47	49	50	52
	0,315	30	36	40	42	45	47	49	50	52	53
	0,33	31	37	41	43	46	48	50	51	53	54
	0,345	32	37	41	44	47	49	51	53	54	55
	0,36	32	38	42	45	48	50	52	54	55	57
	0,375	33	39	43	46	49	51	53	55	56	58
	0,39	34	40	44	47	50	52	54	56	58	59
	0,405	34	41	45	48	51	53	55	57	59	60

Таблица 3

Величина цикла нагрева-охлаждения, мс.

		Глубина резания, мм									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Продольная подача стола м/с	0,015	141	200	245	283	316	346	374	400	424	447
	0,03	71	100	123	141	158	173	187	200	212	224
	0,045	47	67	82	94	105	116	125	133	141	149
	0,06	35	50	61	71	79	87	94	100	106	112
	0,075	28	40	49	57	63	69	75	80	85	89
	0,09	24	33	41	47	53	58	62	67	71	75
	0,105	20	29	35	40	45	50	54	57	61	64
	0,12	18	25	31	35	40	43	47	50	53	56
	0,135	16	22	27	31	35	39	42	44	47	50
	0,15	14	20	25	28	32	35	37	40	42	45
	0,165	13	18	22	26	29	32	34	36	39	41
	0,18	12	17	20	24	26	29	31	33	35	37
	0,195	11	15	19	22	24	27	29	31	33	34
	0,21	10	14	18	20	23	25	27	29	30	32
	0,225	9	13	16	19	21	23	25	27	28	30
	0,24	9	13	15	18	20	22	23	25	27	28
	0,255	8	12	14	17	19	20	22	24	25	26
	0,27	8	11	14	16	18	19	21	22	24	25
	0,285	7	11	13	15	17	18	20	21	22	24
	0,3	7	10	12	14	16	17	19	20	21	22
	0,315	7	10	12	14	15	17	18	19	20	21
	0,33	6	9	11	13	14	16	17	18	19	20
	0,345	6	9	11	12	14	15	16	17	18	19
	0,36	6	8	10	12	13	14	16	17	18	19
	0,375	6	8	10	11	13	14	15	16	17	18
	0,39	5	8	9	11	12	13	14	15	16	17
	0,405	5	7	9	11	12	13	14	15	16	17

Для расчетов использовалось ПО *ELCUT* 6.1., а также рекомендации [19, 20]. Порядок расчета:

1. На первом этапе была составлена геометрическая модель толщиной 40 мм в соответствии с данными из таблицы 1 и таблицы 2.

2. На втором этапе были внесены данные о материалах: металлополимера – плотность 1850 кг/м³; теплоёмкость 7,5 Дж/кг·К [18]; теплопроводность 0,3 Вт/К·м; Сталь 40X13 – плотность

7850 кг/м³; теплоёмкость 400 Дж/кг·К; теплопроводность 385 Вт/К·м.

3. В третью очередь были указаны начальные условия – температура 298 К.

4. Далее обозначено место (грань модели) по которой производился нагрев.

5. В заключении был выполнен сам расчет. Значение максимальных температур (К) были записаны в таблицу 4.

Для примера на рис. 3 показана геометрическая модель при глубине резания 0,1 мм.

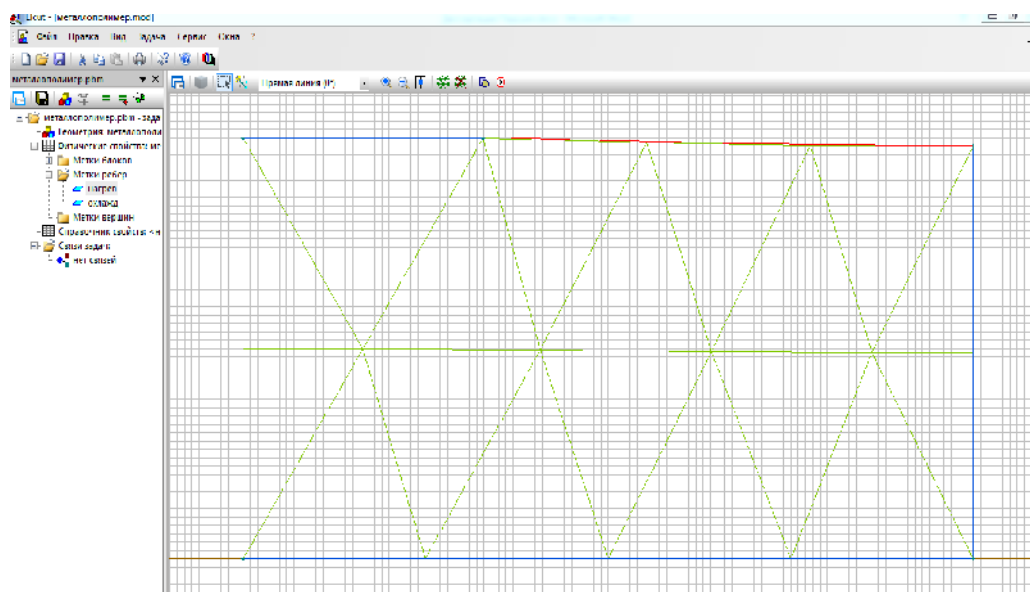


Рис. 3. Геометрическая модель шлифования металлополимера

Сами же результаты расчета методом конечных элементов и диаграммы температурных полей представлены на рис. 4. (глубина резания 0,1 мм, скорость резания 0,015 м/с.)

Необходимо отметить следующее наблюдение, так при моделировании нагрева комбинированного образца было установлено, что нагрев а)

металлополимера от металлической части образца затруднен, так как металл обладает более высоким коэффициентом теплопроводности по сравнению с металлополимером, именно поэтому в дальнейшем исследования комбинированного образца не проводилось, а все внимание было уделено металлополимерному образцу.

б)

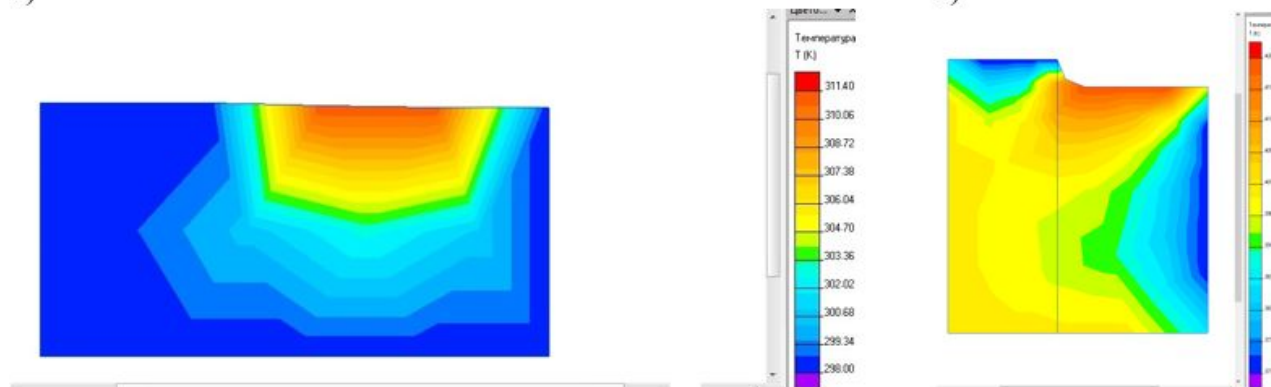


Рис. 4. Распределение температурных полей: а - металлополимерного образца; б - комбинированного металл-металлополимерного образца (левая часть модели металлополимер, правая металл)

Данные по исследованию металлополимерного образца были сведены в таблицу 4.

Таблица 4

Максимальное значение температуры металлополимера, °К.

		Глубина резания, мм									
		0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
Продольная подача стола м/с	0,015	299	301	304	307	309	310	311	311	312	311
	0,03	299	301	304	307	309	310	311	312	312	312
	0,045	300	302	304	307	309	311	312	312	312	312
	0,06	300	302	305	307	309	311	312	312	312	312
	0,075	300	302	305	307	309	311	312	312	312	312
	0,09	300	302	305	307	309	311	312	312	312	312
	0,105	300	302	305	308	309	311	312	312	312	312
	0,12	300	302	305	308	310	311	312	312	313	312
	0,135	300	302	304	307	309	311	312	312	312	312
	0,15	300	302	305	307	309	311	312	312	312	312
	0,165	300	302	305	307	309	311	312	312	312	312
	0,18	300	302	305	307	309	311	312	312	312	312
	0,195	300	302	305	308	309	311	312	312	312	312
	0,21	300	302	305	308	310	311	312	312	313	312
	0,225	300	302	305	308	310	311	312	313	313	313
	0,24	301	303	305	308	310	312	313	313	313	313
	0,255	301	303	306	309	311	312	313	313	314	313
	0,27	302	304	306	309	311	313	314	314	314	314
	0,285	302	304	307	310	312	313	314	314	315	314
	0,3	303	305	307	310	312	314	315	315	315	315
	0,315	303	305	308	311	313	314	315	315	316	315
	0,33	304	306	308	311	313	315	316	316	316	316
	0,345	304	306	309	312	314	315	316	316	317	316
	0,36	305	307	309	312	314	316	317	317	317	317
	0,375	305	307	310	313	315	316	317	317	318	317
	0,39	306	308	310	313	315	317	318	318	318	318
	0,405	306	308	311	313	315	317	318	318	318	318

Проведенные расчеты позволили получить номограммы (рис. 5) взаимосвязи температуры

металлополимера при плоском шлифовании периферией круга от глубины резания и подачи стола.

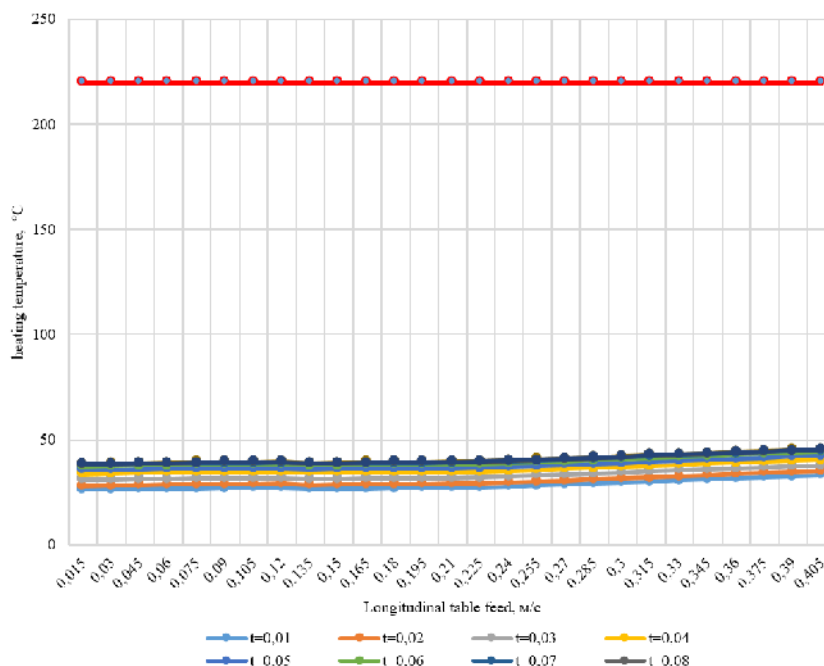


Рис. 5. Температуры металлополимера в зависимости от глубины резания и продольной подачи стола

Проведенные теоретические расчеты позволяют сделать вывод, что даже при максимальных значениях подачи и глубины резания, тех что позволяет диапазон регулирования станка и рекомендации при обработке стальной детали, металлополимерный темплет не нагревается до температуры деструкции матрицы, что могло бы привести к нарушению целостности детали и поменять его физико-механические свойства.

С целью обеспечения достоверности расчетных данных также был поставлен эксперимент по

шлифованию металлополимерного темплета на станке 3Б722 с теми же исходными данными, что были использованы для теоретических расчетов.

Обработка результатов эксперимента производилась с использованием программного продукта *SmartView* 3.7.19.0, позволяющего по кадрово производить анализ записанных данных (рис. 6), что несмотря на высокий градиент рассеивания тепла в зоне резания, всё же позволило зафиксировать достоверные данные.

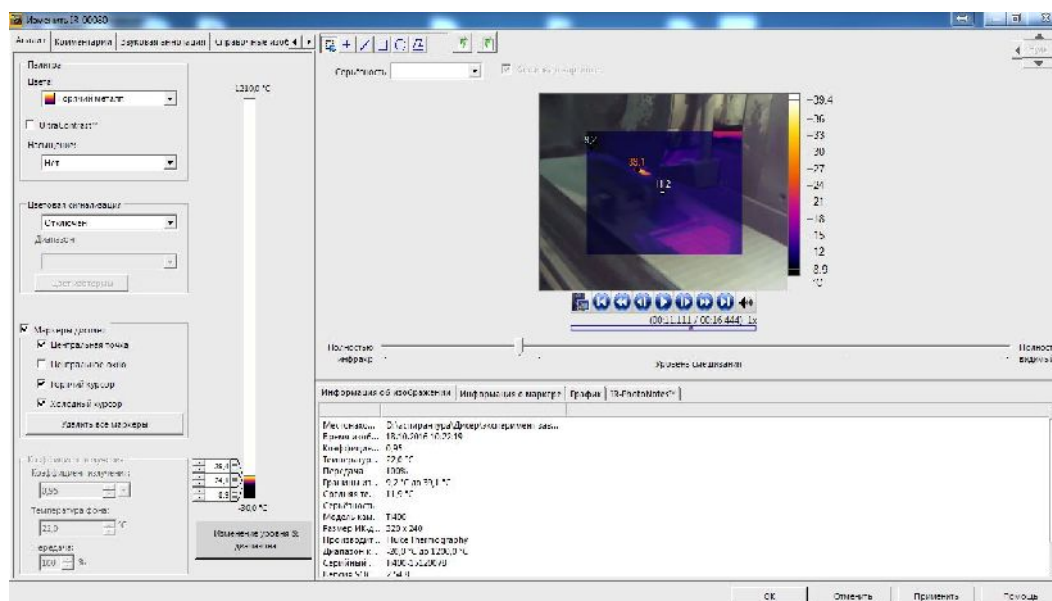


Рис. 6. Окно программы *SmartView* 3.7.19.0 при обработке результатов эксперимента

Распределение температурных полей тепловизора *Ti400* показано на рис. 7.



Рис. 7. Распределение температурных полей при шлифовании металлополимерного образца

На рис. 7 можно видеть диаграмму распределения температур при шлифовании металлополимерного образца, со следующими режимами резания: продольная подача стола 13,5 м/мин, глубина резания 0,08 мм. Анализируя диаграмму

можно установить, что максимальная температура в зоне резания соответствует значению 39,1 °C. Проведя ряд замеров и обработав результаты эксперимента, получили следующие данные (табл. 5).

Таблица 5

Экспериментальные значения температур металлополимера при шлифовании

		Глубина резания, мм		
		0,01	0,05	0,08
Продольная подача стола, м/с	0,045	26,6	35,7	38,8
	0,225	27,1	36,4	39,3
	0,405	32,6	41,9	45,1

Выводы. В исследовании были проведены теоретические расчеты и экспериментальные исследования, которые позволили установить, что на всем диапазоне изменения режимов резания при шлифовании металлополимерного образца температура в зоне резания при обработке металлополимера плоским шлифованием периферией круга не достигает критических значений, приводящих к разрушению его матрицы. Максимальная зарегистрированная температура составила 46°C, тогда как предельное значение температуры для металлополимера 220°C. Таким образом было доказано, что металлополимер возможно обработать на тех режимах резания которые устанавливаются технологом для обработки стальной детали и основной задачей, стоящей перед конструктором теперь будет являться назначение тех режимов резания из исследованного диапазона, которые обеспечат требуемую шероховатость и размерную точность формообразующей детали пресс-формы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абдуллин И.А. Композиционные материалы с полимерной матрицей: учебное пособие. Казань. Изд-во Казан. гос. технол. ун-та. 2006. С. 147.
2. Баурова Н.И., Зорин В.А. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учебное пособие / Н.И. Баурова, В.А. Зорин. М.: МАДИ. 2016. 264 С.
3. Любимый Н.С., Чепчуров М.С., Минасова В.Е. Оптимизация параметров шлифования металлополимерной поверхности смыкания формообразующих деталей пресс-форм // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №7. С. 125–130.
4. Любимый Н.С., Чепчуров М.С., Аверченкова Е.Э. Обеспечение требуемой шероховатости поверхностей изделий из металлополимера, наполненного алюминием при обработке шлифованием // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №1. С. 162–168.
5. Любимый Н.С. Патент РФ № 188720. Металл-металлополимерная пресс-форма. 2018144087, заяв. 12.12.2018. опубл. 22.04.2019. Бюл. №12.
6. Кошин А.А., Сопельцев А.В. Исследование гранулометрического состава и микрогеометрических показателей абразивных зерен шлифовальных кругов, применяемых в обдирочном шлифовании // Вестник ЮУрГУ. 2010. №10. С. 77–82.
7. Лищенко Н.В., Ларшин В.П. Температура при шлифовании прерывистыми и высокопористыми кругами // Вектор науки ТГУ. 2015. № 3-1. С. 75–84.
8. Курдюков В.И., Андреев А.А. Сила резания и температура при шлифовании: учебное пособие. Курган. Изд-во Курганского гос. ун-та. 2013. С. 11.
9. Никитин С.П., Ханов А.М., Сиротенко Л.Д. Расчет теплового сопротивления элементов зоны резания при шлифовании теплозащитных покрытий // Современные проблемы науки и образования. 2014. №6. С. 118–120.
10. Штерензон В.А. Моделирование технологических процессов: конспект лекций. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та. 2010. 66 с.
11. Дальский А.М., Суслов А.Г., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К. Справочник технолога-машиностроителя. М.: Изд-во Машиностроение. 2003. 944 с.
12. Майникова Н.Ф., Жуков Н.П., Рогов И.В. Моделирование теплопереноса в полимерном материале при фазовом переходе // Вестник ТГТУ. 2008. №3. С. 490–494.
13. Лебедев С.М., Гефле О.С., Ткаченко С.Н. Диэлектрические и теплофизические свойства полимерных материалов с высокой диэлектрической проницаемостью // Пластические массы. 2010. № 12. С. 17–22.
14. Любимый Н.С., Чепчуров М.С., Костоев З.М. Исследование процессов получения комбинированных металл-металлополимерных формообразующих деталей пресс-форм заданного качества с применением аддитивных технологий: монография. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2020. 140 с.

15. Герасимов М.Д. Способ получения направленных механических колебаний для практического применения в технологических процессах // Строительные и дорожные машины. 2014. №1. С. 35–38.

16. Bogdanov V.S., Romanovich A.A., Vorobyov N.D. Definition of rational conditions of materials grinding in energy-saving milling complex // World Applied Sciences Journal. 2013. Vol. 25. № 2. Pp. 214–221.

17. Venkatesh K., Bobji M.S., Biswas S.K. Power spectra of roughness caused by grinding of metals // Journals of Material Research. 2009. Vol. 14. Pp. 319–322.

18. Manrico V. Fabretto, Drew R. Evans, Michael Mueller and Kamil Zuber. Polymeric Material with Metal-Like Conductivity for Next Generation Organic Electronic Devices // Chemistry of Materials. 2012. Vol. 24. Pp. 3998–4003.

19. Liang J., Narahara H., Koresawa H., Suzuki H. Verification and evaluation of automatically designed cooling channels for block-laminated molds // UK: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 75. Pp. 1751–1761.

20. Jeng Y.R., Liu D.S., Yau H.T. Fast numerical algorithm for optimization mold shape of direct injection molding process // USA: Materials and manufacturing processes. 2013. Vol. 6. Pp. 689–694.

Информация об авторах

Любимый Николай Сергеевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: nslubim@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Романович Марина Алексеевна, кандидат экономических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: bel31gm@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Тихонов Александр Андреевич, магистрант. E-mail: cherep2240@ Rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Бабкин Максим Сергеевич, магистрант. E-mail: maks.babkin.2012@inbox.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Поступила 14.09.2020 г.

© Любимый Н.С., Романович М.А., Тихонов А.А., Бабкин М.С., 2020

***Lubimyi N.S., Romanovich M.A., Tikhonov A.A., Babkin M.S.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: nslubim@bk.ru*

INVESTIGATION OF THE SURFACE TEMPERATURE OF A METAL-METAL POLYMER PART DURING FLAT GRINDING MACHINING

Abstract. Knowing the exact heating temperature of a combined metal-metal polymer part when processing flat grinding helps to assign cutting modes, as well as predict the durability of the processed part. Accurate monitoring of the heating temperature of the part during flat grinding allows to understand whether the temperature degradation of the surface layers of the metal polymer occurs, which can reduce the durability of the processed part due to burns of the surface layers. At the same time, accurate determination of the temperature in the cutting zone gives an understanding of the need for the use of cooling lubricants, which can not always be used without additional research when processing metal polymers with a diene matrix. The study of the temperature in the cutting zone is necessary because of the lower degradation temperature of the metal polymer relative to the metal. This article examines the process of flat grinding of a combined metal-metal polymer part using theoretical calculations, the method of finite element analysis, and analytical evaluation of the results of the experiment. The temperature in the cutting zone is estimated for the part-forming plate of the mold, which dictated the choice of a certain range of cutting modes that allow to obtain the required roughness of the plane of closing of the forming part.

Keywords: metal polymer, metal-metal polymer, molds, casting, cutting depth, modeling, heating.

REFERENCES

1. Abdullin I.A. Composite materials with a polymer matrix. [Kompozicionnye materialy s polimernoj matricej]. Kazan: Kazan state technol. Univ., 2006. 147 p. (rus)
2. Baurova N.I., Zorin V.A. The use of polymeric materials in the manufacture and repair of machines [Primenenie polimernyh kompozicionnyh materialov pri proizvodstve i remonte mashin]. M.: MARI, 2016. 264 p. (rus)
3. Lyubimiy N.S., Chepchurov M.S., Minasova V.E. Optimization of parameters for grinding the metal-polymer surface of the closing of forming parts of molds. [Optimizaciya parametrov shlifovaniya metallopolimernoj poverhnosti smykaniya formoobrazuyushchih detalej press-form]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2017. No 7. Pp. 125–130. (rus)
4. Lyubimiy N.S., Chepchurov M.S., Averchenkova E.E. Ensuring the required roughness of surfaces of products made of metal polymer filled with aluminum when processing by grinding. [Obespechenie trebuemoj sherohovatosti poverhnostej izdelij iz metallopolimera, napolnennogo aluminom pri obrabotke shlifovaniem]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2017. No 1. Pp. 162–168. (rus)
5. Lyubimiy N.S. Metal-metal polymer mold. Patent RF, no. 188720, 2019.
6. Koshin A.A., Sopel'cev A.V. Investigation of the granulometric composition and microgeometric characteristics of abrasive grains of grinding wheels used in rough grinding. [Issledovanie granulometricheskogo sostava i mikrogeometricheskikh pokazatelej abrazivnyh zeren shlifoval'nyh krugov, primenyaemyh v obdirochnom shlifovanii]. Bulletin of SUSU. 2010. No. 10. Pp. 77–82. (rus)
7. Lishchenko N.V., Larshin V.P. Grinding temperature with intermittent and highly porous wheels. [Temperatura pri shlifovanii preryvistymi i vysokoporistymi krugami]. TSU science vector. 2015. No. 3. Pp. 75–84. (rus)
8. Kurdyukov V.I., Andreev A.A. Cutting force and grinding temperature. [Sila rezaniya i temperatura pri shlifovanii]. Kurgan: KSU. 2013. 11 p. (rus)
9. Nikitin S.P., Hanov A.M., Sirotenko L.D. Calculation of the thermal resistance of the elements of the cutting zone when grinding heat-protective coatings. [Raschet teplovogo soprotivleniya elementov zony rezaniya pri shlifovanii teplozashchitnyh pokrytij]. Modern problems of science and education. 2014. No. 6. Pp. 118–120. (rus)
10. Shterenzon V.A. Process Modeling: Lecture Notes. [Modelirovanie tekhnologicheskikh processov: konspekt lekcij]. Ekaterinburg: RSPEU. 2010. 66 p. (rus)
11. Dal'skij A.M., Suslov A.G., Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K. Handbook of a mechanical engineer. [Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelja]. M.: Mashinostroyeniye. 2003. 944 p. (rus)
12. Majnikova N.F., Zhukov N.P., Rogov I.V. Modeling heat transfer in a polymer material during phase transition. [Modelirovanie teploperenosa v polimernom materiale pri fazovom perekhode]. Bulletin of TSTU. 2008. No. 3. Pp. 490–494. (rus)
13. Lebedev S.M., Gefle O.S., Tkachenko S.N. Dielectric and thermophysical properties of polymeric materials with high dielectric constant. [Dielektricheskie i teplofizicheskie svoystva polimernyh materialov s vysokoj dielektricheskoy pronicaemost'yu]. Plastics. 2010. No 12. Pp. 17–22. (rus)
14. Favorite N.S., Chepchurov M.S., Kostoev Z.M. Investigation of the processes of obtaining combined metal-metal-polymer forming parts of molds of a given quality using additive technologies: monograph. [Issledovanie processov polucheniya kombinirovannyh metall-metallopolimernyh formoobrazuyushchih detalej press-form zadannogo kachestva s primeneniem additivnyh tekhnologij: monografiya]. Belgorod: BSTU named after V. G. Shukhov, 2020. 140 p. (rus)
15. Gerasimov M.D. Method of obtaining directional mechanical vibrations for practical use in technological processes. [Sposob polucheniya napravlennyh mekhanicheskikh kolebanij dlya prakticheskogo primeneniya v tekhnologicheskikh processah]. Construction and road machines. 2014. No. 1. Pp. 35–38. (rus)
16. Bogdanov V.S., Romanovich A.A., Vorobyov N.D. Definition of rational conditions of materials grinding in energy-saving milling complex. World Applied Sciences Journal. 2013. Vol. 25. No. 2. Pp. 214–221.
17. Venkatesh K., Bobji M.S., Biswas S.K. Power spectra of roughness caused by grinding of metals. Journals of Material Research. 2009. Vol. 14. Pp. 319–322.
18. Manrico V., Fabretto, Drew R. Evans, Michael Mueller and Kamil Zuber. Polymeric Material with Metal-Like Conductivity for Next Generation Organic Electronic Devices. Chemistry of Materials. 2012. Vol. 24. Pp. 3998–4003.
19. Liang J., Narahara H., Koresawa H., Suzuki H. Verification and evaluation of automatically designed cooling channels for block-laminated molds. UK: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 75. Pp. 1751–1761.
20. Jeng Y.R., Liu D.S., Yau H.T. Fast numerical algorithm for optimization mold shape of direct injection molding process. USA: Materials and manufacturing processes. 2013. Vol. 6. Pp. 689–694.

Information about the authors

Lubimyi, Nikolai S. PhD, Engineering, Senior lecturer. E-mail: nslubim@bk.ru. E-mail: makskol97@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Romanovich, Marina A. PhD, Associate Professor. E-mail: bel31rm@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Tikhonov, Aleksandr A. Master's student. E-mail: cherep2240@rambler.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Babkin, Maxim S. Master's student. E-mail: maks.babkin.2012@inbox.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 14.09.2020

Для цитирования:

Любимый Н.С., Романович М.А., Тихонов А.А., Бабкин М.С. Исследование температуры поверхности металл-металлополимерной детали при механической обработке плоским шлифованием // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 10. С. 72–83. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-72-83

For citation:

Lubimyi N.S., Romanovich M.A., Tikhonov A.A., Babkin M.S. Investigation of the surface temperature of a metal-metal polymer part during flat grinding machining. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 10. Pp. 72–83. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-72-83

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-84-90

Титова И.В., Коноплин А.Н.Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I***E-mail: titovair@yandex.ru*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С РАЗРАБОТКОЙ КОНСТРУКЦИИ РЕЗЦА ДЛЯ ЧИСТОВОГО ТОЧЕНИЯ

Аннотация. Рассмотрен технологический процесс механической обработки композиционных материалов. Дана краткая характеристика композиционных материалов, их физико-механических свойств, изучена их структура. Отражены особенности обработки стеклопластиков, углепластиков, органопластиков и боропластиков. Процесс обработки композитов будет затруднен из-за схем армирования, различного направления волокон, видов укладок непрерывными волокнами. Все это ведет к определенным требованиям, которые будут предъявляться к инструменту и его интенсивности изнашивания. Изнашивание инструмента складывается из разных видов изнашивания – адгезионного, усталостного, абразивно-механического, химического. При проведении процесса резания необходимо учитывать направление армирования, а значит, и направление обработки режущего инструмента. В зависимости от состояния поверхностного слоя рассмотрен режущий инструмент, необходимый для проведения механической обработки. Дано обоснование необходимости совершенствования конструкции режущего инструмента. Для осуществления процесса резания разработана конструкция резцовой головки. Она состоит из чернового и чистового резцов. Рассмотрены и подобраны значения параметров конструкции резцовой головки. Определена оптимальная глубина резания для чистового резца. Опытным путем подбирались геометрические параметры чистового резца, назначение которого – обеспечить требуемое качество обработки. С помощью опытов найдены значения угла отклонения главной режущей кромки от горизонтальной плоскости. Подробно описана конструкция чистового резца, который в значительной степени устраняет недостатки обработки. Исключается появление опережающей трещины при точении чистовым резцом.

Ключевые слова: композиционные материалы, машиностроение, режущий инструмент, резцовая головка, механическая обработка.

Введение. При изготовлении изделий из композиционных материалов применяются различные виды механической обработки, которые позволят достигнуть требуемой точности и качества поверхности. Токарная обработка является одним из самых распространенных видов механической обработки, ее производят на токарно-винторезных и специальных станках. Обработка резанием применяется также при изготовлении элементов, которые невозможно получить в пресс-формах, например, отверстий, расположенных под углом к направлению прессования, канавок, резьбы и т.д. или для исправления дефектов, имеющих место на предыдущих стадиях изготовления [1].

При обработке композиционных материалов присутствуют те же явления, что и при резании металлов, т.е. существуют силовые и тепловые явления, происходит процесс стружкообразования и интенсивно изнашивается режущий инструмент.

Среди полимерных композитов конструкционного назначения наибольшее распространение нашли: стеклопластики, углепластики, органопластики и боропластики.

Стеклопластики – это материалы, в которых упрочняющим наполнителем является стеклянное волокно. Углепластики – это материалы на основе углеродных волокон. Механическая обработка стеклопластиков и углепластиков похожа по основным характеристикам, но все же лучше обрабатывается углепластик. Для обработки стеклопластика необходимо увеличивать стойкость инструмента.

Органопластики – это полимерные композиционные материалы, армированные волокнами, полученными на основе ароматических полиамидов. Механическая обработка органопластиков будет более сложным, чем процесс обработки углепластиков и стеклопластиков. Это обусловлено составом органопластиков. Он представляет собой полимер, наполненный полимером. Плотность органических волокон будет ниже плотности минеральных, но удельные значения плотности и жесткости будут высоки. При токарной обработке стружка состоит из прочно связанных между собой волокнами наполнителя. Стружка наматывается на режущий инструмент и затрудняет процесс резания.

Боропластики – это материалы, армированные борными волокнами или борными нитями.

Точение изделий из боропластиков сложно из-за наличия в них твердых армирующих волокон.

Проблемам обработки композиционных материалов посвящены работы В.В. Амалицкого, В.И. Баранчикова, А.М. Булгаева, А.И. Вигдоро- вича, В.И. Коняшина, Н.А. Кряжева, А.М. Мар- кова, Е.А. Памфилова, А.А. Позднякова, Рычкова Д.А., Г.В. Сагалаева, А.С. Тарапанова, Г.А. Хар- ламова, Singh S., Palanisamy V., Divyapriya P. и др. Для оптимизации процесса резания компози- ционных материалов, достижения максимальной производительности и требуемого качества обра- ботанной поверхности необходим режущий ин- струмент, который будет отвечать специфиче- ским требованиями к качеству формирования ре- жущих элементов. Вопросам подготовки и про- ектирования режущего инструмента для обра- ботки композиционных материалов посвящены работы В.В. Амалицкого, В.А. Гречишников, А.Э. Грубе, С.В. Кирсанова, Г.А. Зотова, Г.М. Ипполитова, Д.В. Кожевникова, В.Г. Морозова и др. Установлено, что режущая часть таких ин-

струментов должна иметь более высокие значе- ния переднего и заднего углов. Однако исследо- вания не привели к формированию четких реко- мендаций по подготовке инструмента для обра- ботки композиционных материалов.

Целью нашей работы является разработка конструкция резцовой головки, которая позволит улучшить качество поверхности, учесть недо- статки при обработке композиционных материа- лов и повысить стойкость режущего инстру- мента.

Основная часть. Композитные материалы являются волокнистыми материалами, в отличие от металлов, имеющих кристаллическое строе- ние. В настоящее время среди большого разно- образия полимерных композиционных материа- лов особое место по перспективности примене- ния и разнообразию свойств занимают армиро- ванные пластики, состоящие из двух фаз – поли- мерной матрицы и армирующего (усиливаю- щего) наполнителя [2, 3, 4, 5]. На рисунке 1 пока- заны схемы армирования композиционных мате- риалов.

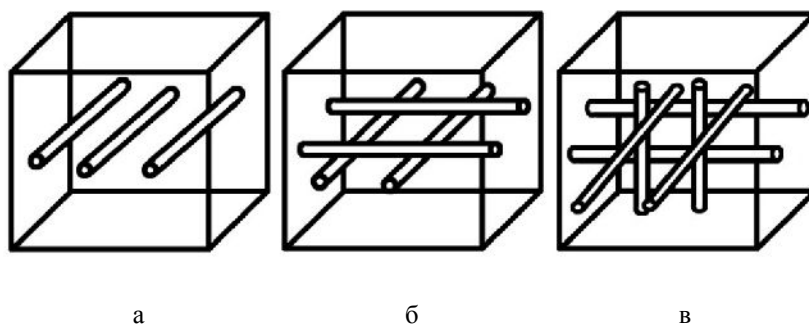


Рис. 1. Схемы армирования композиционных материалов:
а – одноосное, б – двухосное, в – трехосное

Обработка различных композиционных ма- териалов имеет свои особенности. Отличитель- ной особенностью волокнистых композитов яв- ляется анизотропия свойств, обусловленная пре- имущественным расположением волокон в том или ином направлении [6,7]. Всегда при точении пластмасс и композиционных материалов прои- сходит резание как вдоль волокон, так и перпен- дикулярно к ним. Процесс обработки композитов

будет затруднен из-за схем армирования, различ- ного направления волокон, видами укладок не- прерывными волокнами. На рисунке 2 показана схема армирования композиционных материалов непрерывными волокнами. На рисунке 3 даны формы сечений армирующих волокон, применя- емых в композиционных материалах.

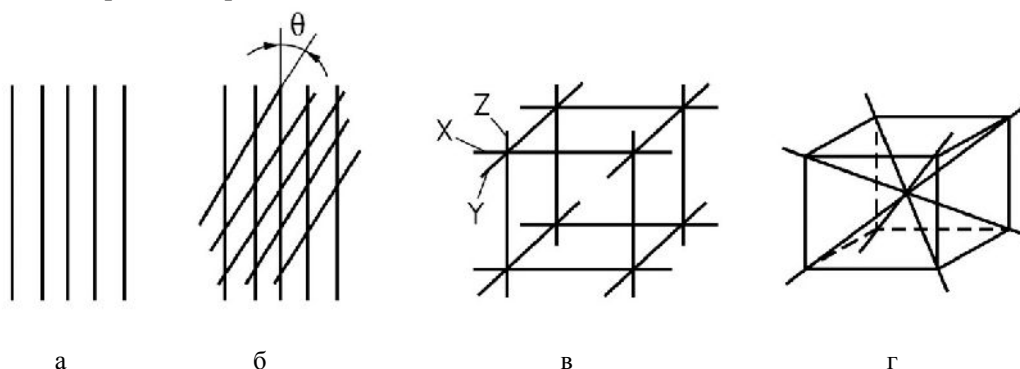


Рис. 2. Схема армирования композиционных материалов непрерывными волокнами:
а – одномерная укладка, б – двухмерная укладка, в – схема армирования 3D, г – схема армирования 4D

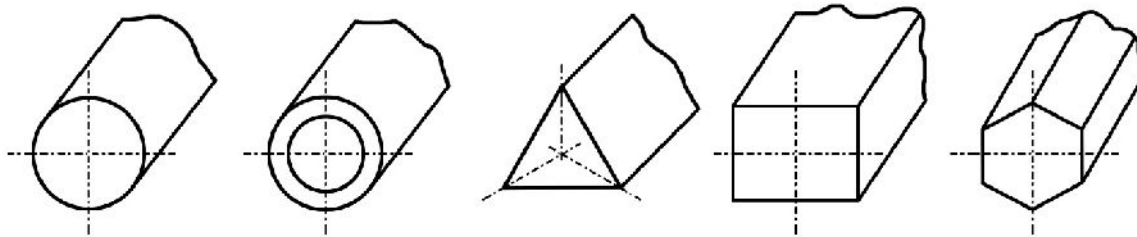


Рис. 3. Формы сечений армирующих волокон

Основным фактором, вызывающим снижение прочности полимерных композитов в случае неизменности свойств волокон, является рост эффективной длины волокна и как следствие этого снижение прочности волокна в композите, соответствующей эффективной длине [8, 9]. При проведении процесса резания необходимо учитывать направление армирования, а значит, и направление обработки режущего инструмента. Поэтому, необходимо разработать режущий инструмент, который будет учитывать все перечисленные выше недостатки.

Полимерные композиционные материалы имеют слоистую структуру и при резании в зоне обработки повышается температура, что приводит к уменьшению прочности и хрупкости. В отличие от металлов, при повышении температуры свыше 300–350 °С у композиционных материалов начинается термодеструкция, разлагается полимерная связующая из-за низкой термостойкости. Появляется большой дефектный слой и резко ухудшаются свойства материала. Обработку композиционный материал необходимо при режимах, не превышающих заданную температуру. Основное тепло выделяется при трении по задней поверхности инструмента. Теплота накапливается в инструменте, повышается температура в режущих кромках инструмента. Все это ведет к определенным требованиям, которые будут предъявляться к инструменту и его интенсивности изнашивания. Изнашивание инструмента складывается из разных видов изнашивания – адгезионного, усталостного, абразивно-механического, химического. При обработке резанием диффузионный износ не наблюдается, так как температура резания при механической обработке композитов не превышает 500 °С.

Обработку необходимо проводить острозаточенным инструментом. При работе затупленным инструментом в местах обработки образуются трещины между волокнами. Так как материал слоистый, образуются сколы и выкрашивание материала, там, где режущий инструмент начинает и заканчивает обработку. Все это негативно сказывается на качестве поверхности. Армирующие волокна композиционных материалов слоятся, разламываются, ухудшается внеш-

ний вид поверхности. Тогда необходимо применять дополнительные операции, такие как шлифование, полирование, что ведет к удорожанию процесса резания [10, 11].

В машиностроении детали из указанных материалов изготавливаются в основном точением резцами с прямыми режущими кромками, так называемое «свободное» точение. При точении такими резцами срезание происходит со скалыванием по поверхности обработки вдоль волокон. Стружка, перемещаясь по передней поверхности инструмента, оттягивается от обработанной поверхности, продолжает увеличивать опережающую трещину до тех пор, пока напряжение изгиба стружки не превысит предела прочности, и она не сломается. При дальнейшем движении инструмента процесс повторяется. При этом опережающая трещина может идти в сторону обработанной поверхности, что приводит к заколкам, а следовательно, и к значительному снижению качества обработки.

При механической обработке деталей из композитов возникает много трудностей, связанных со спецификой процесса резания неметаллических композитов: низкий ресурс инструмента, появление на обработанной поверхности различных дефектов [12, 13].

Принимая во внимание особенности физико-механических свойств композиционных материалов, можно прийти к следующему выводу о необходимости поддержании режущего инструмента всегда в острозаточенном состоянии, что не всегда возможно. Тогда надо идти по пути заземления твердых слоев в мягких слоях.

Кроме того, при обработке композитов большое значение для увеличения стойкости резца имеет его заточка с минимальным радиусом округления режущей кромки. Поскольку разные инструментальные материалы имеют различные минимальные радиусы округления режущей кромки при заточке, то оптимальным будет тот, который позволяет получить минимальные значения радиуса закругления режущей кромки.

Режущие кромки из инструментальных сталей обычно заточены с $\rho = 2\div3$ мкм. По мере затупления кромки отклонение волокон увеличива-

ется, при этом они выдерживаются со стороны деформированной стружки, что приводит к появлению ворсистости.

Как показали опыт, при точении пластмасс и композитов удовлетворительная обработка наблюдалась в течение 5–6 минут резания, далее инструмент следует перезатачивать.

Авторами разработана конструкция резцовой головки, которая позволит улучшить качество поверхности, учесть недостатки и повысить

стойкость в 8–10 раз, что составит 55–60 минут. Резцовая головка состоит из чернового и чистового резцов. Рассмотрим подробно конструкцию чернового резца.

Опытным путем подбирались геометрические параметры чистового резца, назначение которого – обеспечить требуемое качество обработки. Внешний вид чистового резца, схема его работы и геометрические параметры приведены на рисунке 4.

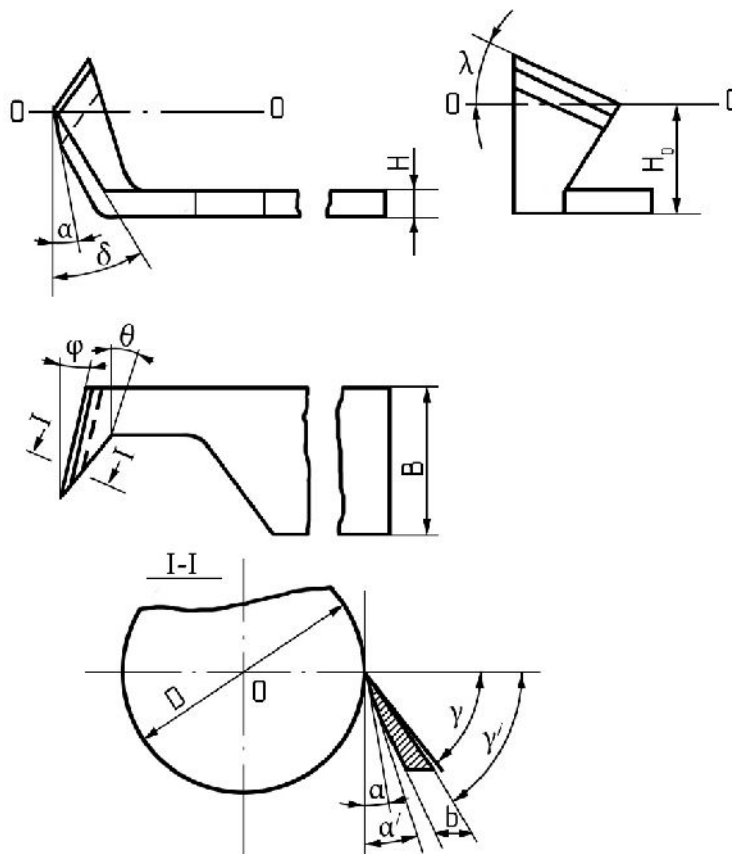


Рис. 4. Внешний вид чистового резца

Угол отклонения главной режущей кромки от горизонтальной плоскости λ рекомендуется для обработки более твердых материалов –

10+20°, средних- 25÷30° и мягких – 40+45° (таблица 1).

Таблица 1

Параметры углов чистового резца

α^0	α'^0	γ^0	γ'^0	δ^0	φ^0	Θ^0	λ^0	B, мм
4-6	6-8	55-60	60-65	27-30	2-10	6-8	10-45	2-5

Рассмотрим конструкцию резцовой головки, включающей в себя черновой и чистовой резцы, состоящей из корпуса 1, резца 2 для чернового точения, резца 3 для чистового точения, установочных клиньев 4 и крепежных винтов 5 (рис. 5).

Параметр «а» менялся прокладками, которые определяют величину перекрытия режущей кромкой чистового резца, то есть чистовой резец

срезает слой прижатой задней поверхностью чернового резца.

Величина «в» меняется взаимным расположением резцов и определяет глубину резания чистовым резцом. Лучшие результаты получены при $v = 1$ мм, при увеличении этого значения повысилась степень деформации стружки и обработанной поверхности чистовым резцом, при

уменьшении неровности после чернового точения не полностью срезались чистовым резцом.

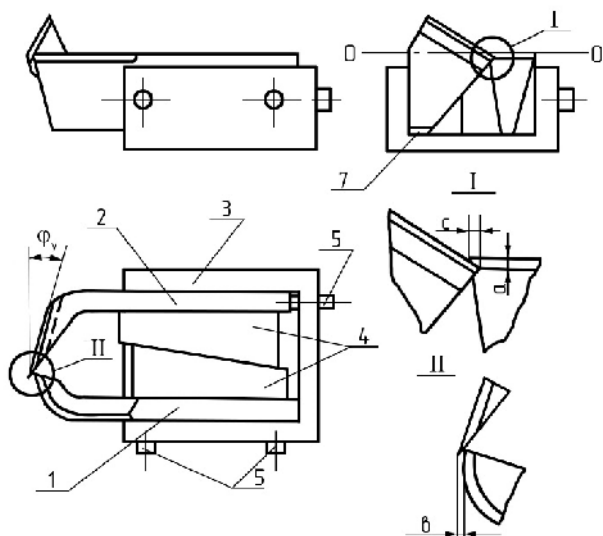


Рис. 5. Конструкция резцовой головки с черновым и чистовым резцами

Величина «с» также менялась взаимным расположением резцов и определяла перекрытие главной режущей кромки чистового резца черновым, лучшие результаты получены при $C = 1 \div 1,2$ мм. Увеличение этого размера ведет к усиленному дроблению срезаемой стружки чистовым резцом, что затрудняло ее сход с его передней поверхности, при уменьшении – улучшалось качество обработки.

Процесс обработки протекает так: черновой резец режет по принципу «свободного» резания, однако, в отличие от обычного резца задняя поверхность прижимается к обработанной поверхности заготовки по большей длине, что обеспечивает предотвращение вырова, заколов чистовым резцом, который срезает слой, зажаты между задней поверхностью чернового резца и передней – чистового, и, следовательно, исключается появление опережающей трещины при точении чистовым резцом.

Выводы. Как показали опыты, точение предложенной резцовой головкой композиционных материалов обеспечивает волнистость поверхности меньше 1 мкм при подачах 0,4 – 2 мм/об, ворсистость незначительна, а при достаточной жесткости заготовки обработанная поверхность приобретает гляцевый вид. Припуск на обработку практически не влияет на ее качество при достаточной жесткости заготовки, что позволяет вести обработку за один проход.

Данная резцовая головка используется для торцевой обработки плоских поверхностей. С этой целью было изготовлено 10 резцовых головок, которые устанавливались на диске с одина-

ковым вылетом чистовых резцов. Диску сообщалось вращательное движение как торцевой фрезе, а резцовые головки выполняли роль режущих зубьев.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сосенушкин Е.Н. Технологические процессы и инструменты для изготовления деталей из пластмасс, резиновых смесей, порошковых и композиционных материалов: учебное пособие/ Санкт-Петербург: Лань, 2018.300 с.
2. Галимов Э.Р., Абдуллин А.Л. Современные конструкционные материалы для машиностроения: учебное пособие. 3-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2020.268 с.
3. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. М.: Техносфера, 2004.408 с.
4. Конструкционные композиционные материалы. Под ред. Е.Н.Каблова. М.: ФГУП ВИАМ, 2012.58 с.
5. Deborah, D.L. Composite materials: science and applications. Functional materials for modern technologies> Printed in Great Britain, 2004.293p.
6. Шевченко А.А. Физикохимия и механика композиционных материалов: Учебное пособие для вузов. СПб.: ЦОП «Профессия», 2010. 224 с.
7. Иванов Д.А., Ситников А.И., Шляпин С.Д., Ильин А.А. Композиционные материалы: учебное пособие для вузов/ Москва: Издательство Юрайт, 2019. 253 с.
8. Растяжение и сжатие волокон. [Электронный ресурс] URL: <http://stilin.ru/struktura-i-svoystva-kompozitov/209-rastyazhenie-i-szhatie-vdol-volon.html> (дата обращения 30.06.2015)
9. Зубарев Ю.М., Приемышев А.В. Особенности изнашивания инструментальных материалов при механической обработке резанием заготовок из полимерных композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. 2018. № 7 (85). С. 27–31.
10. Ярославцев В.М. Обработка резанием полимерных композиционных материалов: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 180 с.
11. Aronson R. Modern materials in mechanical engineering: their features and applications // Manufacturing Engineering, 2002.V. 127, № 3. P. 123-136.
12. Гладков С.О. Физика композитов: учебник для вузов. 2-е изд., испр. и доп. Москва: Издательство Юрайт, 2020.332 с.
13. Парфеньева И.Е. Технология конструкционных материалов: Учебное пособие. Москва: Учебное пособие, 2009.198 с.

14. Рычков Д.А., Янюшкин, А.С. Технология механической обработки композиционных материалов: монография. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2017. 224 с.

15. Титова И.В., Киселев И.С. Достоинства и недостатки композиционных материалов // Наука

и образование в современных условиях: материалы международной научной конференции. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», 2016. С. 307–313.

Информация об авторах

Титова Ирина Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации транспортных и технологических машин. E-mail: titovair@yandex.ru. Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I. Россия, 394087, Воронеж, ул. Мичурина, д.1.

Коноплин Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации транспортных и технологических машин. E-mail: aleksejj-konoplin@rambler.ru. Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I. Россия, 394087, Воронеж, ул. Мичурина, д.1.

Поступила 20.09.2020 г.

© Титова И.В., Коноплин А.Н., 2020

***Titova I.V., Konoplin A.N.**

Voronezh state agrarian University named after Emperor Peter I

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

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF MACHINING WITH THE DESIGN OF THE CUTTER FOR FINISH TURNING

Abstract. *The technological process of mechanical processing of composite materials is considered. A brief description of composite materials, their physical and mechanical properties, and their structure is studied. The features of processing of glass-reinforced plastics carbon fiber reinforced plastics, organic plastics and bioplastics are reflected. The processing of composites will be difficult due to reinforcement schemes, different fiber directions and types of continuous fiber laying. All this leads to certain requirements that will be imposed on the tool and its wear rate. Tool wear consists of different types of wear – adhesive, fatigue, abrasive-mechanical, chemical. When carrying out the cutting process, it is necessary to take into account the direction of reinforcement, and therefore the direction of processing of the cutting tool. Depending on the state of the surface layer, the cutting tool required for mechanical processing is considered. The justification of the need to improve the design of the cutting tool is given. The design of the cutting head has been developed for the cutting process. It consists of roughing and finishing cutters. The values of the design parameters of the tool head are considered and selected. The optimal cutting depth for the finishing tool is determined. The geometric parameters of the finishing tool are selected experimentally, the purpose of which is to provide the required quality of processing. Using experiments, the values of the angle of deviation of the main cutting edge from the horizontal plane are found. The design of the finishing tool is described in detail, which largely eliminates the disadvantages of processing. The appearance of a leading crack when turning with a finishing tool is excluded.*

Keywords: *composite materials, mechanical engineering, cutting tools, tool head, mechanical processing.*

REFERENCES

1. Sosnushkin E.N. Technological processes and tools for manufacturing parts from plastics, rubber mixtures, powder and composite materials [Tekhnologicheskiye protsessy i instrumenty dlya izgotovleniya detaley iz plastmass. rezinovykh smesey poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov]: textbook. Saint Petersburg: LAN, 2018. 300 p. (rus)

2. Matthews F., Rawlings R. Composite materials [Kompozitnyye materialy]. Moscow: Technosphere, 2004. 408 p. (rus)

3. Structural composite materials [Konstruktsionnyye kompozitsionnyye materialy]. Under the editorship of E. N. Kablova. M.: FSUE VIAM, 2012. 58 p. (rus)

4. Galimov E.R., Abdullin A.L. Modern construction materials for mechanical engineering: textbook [Sovremennyye konstruktsionnyye materialy dlya mashinostroyeniya]. 3rd ed., ster. Saint Petersburg: LAN, 2020. 268 p. (rus)

5. Deborah D.L. Composite materials: science and applications. Functional materials for modern technologies> Printed in Great Britain, 2004. 293p.

6. Shevchenko A.A. Physical chemistry and mechanics of composite materials [Fizikokhimiya i mekhanika kompozitsionnykh materialov]: Textbook for universities. St. Petersburg: PSC "Profession", 2010. 224 p. (rus)
7. Ivanov D.A., Sitnikov A.I., Shlyapin S.D., Ilyin A.A. Composite materials [Kompozitsionnyye materialy]: a textbook for universities. Moscow: Yurayt publishing house, 2019. 253 p. (rus)
8. Tension and compression fibers. [Electronic resource] URL: <http://stilin.ru/struktura-i-svoystva-kompozitov/209-rastyazhenie-i-szhatie-vdol-volokon.html> (accessed 30.06.2015)
9. Zubarev Yu.M., Priemyshev A.V. Features of wear of tool materials during mechanical processing by cutting blanks From polymer composite materials [Osobennosti iznashivaniya instrumentalnykh materialov pri mekhanicheskoy obrabotke rezaniyem zagotovok iz polimernykh kompozitsionnykh materialov]. High-tech technologies in mechanical engineering. 2018. No. 7 (85). Pp. 27–31. (rus)
10. Yaroslavtsev V.M. Cutting processing of polymer composite materials [Obrabotka rezaniyem polimernykh kompozitsionnykh materialov]: textbook. manual Moscow : publishing house of Bauman Moscow state technical University, 2012. 180 p.: (rus)
11. Aronson R. Modern materials in mechanical engineering: their features and applications. R. Aronson. Manufacturing Engineering, 2002. V. 127, no. 3. Pp. 123–136
12. Gladkov S.O. Physics of composites [Fizika kompozitov]: textbook for universities. 2nd ed., ISPR. and add. Moscow: Yurayt publishing house, 2020. 332 p. (rus)
13. Parfeneva I.E. Technology of structural materials [Tekhnologiya konstruktivnykh materialov]: Textbook. Moscow: Textbook, 2009. 198 p.
14. Rychkov D.A., Yanushkin, A.S. Technology of mechanical processing of composite materials [Tekhnologiya mekhanicheskoy obrabotki kompozitsionnykh materialov]: monograph. Stary Oskol: Thin science-intensive technologies, 2017. 224 p. (rus)
15. Titova I.V., Kiselev I.S. Advantages and disadvantages of composite materials [Dostoinstva i nedostatki kompozitsionnykh materialov]. Science and education in modern conditions: materials of the international scientific conference. Voronezh: Voronezh state agrarian University named after Emperor Peter I, 2016, Pp. 307–313. (rus)

Information about the authors

Titova, Irina V. PhD, Assistant Professor. E-mail: titovair@yandex.ru. Voronezh state agrarian University named after Emperor Peter I. Russia, 394087, Voronezh, Michurina str., 1

Konoplin, Alexey N. PhD, Assistant Professor. E-mail: aleksejj-konoplin@rambler.ru Voronezh state agrarian University named after Emperor Peter I. Russia, 394087, Voronezh, Michurina str., 1

Received 20.09.2020

Для цитирования:

Титова И.В., Коноплин А.Н. Совершенствование технологического процесса механической обработки с разработкой конструкции резца для чистового точения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 10. С. 84–90. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-84-90

For citation:

Titova I.V., Konoplin A.N. Improvement of technological process of machining with the design of the cutter for finish turning. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 10. Pp. 84–90. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-84-90

Научное издание

«Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова»
№ 10, 2020 г.

Научно-теоретический журнал

Координатор журнала
Алфимова Наталия Ивановна

Редактор журнала
Агеева Марина Сергеевна

Компьютерная верстка
Яшкина Светлана Юрьевна

Перевод на английский язык
Колесник Оксана Юрьевна

Учредитель журнала – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

Журнал зарегистрирован Министерством РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовой информации ПИ №ФС 77-26533 от 07.12.2006

Подписано в печать 28.10.20. Формат 60×84/8
Усл. печ. л. 10,46. Уч.-изд. л. 11,25
Тираж 40 экз. Заказ 144. Цена договорная.
Все публикуемые материалы представлены в авторской редакции.

Адрес редакции: г. Белгород, ул. Костюкова, 46, оф. 724/4 Гк.
Номер сверстан в редакции научно-теоретического журнала
«Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова».
Отпечатано в РИЦ БГТУ им. В.Г. Шухова