

Научно-теоретический журнал

# Вестник

Белгородского государственного технологического  
университета им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

9

2019

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**

**№ 9, 2019 год**

# **Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова**

## **научно-теоретический журнал**

К рассмотрению и публикации в НТЖ «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова» принимаются научные статьи и обзоры по фундаментальным и прикладным вопросам в области строительства, архитектуры, произ

водства 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](mailto: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](mailto: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. Ставрополь).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**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).

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

**Потапов Евгений Эдуардович**, д-р хим. наук, проф. МИРЭА – Российского технологического университета (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 Blagoevich**, PhD, Professor, Higher Technical School of Professional Education in Nish (Republic of Serbia, Nish).

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

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

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

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

**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).

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

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

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

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

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

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

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

|                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Сулейманова Л.А., Малюкова М.В., Слепухин А.С., Крушельницкая Е.А., Толстой А.Д.<br>ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ С ГИДРОФОБИЗИРУЮЩИМ ЭФФЕКТОМ<br>НА ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОПРЕССОВАННЫХ<br>ИЗДЕЛИЙ | 8  |
| Шелковникова Т.И., Баранов Е.В., Черкасов С.В., Пряженцева Е.А.<br>ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СБОРА И ПЕРЕРАБОТКИ БОЯ СТЕКЛА И ПРИМЕНЕНИЕ<br>ИЗДЕЛИЙ НА ЕГО ОСНОВЕ                                                              | 14 |
| Чапидзе О.Д., Жуков Д.И.<br>МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МНОГОЭТАЖНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО КАРКАСА ПОСЛЕ<br>ОГНЕВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ                                                                                                            | 22 |
| Солодов Н.В., Водяхин Н.В., Ищук Я.Л.<br>ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НАХЛЕСТОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ<br>ТОНКОЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ                                                                                                    | 30 |
| Наумов А.Е., Шевченко А.В., Долженко А.В., Бодяков С.Н., Гвасалия Х.Д.<br>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ КОНТАКТА ПЛАСТИКОВОЙ ТРУБЫ И БЕТОНА<br>ПРИ РАСЧЕТЕ ПЛАСТИКОТРУБОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ                                       | 38 |
| Коркина Е.В., Войтович Е.В., Плющенко Н.Ю., Столяров М.Д.<br>ТЕПЛОПОСТУПЛЕНИЯ НА ФАСАД ЗДАНИЯ В ЗАСТРОЙКЕ<br>ПРИ УЧЕТЕ ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ                                                                               | 46 |
| Буланин В.А.<br>АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИСТОЧНИКА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ                                                                                                                                               | 54 |
| Серебрякова М.В.<br>ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ С УЧЁТОМ ТРЕБОВАНИЙ<br>ИНСОЛЯЦИИ И СОЛНЦЕЗАЩИТЫ                                                                                                                   | 63 |
| Горожанкин В.К.<br>СЦЕНАРИИ И ПОСТ-ПРОЕКТНЫЕ ПРОГРАММЫ АРХИТЕКТУРЫ                                                                                                                                                          | 72 |
| Федоров А.М., Скопинцев А.В.<br>СРЕДСТВА ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНО-ХУДОЖЕСТВЕННОЙ<br>ВЫРАЗИТЕЛЬНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ОБЩЕСТВЕННО-ДЕЛОВЫХ ЦЕНТРОВ                                                                                | 79 |
| Абасс Х.С.<br>ПРЕДПОСЫЛКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЕВРОПЕЙСКИХ ТЕНДЕНЦИЙ В АРХИТЕКТУРЕ<br>ДАМАСКА ПЕРИОДА ФРАНЦУЗСКОГО МАНДАТА                                                                                                       | 84 |

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

|                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Куделин Д.В., Несиоловская Т.Н., Ветошкин А.Б.<br>ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ИСПЫТАНИЯ НА СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЗИНОВЫХ<br>МЕМБРАН НА ОСНОВЕ АМОРФНЫХ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ | 92 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

|                                                                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Голдобина В.Г.<br>ТОЧНОСТЬ ЗЕНКЕРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ПОСЛЕ СВЕРЛЕНИЯ                                                                                                    | 99  |
| Афонин А.Н., Мартынов Е.М., Макаров А.В.<br>СХЕМЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ<br>ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ РЕЗЬБ                                         | 106 |
| Хисамутдинов М.В., Коровин Я.С., Иванов Д.Я.<br>РАСШИРЕННЫЙ ИНТЕРФЕЙС ЧЕЛОВЕК-РОБОТ С ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТЬЮ                                                        | 113 |
| Семикопенко И.А., Латышев С.С., Воронов В.П., Беляев Д.А.<br>КИНЕТИКА РАЗРУШЕНИЯ ЧАСТИЦ МАТЕРИАЛА В ДЕЗИНТЕГРАТОРЕ<br>В РАМКАХ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА               | 121 |
| Гапоненко Е.В., Рыбак Л.А., Холошевская Л.Р.<br>СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ<br>С ПРИВОДНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ НА ОСНОВЕ КАБЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ | 126 |
| Никитина И.П., Поляков А.Н., Уткин И.А.<br>УСТАНОВКА ФОРМОВАНИЯ ДРЕВЕСНО-БЕТОННЫХ ПЛИТ                                                                               | 137 |
| К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ                                                                                                                                                 | 146 |

## CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

|                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Suleymanova L.A., Maliukova M.V., Slepukhin A.S., Krushelnickaya E.A., Tolstoj A.D.</b><br>INFLUENCE OF MODIFYING AGENT WITH HYDROPHOBIZATION EFFECT ON INCREASE<br>OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF VIBROCOMPRESSED PRODUCTS | 8  |
| <b>Shelkovnikova T.I., Baranov E.V., Cherkasov S.V., Pryzhentseva E.A.</b><br>PROBLEMS AND PROSPECTS OF COLLECTION AND PROCESSING OF BATTLE GLASS<br>AND APPLICATION OF PRODUCTS ON ITS BASIS                                     | 14 |
| <b>Chapidze O.D., Zhukov D.I.</b><br>MODAL ANALYSIS OF MULTILEVEL CONCRETE FRAMEWORK AFTER FIRE EXPOSURE                                                                                                                          | 22 |
| <b>Solodov N.V., Vodyahin N.V., Ishchuk Y.L.</b><br>IMPROVING THE STRENGTH OF HARNESSING CONNECTION OF THIN-SHEET PLATES                                                                                                          | 30 |
| <b>Naumov A.E., Shevchenko A.V., Dolzhenko A.V., Bodiakov S.N., Gvasalia K.D.</b><br>RESEARCH OF STRENGTH OF CONTACT OF THE PLASTIC PIPE AND CONCRETE WHEN<br>CALCULATING PLASTIC PIPE CONCRETE STRUCTURES                        | 38 |
| <b>Korkina E.V., Voytovich E.V., Plyushchenko N.Yu., Stolyarov M.D.</b><br>HEAT ACCESS ON THE FACADE BUILDING IN THE DEVELOPMENT WHEN TAKING INTO<br>ACCOUNT HEAT EXCHANGE BY RADIATION                                           | 46 |
| <b>Bulanin V.A.</b><br>THE ALGORITHM OF ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY OF HEAT SUPPLY SOURCE                                                                                                                                       | 54 |
| <b>Serebryakova M.V.</b><br>FOREIGN EXPERIENCE OF DESIGN OF BUILDINGS SUBJECT TO THE REQUIREMENTS<br>OF INSULATION AND SUN PROTECTION                                                                                             | 63 |
| <b>Gorozhankin V.K.</b><br>SCENARIOS AND POST-DESIGN PROGRAMS OF ARCHITECTURE                                                                                                                                                     | 72 |
| <b>Fedorov A.M., Skopintsev A.V.</b><br>MEANS OF FORMING ARCHITECTURAL AND ARTISTIC EXPRESSION OF MODERN<br>PUBLIC-BUSINESS CENTERS                                                                                               | 79 |
| <b>Abass H.S.</b><br>BACKGROUND OF THE DISTRIBUTION OF EUROPEAN TRENDS IN ARCHITECTURE<br>OF DAMASK DURING THE FRENCH MANDATE                                                                                                     | 84 |

## CHEMICAL TECHNOLOGY

|                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Kudelin D.V., Nesiolovskaya T.N., Vetoshkin A.B.</b><br>AN INFLUENCE OF TEST CONDITIONS ON STRUCTURAL CHANGES OF RUBBER<br>MEMBRANES BASED ON AMORPHOUS AND CRYSTALLINE POLYMERS | 92 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

|                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Goldobina V.G.</b><br>ACCURACY OPENING OF HOLES AFTER DRILLING                                                                                                             | 99  |
| <b>Afonin A.N., Martynov E.M., Makarov A.V.</b><br>HETEROGENEOUS HARDENING OF MACHINES PARTS BY SURFACE PLASTIC<br>DEFORMATION                                                | 106 |
| <b>Khisamutdinov M.V., Korovin I.S., Ivanov D.Ya.</b><br>ADVANCED HUMAN-ROBOT INTERFACE WITH AUGMENTED REALITY                                                                | 113 |
| <b>Semikopenko I.A., Latyshev S.S., Voronov V.P., Belyaev D.A.</b><br>FRACTURE KINETICS OF THE MATERIAL PARTICLES IN DISINTEGRATOR USING<br>STATISTICAL APPROACH              | 121 |
| <b>Gaponenko E.V., Rybak L.A., Kholoshevskaya L.R.</b><br>STRUCTURAL ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF ROBOTIC SYSTEMS WITH DRIVING<br>MECHANISMS ON THE BASIS OF CABLE ELEMENTS | 126 |
| <b>Nikitina I.P., Polyakov A.N., Utkin I.A.</b><br>INSTALLATION OF FORMING WOOD-CONCRETE PLATES                                                                               | 137 |
| <b>FOR THE INFORMATION OF FOLLOWERS</b>                                                                                                                                       | 146 |



# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/article\_5da44154d5e735.90950690

*\*Сулейманова Л.А., Малюкова М.В., Слепухин А.С., Крушельницкая Е.А., Толстой А.Д.*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46*

*\*E-mail: LudmilaSuleimanova@yandex.ru*

## ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ С ГИДРОФОБИЗИРУЮЩИМ ЭФФЕКТОМ НА ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОПРЕССОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ

**Аннотация.** В статье рассмотрен метод объемной гидрофобизации путем введения модифицирующих добавок с гидрофобизирующим эффектом непосредственно в бетонную смесь на стадии перемешивания и приведена оценка степени их влияния на физико-механические свойства вибропрессованных изделий, изготовленных на технологической линии с применением рациональных составов с оптимально подобранной гранулометрией, водоцементным отношением и параметрами формования, геометрические размеры формуемых изделий соответствовали требуемым размерам и допускам, внешний вид лицевой поверхности соответствовал категории АЗ. Выявлено повышение эксплуатационных характеристик вибропрессованных плит бетонных тротуарных при применении полифункциональных модифицирующих добавок с гидрофобизирующим эффектом – Murasan BWA 17 и SikaPaver AE-2 в количестве 0,5 % от массы цемента, при этом установлено увеличение прочности на сжатие бетона плит на 23 %, морозостойкости на 50 циклов и уменьшение водопоглощения до 45 %, что позволит повысить долговечность мелкоштучных изделий. А введение объемного модификатора-гидрофобизатора Аквасил, исключительно с моносвойством к снижению водопоглощения, оказывает отрицательную роль на прочностные характеристики вибропрессованных изделий со снижением прочности бетона на сжатие на 12 %.

**Ключевые слова:** модифицирующая добавка с гидрофобизирующим эффектом, вибропрессованные изделия, плиты бетонные тротуарные, эксплуатационные характеристики.

**Введение.** Долговечность мелкоштучных изделий, изготовленных методом полусухого вибропрессования, зависит от множества факторов, одним из которых является уровень организации защиты от агрессивного атмосферного воздействия и, в первую очередь, влаги. На практике применяются два принципиально разных способа решения этой задачи – гидроизоляция и гидрофобизация.

Гидроизоляция предполагает создание на поверхности защищаемых конструкций слоя водо- и паронепроницаемого материала определенной толщины или пропитку строительных изделий органическим вяжущим, закрывающим поры. Принцип действия гидроизоляции хорошо известен и освещен в научных публикациях, посвященных этому вопросу, однако, для вибропрессованных изделий этот способ практически не применяется.

Гидрофобизация – резкое снижение способности изделий и материалов смачиваться водой и водными растворами при сохранении паро- и газопроницаемости. Выделяют два вида гидрофобизации: объемный и поверхностный.

Гидрофобные покрытия часто называют водоотталкивающими, что является не совсем пра-

вильным, так как молекулы воды не отталкиваются от них, а притягиваются, но очень слабо. Гидрофобные покрытия в виде мономолекулярных (толщиной в одну молекулу) слоев или тонких пленок получают обработкой материала растворами, эмульсиями или (реже) парами гидрофобизаторов – веществ, слабо взаимодействующих с водой, но прочно удерживающихся на поверхности. В качестве гидрофобизаторов применяют соли жирных кислот, некоторых металлов (медь, алюминий, цирконий и другие), катионоактивные поверхностно-активные вещества (ПАВ), а также низко- и высокомолекулярные кремнийорганические фторорганические соединения [1].

Объемная гидрофобизация осуществляется для придания влагозащитных свойств строительным материалам путем введения гидрофобной добавки непосредственно в бетонную смесь на стадии перемешивания. На первый взгляд, объемная гидрофобизация – идеальный способ решения проблем снижения водопоглощения и капиллярного подсоса воды вибропрессованных изделий. Но есть одна большая проблема, подтвержденная множеством исследований, неправильно подобранный вид и дозировка добавки-гидрофобизатора снижает прочность изделий.

Для решения этой проблемы, гидрофобизатор в бетонную смесь для изготовления вибропрессованных изделий нужно вводить в комплексе с другими модификаторами, которые могут изменить воздействие гидрофобизатора на замедление гидратации цемента и повысить прочностные характеристики, при этом, не нарушив само свойство гидрофобности.

**Методология.** С целью оценки степени влияния модифицирующих добавок с гидрофобизирующим эффектом на качество вибропрессованных изделий были проведены сравнительные испытания вибропрессованных плит бетонных тротуарных ( $200 \times 100 \times 40$ ), изготовленных на технологической линии «HESS», состоящей из линии по производству бетона и раствора и бетоноформовочной линии MULTIMAT RH 1500-3 VA. Контролю подлежали физико-механические характеристики изделий (средняя плотность, прочность, морозостойкость и водопоглощение), а также внешний вид и геометрические размеры изделия. Дозировка модификатора составляла 0,5 % от массы цемента (соответствующая рекомендациям всех производителей). Для проведения исследований применялись отработанные на производстве составы с оптимальной гранулометрией заполнителей [2–8]. В/Ц соответствовало заданной удобоукладываемости и формовости изделий методом полусухого вибропрессования.

**Основная часть.** Производителям модификаторов бетона удалось получить эффективный продукт для производства вибропрессованных изделий – полифункциональную добавку с гидрофобизирующим эффектом, который является не основным, а скорее вторичным/третичным эффектом действия модификатора.

Продуктами такого вида являются:

– Модификатор Murasan BWA 17. Производитель заявляет, что продукт повышает формовость, связность и уплотняемость жестких смесей; придает поверхности изделий гидрофобные свойства; облегчает смачивание компонентов бетонной смеси; обеспечивает снижение шелушения поверхности; увеличивает плотность бетона; ускоряет набор прочности; повышает морозостойкость изделий; повышает качество лицевой поверхности готовых изделий; снижает капиллярное водопоглощение и высолообразование. Рекомендованная производителем дозировка модификатора составляет 0,1...1,5 % от массы цемента.

– Высокоэффективная добавка SikaPaver AE-2 для повышения плотности и прочности изделий из жестких и сверхжестких бетонных сме-

сей с гидрофобизирующим эффектом, препятствующая высолообразованию. Производитель заявляет, что продукт способствует быстрой укладке и уплотнению бетонной смеси; повышению плотности и прочности изделий; повышению морозостойкости изделий; снижению водопоглощения, капиллярного подсоса и высолообразования; приданию водоотталкивающих свойств изделиям; значительному снижению брака готовых изделий; снижению износа формообразующей опалубки. Рекомендованная производителем дозировка модификатора составляет 0,2...1,0 % от массы цемента.

– Гидрофобизатор Аквасил, принадлежащий к новому поколению отечественных водных кремнийорганических гидрофобизаторов. Производитель заявляет, что гидрофобизатор придает материалам максимальные водоотталкивающие (гидрофобные) свойства, не изменяющиеся в условиях эксплуатации в течение более 10 лет; устойчив к действию дождя, снега и механическим воздействиям (абразивное действие пыли, вибрация, удары, мытье и т.д.); увеличивает морозо- и коррозионную стойкость строительных материалов; улучшает удобоукладываемость бетонной смеси; предотвращает появление внутренних микротрещин; устраняет капиллярный подсос; сохраняет паро- и воздухопроницаемость материала, окраску и фактуру его поверхности; сохраняет внешний вид строительных материалов на длительный срок; обеспечивает антигрибковую защиту. Рекомендованная производителем дозировка модификатора составляет 0,4...0,5 % от массы цемента.

Составы для изготовления вибропрессованных плит бетонных тротуарных с применением модификаторов с гидрофобизирующими свойствами представлены в табл. 1.

Физико-механические характеристики плит бетонных с применением модификаторов с гидрофобизирующими свойствами представлены в табл. 2. и на рис. 1...4.

Анализируя полученные данные, следует отметить, что геометрические размеры образцов соответствовали требуемым размерам и допускам, а внешний вид лицевой поверхности соответствовал категории АЗ. Значение высоты капиллярного подсоса оказалось на одном уровне у образцов 2, 3 и 4 составов (табл. 1.). Изменение количества бракованной продукции при применении модификаторов не выявлено, а при оценке степени износа формооснастки влиянием модификатора пренебрегают, так как значительное влияние оказывают состояние оборудования, качество самой формооснастки и применяемые заполнители в формируемой бетонной смеси.

Таблица 1

**Составы для изготовления вибропрессованных плит бетонных тротуарных с применением модификаторов с гидрофобизирующими свойствами**

| Номер состава | Расход материалов, кг/м <sup>3</sup> |                              |                             |      | В/Ц  | Модификаторы, кг/м <sup>3</sup> |                |         |
|---------------|--------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------|------|---------------------------------|----------------|---------|
|               | Цемент ЦЕМ I 42,5 Н                  | Песок, М <sub>кр</sub> = 2,3 | Песок, М <sub>кр</sub> =1,5 | Вода |      | Murasan BWA 17                  | SikaPaver AE-2 | Аквасил |
| 1             | 460                                  | 1360                         | 340                         | 184  | 0,4  | -                               | -              | -       |
| 2             | 460                                  | 1360                         | 340                         | 175  | 0,38 | 2,3                             | -              | -       |
| 3             | 460                                  | 1360                         | 340                         | 170  | 0,37 | -                               | 2,3            | -       |
| 4             | 460                                  | 1360                         | 340                         | 184  | 0,4  | -                               | -              | 2,3     |

Таблица 2

**Физико-механические характеристики плит бетонных тротуарных с применением модификаторов с гидрофобизирующими свойствами**

| Номер состава | Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> | Прочность бетона плит при сжатии, МПа, в возрасте, сут. |      |      | Водопоглощение, % | Морозостойкость    |
|---------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------|------|------|-------------------|--------------------|
|               |                                      | 1                                                       | 3    | 28   |                   |                    |
| 1             | 2280                                 | 20,4                                                    | 28,2 | 45,3 | 5,5               | F <sub>2</sub> 150 |
| 2             | 2295                                 | 28,3                                                    | 35,3 | 55,5 | 3,3               | F <sub>2</sub> 200 |
| 3             | 2290                                 | 26,3                                                    | 32,1 | 50,1 | 4,2               | F <sub>2</sub> 200 |
| 4             | 2283                                 | 18,2                                                    | 25,2 | 40,3 | 3,0               | F <sub>2</sub> 100 |

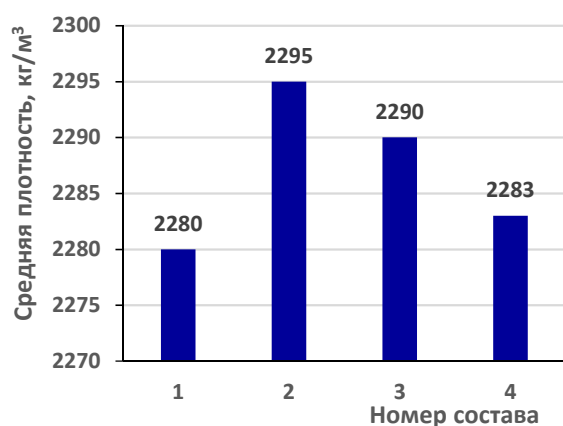


Рис. 1. Зависимость средней плотности вибропрессованных плит бетонных тротуарных от состава (табл. 1.) и вида модификатора с гидрофобизирующими свойствами

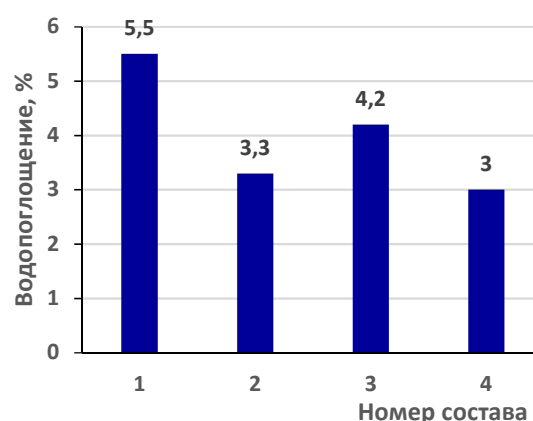


Рис. 3. Зависимость водопоглощения вибропрессованных плит бетонных тротуарных от состава (табл. 1.) и вида модификатора с гидрофобизирующими свойствами

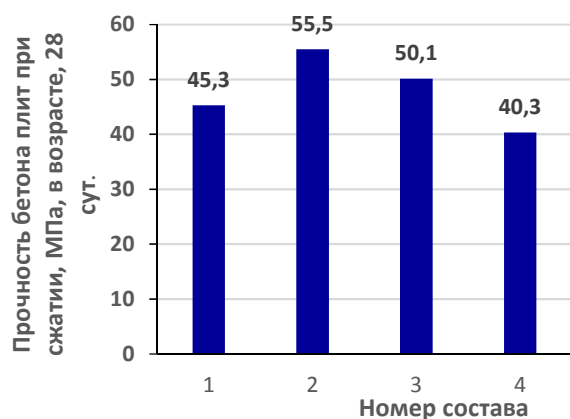


Рис. 2. Зависимость прочности вибропрессованных плит бетонных тротуарных от состава (табл. 1.) и вида модификатора с гидрофобизирующими свойствами

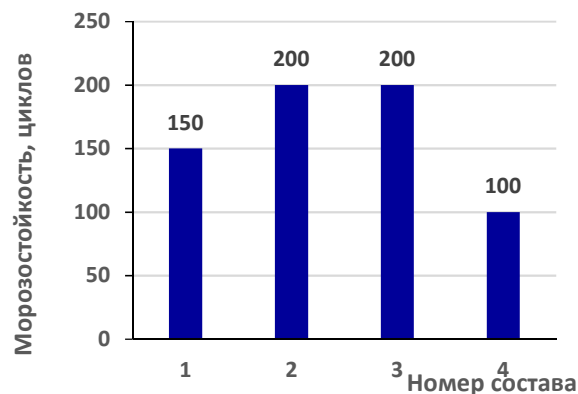


Рис. 4. Зависимость морозостойкости вибропрессованных плит бетонных тротуарных от состава (табл. 1.) и вида модификатора с гидрофобизирующими свойствами

В процессе формования было выявлено, что равномерное заполнение жесткой бетонной смесью всех ячеек формы и подбор оптимальных параметров формования методом полусухого вибропрессования плит бетонных тротуарных быстрее и корректнее осуществлялись с применением бетонной смеси, модифицированной добавками Murasan BWA 17 и SikaPaver AE-2 [2, 9].

Для объективной оценки степени снижения высолообразования вибропрессованных изделий, изготовленных с применением полифункциональных модификаторов, проводятся дополнительные исследования. Так как применение подобных модификаторов, само по себе, не снижает общей пористости изделия, а лишь придает их поверхности свойство относительной несмачиваемости без закупорки пор. Высолы имеют разный химический состав и разнообразное происхождение, они могут присутствовать в вибропрессованном изделии изначально, и по составу это могут быть не только стандартные кальциевые отложения, но еще и соли меди, железа и др. Пока действует эффект пониженного капиллярного подсоса, миграция влаги с выносом высолов на поверхность исключена.

**Выводы.** Введение полифункциональных модифицирующих добавок с гидрофобизирующим эффектом действительно оказывает значительное влияние на повышение эксплуатационных характеристик вибропрессованных изделий (прочность бетона плит увеличилась на 11...23 %, водопоглощение снизилось на 24...45 %, морозостойкость увеличилась с F<sub>2</sub> 150 до F<sub>2</sub> 200), не снижая при этом прочностных характеристик. Однако, следует отметить, что введение объемного модификатора-гидрофобизатора Аквасил, исключительно с моносвойством к снижению водопоглощения, оказывает отрицательную роль на прочностные характеристики вибропрессованных изделий со снижением прочности бетона на сжатие на 12 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Łukasik Z., Kozyra J., Kuśmińska-Fijałkowska A. The application of technology of vibropressed fiber-reinforced concrete to production of elements of technical infrastructure used in the power industry // AIP Conference Proceedings. 2018. № 2008. № 020003.
2. Esenkov I.I., Kramarenko A.V. Practical researches to increase leaching resistance on fine concrete for vibropressed product // Materials Science Forum. 2018. 931 MSF. Pp. 589–593.
3. Толстой А.Д., Лесовик В.С., Новиков К.Ю. Высокопрочные бетоны на композиционных вяжущих с применением техногенного сырья // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. № 2 (17). С. 174–180.
4. Толстой А.Д., Лесовик В.С., Ковалева И.А., Якимович И.В., Лукутцова Н.П. Высокопрочные материалы для декоративных целей // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 8. С. 51–53.
5. Łukasik Z., Kuśmińska-Fijałkowska A., Kozyra, J., Iszańska, S. Production of transport infrastructure elements using vibro-pressed fiber concrete technology // (2018) Transport Means - Proceedings of the International Conference, 2018-October, pp. 1002–1007.
6. Chandrappa A.K., Rishabh M., Krishna Prapoorna B. Laboratory Investigations and Field Implementation of Pervious Concrete Paving Mixtures // Advances in civil engineering materials. 2018. Т. 7. № 1. С. 447–462.
7. Сураев В.А. Гидрофобизация. Теория и практика // Технологии строительства. 2002. №1 (17). С. 120–121.
8. Wamke A., Makowiecki J., Dopierała K., Karasiewicz J., Prochaska K. Hydrophobic ultrathin films formed by fluorofunctional cage silsesquioxanes // Applied Surface Science. 2018. №443. Pp. 280–290.
9. Bilyukevich A.V., Plisko T.V., Usosky V.V., Ovcharova A.A., Volkov V.V. Hydrophobization of polysulfone hollow fiber membranes // Petroleum Chemistry. 2018. Т. 58. №4. Pp. 279–288.
10. Yu Miao, Li Peijia, Feng Yufei. Positive effect of polymeric silane-based water repellent agents on the durability of superhydrophobic fabrics // Applied surface science. 2018. Т. 450. С. 492–501.
11. Wamke A., Makowiecki J., Dopierała, K. Hydrophobic ultrathin films formed by fluorofunctional cage silsesquioxanes // Applied surface science. 2018. Т. 443 С. 280–290.
12. Buczek B., Vogt E. Investigation of surface and rheology properties of modified lime dust // Gospodarka surowcami mineralnymi-mineral resources management. 2010. Т. 26. № 1. С. 73–81.
13. Kharkhardin A.N., Suleimanova L.A., Kara K.A., Malyukova M.V., Kozhukhova N.I. The determination of topological properties in polydispersed mixtures on the results of sieve laser and particle size analysis // World Applied Sciences Journal. 2013. Т. 25. № 2. С. 347–353.
14. Сулейманова Л.А., Малукова М.В. Вибропрессованные плиты бетонные тротуарные с полифункциональной матрицей. Белгород, 2014. 144 с.
15. Suleymanova L.A., Kara K.A., Malyukova M.V., Suleymanov K.A. The influence of technological factors on the basic properties of vibropressed concrete paving slabs // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Т. 9. № 11. С. 874–878.

## Информация об авторах

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

**Малюкова Марина Валерьевна**, кандидат технических наук, старший преподаватель. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

**Слепухин Алексей Сергеевич**, аспирант. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

**Крушельницкая Екатерина Александровна**, аспирант. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

**Толстой Александр Дмитриевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

Поступила в августе 2019 г.

© Сулейманова Л.А., Малюкова М.В., Слепухин А.С., Крушельницкая Е.А., Толстой А.Д., 2019

**\*Suleymanova L.A., Maliukova M.V., Slepukhin A.S., Krushelnickaya E.A., Tolstoj A.D.**

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

*Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46*

*\*E-mail: LudmilaSuleimanova@yandex.ru*

## INFLUENCE OF MODIFYING AGENT WITH HYDROPHOBIZATION EFFECT ON INCREASE OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF VIBRO-PRESSED PRODUCTS

**Abstract.** In the article the method of volumetric hydrophobization by insertion of modifying agents with hydrophobization effect directly in concrete mixture on the stage of mixing is considered and the degree of their influence on physics-mathematics properties of vibropressed products which made on technological line with optimal granulometry, water to cement proportion and parameters of forming is estimated, so that the geometrical dimensions of moulded products satisfy required sizes and limits, and appearance of front-face area satisfied A3 category. There was established the increase of operational characteristics of concrete walkway vibropressed slabs when in use of polyfunctional modifying agents with hydrophobization effect – Mura-san BWA 17 and SikaPaver AE-2 in 0.5 % cement weight quantity, wherein there was found the increase of compressive strength of slabs on 23 %, frost resistance on 50 cycles and decrease of water absorption up to 45 % which allows increasing the longevity of small-pieces products. Insertion of volumetric modifier-hydrophobisator Akvasil, only with a mono-characteristic to decrease of water absorption, has negative role on strength characteristics of vibropressed products with decrease of concrete compressive strength by 12 %.

**Keywords:** modifying agents with hydrophobization effect, vibropressed products, concrete walkway slabs, operational characteristics.

### REFERENCES

1. Łukasik Z., Kozyra J., Kuśmińska-Fijałkowska A. The application of technology of vibropressed fiber-reinforced concrete to production of elements of technical infrastructure used in the power industry. AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2008. No. 020003.

2. Esenkov I.I., Kramarenko A.V. Practical researches to increase leaching resistance on fine concrete for vibropressed product. Materials Science Forum. 2018. Vol. 931 MSF. Pp. 589–593.

3. Tolstoj A.D., Lesovik V.S., Novikov K.Iu. High endurance concretes on composite bindings with the use of man-made raw materials

[Vysokoprochnye betony na kompozicionnyh vyazhushchih s primeneniem tekhnogennogo syr'ya]. Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost. 2016. Vol. 2 (17). Pp. 174–180. (rus)

4. Tolstoj A.D., Lesovik V.S., Kovaleva I.A., Yakimovitch I.V., Lukutsova N.P. High-strength materials for decorative purposes [Vysokoprochnye materialy dlya dekorativnyh celej]. Industrial and civil engineering. 2014. Vol. 8. Pp. 51–53. (rus)

5. Łukasik Z., Kuśmińska-Fijałkowska A., Kozyra J., Iszańska S. Production of transport infrastructure elements using vibro-pressed fiber concrete technology. Transport Means - Proceedings of the International Conference. 2018. Pp. 1002–1007.



6. Chandrappa A.K., Rishabh M., Krishna Prapoorna B. Laboratory Investigations and Field Implementation of Pervious Concrete Paving Mixtures. *Advances in civil engineering materials*. 2018. Vol. 7(1). Pp. 447–462.

7. Suraev V.A. Hydrophobization. Theory and practice [Gidrofobizaciya. Teoriya i praktika]. *Tekhnologii stroitel'stva*. 2002. Vol. 1 (17). Pp. 120–121. (rus)

8. Wamke A., Makowiecki J., Dopierala K., Karasiewicz J., Prochaska K. Hydrophobic ultrathin films formed by fluorofunctional cage silsesquioxanes. *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 443. Pp. 280–290.

9. Bilyukevich A.V., Plisko T.V., Usosky V.V., Ovcharova A.A., Volkov V.V. Hydrophobization of polysulfone hollow fiber membranes. *Petroleum Chemistry*. 2018. Vol. 58(4). Pp. 279–288.

10. Yu Miao, Li Peijia, Feng Yufei. Positive effect of polymeric silane-based water repellent agents on the durability of superhydrophobic fabrics. *Applied surface science*. 2018. Vol. 450. Pp. 492–501.

11. Wamke A., Makowiecki J., Dopierala K. Hydrophobic ultrathin films formed by fluorofunctional cage silsesquioxanes. *Applied surface science*. 2018. Vol. 443. Pp. 280–290.

12. Buczek B., Vogt E. Investigation of surface and rheology properties of modified lime dust. *Gospodarka surowcami mineralnymi-mineral resources management*. 2010. Vol. 26(1). Pp. 73–81.

13. Kharkhardin A.N., Suleimanova L.A., Kara K.A., Malyukova M.V., Kozhukhova N.I. The determination of topological properties in polydispersed mixtures on the results of sieve laser and particle size analysis. *World Applied Sciences Journal*. 2013. Vol. 25(2). Pp. 347–353.

14. Suleymanova L.A., Malyukova M.V., Vibropressed concrete slabs with multifunctional matrix [Vibropressovannye plity betonnye trotuarnye s polifunkcional'noj matricej]. Belgorod: BGTU, 2014. 144 p. (rus)

15. Suleymanova L.A., Kara K.A., Malyukova M.V., Suleymanov K.A. The influence of technological factors on the basic properties of vibropressed concrete paving slabs. *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. Vol. 9(11). Pp. 874–878.

#### *Information about the authors*

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

**Maliukova, Marina V.** PhD, Senior lecturer. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Slepukhin, Aleksey S.** Postgraduate. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Krushelnickaya, Ekaterina A.** Postgraduate. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Tolstoj, Aleksandr D.** PhD, Senior lecturer. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received in August 2019*

#### **Для цитирования:**

Сулейманова Л.А., Малиюкова М.В., Слепухин А.С., Крушельницкая Е.А., Толстой А.Д. Влияние модифицирующей добавки с гидрофобизирующим эффектом на повышение эксплуатационных характеристик вибропрессованных изделий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 8–13. DOI: 10.34031/article\_5da44154d5e735.90950690

#### **For citation:**

Suleymanova L.A., Maliukova M.V., Slepukhin A.S., Krushelnickaya E.A., Tolstoj A.D. Influence of modifying agent with hydrophobization effect on increase of operational characteristics of vibropressed products. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 9. Pp. 8–13. DOI: 10.34031/article\_5da44154d5e735.90950690

DOI: 10.34031/article\_5da44ad180a513.69952350

**\*Шелковникова Т.И., Баранов Е.В., Черкасов С.В., Пряженцева Е.А.**

Воронежский государственный технический университет

Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-лет Октября, 84

\*E-mail: tschelk@mail.ru

## ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СБОРА И ПЕРЕРАБОТКИ БОЯ СТЕКЛА И ПРИМЕНЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ НА ЕГО ОСНОВЕ

**Аннотация.** Утилизация стекла и вторичная его переработка – это очень важное направление во всей отрасли по работе с отходами производства и жизнедеятельности человека. Она необходима для защиты окружающей природы, сбережения не возобновляемых природных химических элементов и ресурсов. В большинстве стран с развитой экономикой эта проблема интенсивно решается. Эффективность переработки утилизированного стекла достигает значительных объемов, так как это очень выгодно с экономической точки зрения. Экономическая и экологическая целесообразность утилизации стеклобоя в последние годы доказана практикой его использования как в нашей стране, так и в зарубежной практике. Основной проблемой в сборе стеклянных изделий является неорганизованность такого процесса в нашей стране и в мире в целом. Приведены данные об объемах, видах стеклобоя, источниках его образования, существующих и перспективных способах утилизации. Обсуждены мероприятия и законодательная база, которые могут позволить реорганизовать процесс сбора стеклобоя. Предложена схема применения искусственных пористых заполнителей из пеностекла, дающая широкое представление о целесообразности их использования.

**Ключевые слова:** переработка мусора, утилизация боя стекла, стеклобой, твердые коммунальные отходы, законопроект, искусственные пористые заполнители из пеностекла.

Мусор, отходы, свалка, экология, опасность, здоровье – слова, которые выстраиваются в один значимый и небезопасный ряд при размышлении о только что разбитом стеклянном предмете. Многим, однако, бытовые отходы представляются чем-то малозначимым и безопасным. А что же на самом деле?

На территории страны действует около 240 комплексов, которые перерабатывают мусор; 50 комплексов по сортировке отходов и где-то десятков мусоросжигательных заводов. Самыми крупными мусороперерабатывающими заводами России являются: Новокузнецкий, Курский мусороперерабатывающие заводы, где сортировочный процесс включает в себя сочетание ручного и машинного труда. За 1 час на линии можно переработать до 25 тонн мусора; мусоросортировочный завод «Чистый город» в Красноярске, за год перерабатывают около 730 тысяч тонн бытовых отходов; Оренбургский мусороперерабатывающий завод, в год способен принять и переработать до 250 тыс. тонн отходов; Московские мусороперерабатывающие заводы: ГУП «Спецзавод №2» [1]. Проблема сбора и последующей переработки вторичного сырья становится одной из наиболее актуальных для российской экономики. В европейских странах это направление давно является высококонкурентным и пробиться на этот рынок новым игрокам очень сложно, в отличие от России, где еще не научились делать деньги из мусора [2–5].

В бытовом мусоре ТКО (твердых коммунальных отходах) содержится и минеральная (негорючая) часть, которая представлена металлом, керамикой и стеклом. Стекло, попадающее в ТКО чаще всего представлено стеклобоем, содержание которого составляет 7 %. Основной частью стеклобоя является тарное стекло. Сегодня существует государственный стандарт на тарный стеклобой.

ГОСТом предусмотрена классификация тарного стеклобоя по цвету (таблица 1) и разделение по сортам на 1 и 2 в зависимости от содержания примесей зеленого и коричневого стекла в неокрашенном [6].

Таблица 1

Маркировка стеклобоя по цвету

| Марка стеклобоя | Цвет стеклобоя     |
|-----------------|--------------------|
| БС              | Бесцветный         |
| ПСТ             | Полубелый тарный   |
| ПСЛ             | Полубелый листовой |
| ЗС              | Зеленый            |
| КС              | Коричневый         |

Для оценки возможности использования стеклобоя в производстве строительных материалов был проведен анализ и составлена схема образования и путей его утилизации (рис. 1). Установлено, что основными источниками образования боя стекла являются: твердые коммунальные отходы, пищевая и фармацевтическая промышленности, бой специального и оконного стекла [7–14].

Потребителями стеклобоя выступают: стекольная промышленность, промышленность

строительных и теплоизоляционных материалов, дорожное строительство и прочие области.



Рис. 1. Диаграмма направлений использования стеклобоя

Лишь 3 % – это вторичная переработка боя стекла и производство новых изделий [7,15]. Доля стекла, попадающего в переработку достигает 20 %, а общий объем собранного стекла в 2009 году составил 3 277,2 тыс. тонн, объем стекла, попавшего в переработку в 2009 году, достиг 655,4 тыс. тонн.

Достаточно часто можно слышать, что стеклобоя в стране нет. Чтобы обоснованно ответить на это, нужно рассмотреть не только существующие, но и потенциальные источники стеклобоя.

По Центрально-Черноземному региону выявлено наличие 73 полигонов ТКО. Распределение полигонов по областям ЦЧР представлено на диаграмме (рис. 2). Лидирующими областями стали Воронежская и Белгородская области, а это значит, что при желании возможна организация сортировки и выделения стеклобоя. На сегодня уровень переработки стеклобоя в России составляет лишь 5–7 %, в то время как в странах Евросоюза перерабатывается до 60 % ТКО.

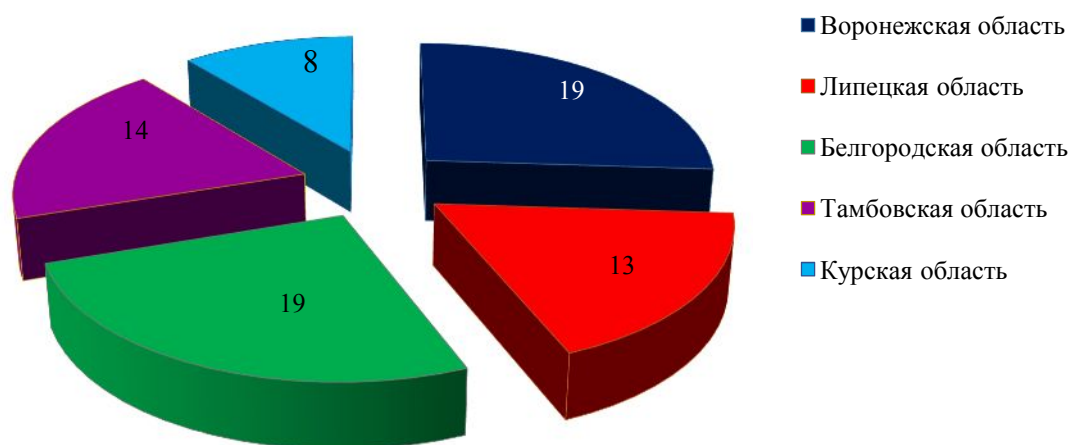


Рис. 2. Распределение полигонов ТКО по областям Центрально-Черноземного региона

Одним из весомых компонентов ТКО является бой стекла, который представляет весьма стойкий загрязнитель окружающей среды, поскольку практически не разлагается, представляет собой опасность для людей и животных.

Элементарные расчеты показывают, что каждый житель ежегодно выбрасывает 400 кг ТКО, при содержании стеклобоя 8 %, это составит 32 кг на человека. В северных регионах, откуда стеклобой не вывозится, наверняка накоплены его значительные объемы.

Для улучшения процесса сбора и переработки стеклобоя, а также интенсификации его использования в Российской Федерации был разработан новый порядок сбора и переработки мусора, а именно Госдумой утвержден законопроект «Об отходах производства и потребления» в 2014 году, а также в 2016 году было подготовлено постановление «Об утверждении порядка обращения с твердыми коммунальными отходами». Но эту законодательную базу так называемой «мусорной» реформы не удалось реализовать так быстро, как хотелось бы и ее отложили на 1 января 2019 года.

Основные нововведения данной реформы, это:

- Введение нового понятия твердых коммунальных отходов (ТКО);
- В каждом субъекте РФ выбирается единый оператор, который будет осуществлять вывоз и переработку ТКО;
- Вывоз ТКО становится коммунальной услугой, а не жилищной;
- Вменено в обязанность всем «производящим» мусор гражданам и организациям заключать договор с региональным оператором (согласно статье 24.7 Закона «Об отходах производства и потребления»);
- Формирование единого тарифа на вывоз ТКО.
- Ужесточение борьбы с незаконными свалками.

Оператор, осуществляющий вывоз и переработку ТКО, также займется выкупом земельных участков для размещения объектов капитального строительства, необходимых для осуществления деятельности в области обращения с твердыми коммунальными отходами. Кроме того, «Российский экологический оператор» будет приобретать здания и сооружения, оборудование по обработке, утилизации отходов и специальную технику [16].

По мере повышения спроса на высококачественный стеклобой все большее значение приобретают современные технологии его подготовки.

Одним из значительных потребителей стеклобоя является производство строительных материалов и в наибольшей степени производство пеностекла и изделий на его основе. Стеклобой наиболее применим для получения зернистых материалов – гранулированного пеностекла, щебня и гравия из пеностекла, песка. Эти материалы имеют высокие эксплуатационные характеристики: негорючи, нетоксичны, биостойки, обладают низкой теплопроводностью, водостойки, пароводонепроницаемы, безугадочны и долговечны [9, 10, 17–19].

Поскольку эти пористые заполнители являются относительно новыми, то для их продвижения на рынке составлена схема возможных направлений использования (рис. 3). Рекомендуется применять искусственные пористые заполнители из пеностекла в: дорожном строительстве, производстве строительных материалов, холодильной технике, строительстве.

В структуре потребления стеклобоя российскими компаниями преобладает бесцветное стекло (БС), доля которого охватывает около 56 % общего объема потребления. Значительную долю в структуре потребления составляет стекло зеленого цвета (20 %) и коричневого (15 %).

Структура рынка стеклобоя по цвету может быть представлена следующим образом (рис. 4).

Проблема вторичного использования стекла стоит и в России, и во всем мире очень остро: стеклянные отходы способны нанести окружающей среде значительный ущерб, их накопление на полигонах только в России и Украине засоряет около 16 тыс. га ежегодно [15].

Основные сложности, с которыми сталкивается решение вопроса вторичного использования стеклобоя в нашей стране, являются:

- неорганизованность (отсутствие организованного) сбора стеклянного боя, недостаточное количество сырья для обеспечения крупных перерабатывающих предприятий;
- сложность и трудоемкость процесса сбора, очистки, сортировки стеклянного сырья;
- хранение сырья для переработки требует наличия значительных складских площадей;
- отсутствие государственного стимулирования в данной области.

Позитивным моментом в отношении вторичной переработки стеклянных изделий является то, что в процессе такой переработки не создаются никакие отходы, которые необходимо утилизировать. Процесс переработки представляет собой полностью замкнутый безотходный цикл [15].

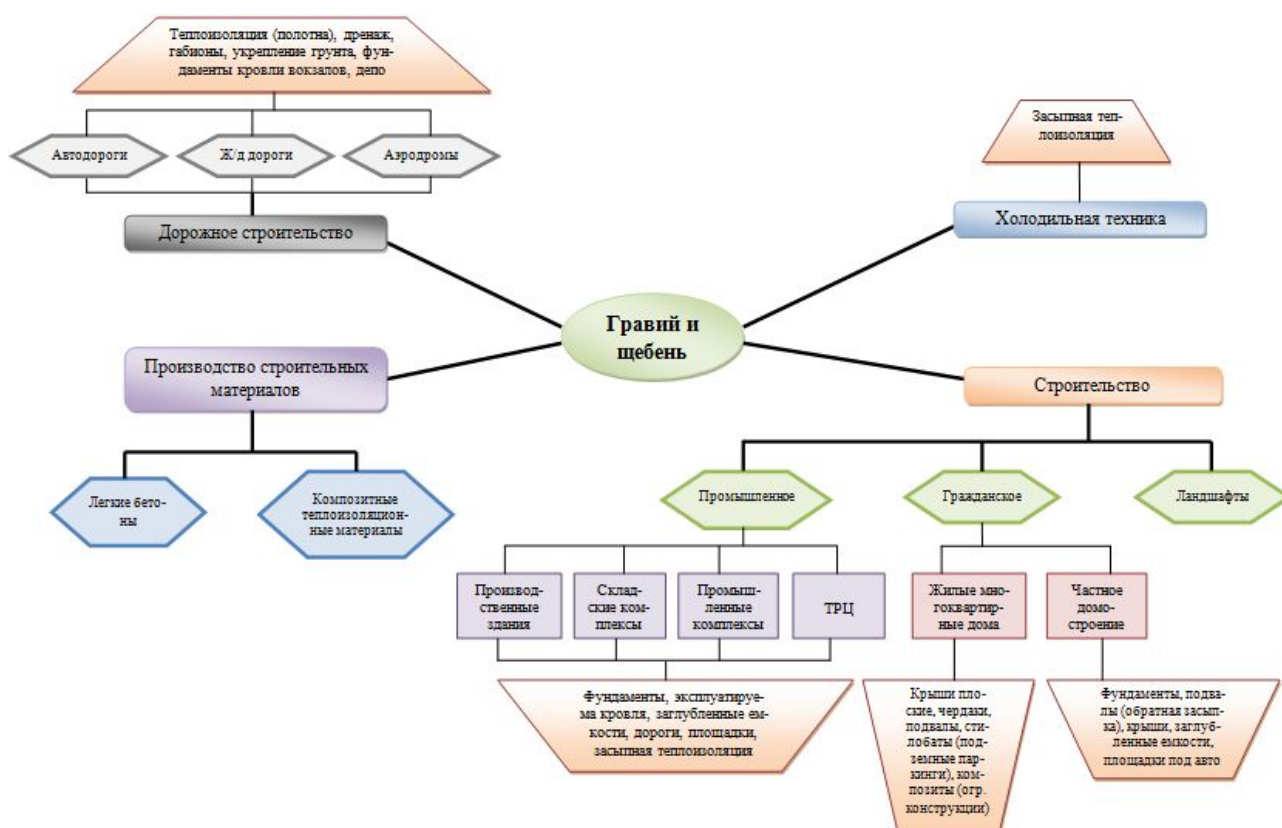


Рис. 3. Сферы применения заполнителей из пеностекла

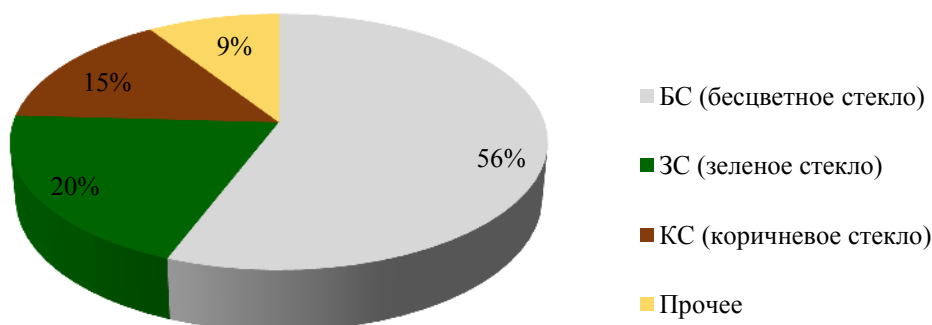


Рис. 4. Структура рынка стеклобоя по цвету в России

Бой стекла можно утилизировать методом переплавки. Для того чтобы осколок бутылки или оконного стекла стал частью нового изделия, он должен пройти следующие этапы:

— сбор отходов стекла. Небольшие предприятия организуют различные пункты приема стеклобоя у населения. Принимается любой вид стекла вне зависимости от его цвета и состава. Более крупные организации заключают договора с коммунальными структурами для централизованного вывоза больших объемов отходов со свалок или специальных хранилищ;

— первичная мойка. После доставки стеклобоя на производство, его помещают в агрегат, где происходит первичная мойка стекла очищается от грязи и крупного мусора;

— сортировка. Наиболее трудоемкий процесс, потому что производится вручную. По конвейеру медленно движется помытое стекло, а специальные работники производят сортировку его по цветовому признаку;

— измельчение. Отсортированное стекло попадает дробильные машины, где происходит их измельчение и сортировка по фракциям через специальные сита;

— переплавка. Готовый измельченный материал попадает в печи, где происходит нагрев и образование однородной стекломассы.

На государственном уровне следует организовать взаимосвязь сбора, сортировки, переработки или вторичного использования стеклянных отходов, а также поддержать инвестициями предприятия, которые внедряют новые технологии по переработке стекла [4, 10].

Уникальным теплоизоляционным материалом в настоящее время является пеностекло, применяется для тепло- и звукоизоляции, выпускается в виде: блоков (плит), гранул, щебня, песка. Преимущества пеностекла: негорючесть; водонепроницаемость; надежность и долговечность; химическая стойкость; экологичность; устойчивость к грызунам. Сочетание высоких теплоизоляционных физико-механических свойств при пожарной безопасности, долговечности и экологической чистоте, ставит пеностекло практически вне конкуренции с другими материалами.

На сегодняшний день, одним из крупнейших российских и европейских производителей современной звуко- и теплоизоляции - пеностекла, является компания «АйСиЭм Гласс Калуга». Производственная мощность завода 300 000 м<sup>3</sup> в год.

Компания выпускает пеностекольный щебень, имеет все необходимые протоколы испытаний, технические условия, сертификат соответствия ГОСТ-Р, декларацию о соответствии техническому регламенту о требованиях пожарной безопасности, санитарно-эпидемиологическое заключение, техническое свидетельство и техническая оценка, экспертную оценку о соответствии материала стандартам LEED, BREAM [20].

Данная компания, является примером получения прибыли при использовании стеклобоя, в качестве основного сырья для производства теплоизоляционного материала.

На сегодняшний день стеклобой является важной составной частью нашей жизни и вместе с тем – универсальным материалом. Оно используется в быту, в научных исследованиях, в современной архитектуре.

Стеклобой становится незаменимой частью для использования в качестве основного компонента для производства теплоизоляционных материалов.

Таким образом, грамотная утилизация отходов стекла помогает сохранять чистоту нашей планеты, а повторное применение стеклотары представляет собой наиболее оптимальный способ рециклинга. Однако из-за того, что одним из свойств стекла является хрупкость, именно стеклобой превращается в отходы, которые требуют

не только своевременной, но и грамотной утилизации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самые крупные мусороперерабатывающие заводы России [Электронный ресурс]. URL: <https://theecology.ru/interesting/musoropererabatyvajushhie-zavody-rossii> (дата обращения: 05.06.2019)
2. Проблемы переработки стекла в России [Электронный ресурс]. URL: [http://www.megamagnat.ru/business\\_ideas/361.html](http://www.megamagnat.ru/business_ideas/361.html) (дата обращения: 05.06.2019)
3. Опарина Л.А. Основы ресурсо- и энергосбережения в строительстве: учеб. Иваново: Изво ПресСто, 2014. 256 с.
4. Чупрова Л.В., Мишурина О.А. Экологические и экономические аспекты утилизации отходов стекла // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 11-2. С. 222–225.
5. Чернышов Е.М., Акулова И.И., Потамошнев Н.Д., Баранов Е.В. Управление утилизацией техногенных отходов в производстве строительных материалов при формировании территориально-промышленных кластеров региона // Известия юго-западного государственного университета. 2011. №5-2 (38). С. 19–32.
6. ГОСТ Р 52233-2004. Тара стеклянная. Стеклобой. Общие технические условия. Москва: Изд-во стандартов, 2004. 6 с.
7. Современный опыт переработки стекла. [Электронный ресурс]. URL: <https://vtorothodi.ru/pererabotka/vtorichnaya-pererabotka-stekla> (дата обращения: 05.06.2019)
8. Мелконян Р.Г., Власова С.Г. Экологические и экономические проблемы использования стеклобоя в производстве стекла: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2013. 100 с.
9. Минько Н.И., Калатози В.В. Использование стеклобоя в технологии материалов строительного назначения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №1. С. 82–88.
10. Баранов Е.В., Шелковникова Т.И., Черкасов С.В., Пряженцева Е.А. Стеклобой - техногенное сырье для производства строительных материалов // Высокие технологии в строительстве. 2018. № 1. С. 38-42.
11. Jani Y., Hogland W. Waste glass in the production of cement and concrete – a review // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2014. Vol. 2. Issue 3. Pp. 1767–1775.
12. Bumanis G., Bajare D., Locs J., Korjajkins A. Alkali-silica reactivity of foam glass granules in



structure of lightweight concrete // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 47. Pp. 274–281.

13. Шахова В.Н., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Получение облицовочной керамики с использованием несортированного боя тарных стекол // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 2. С. 36–41.

14. Свой бизнес: переработка стеклобоя. Выбор оборудования для переработки стекла. Переработка стекла – бизнес-план от А до Я (2018 г). [Электронный ресурс]. URL: <https://businessizakon.ru/svoj-biznes-pererabotka-stekloboya-vybor-oborudovaniya-dlya-pererabotki-stekla-pererabotka-stekla-biznes-plan-ot-a-do-ya.html> (дата обращения: 05.06.2019)

15. Мир стекла. Вторичная переработка [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mirstekla-expo.ru/ru/ui/17006/> (дата обращения: 05.06.2019)

16. Ассоциация СтеклоСоюза России [Электронный ресурс]. URL: <http://steklosouz.ru/news/show&id=5427> (дата обращения: 05.06.2019)

17. Петухова Р.В., Садченко Н.П. Пено-стекло универсальный теплоизоляционный материал // Стекло мира. 2002. № 3. С. 69–71.

18. Кетов П.А. Разработка экологически безопасного энергоэффективного строительного ячеистого материала, соответствующего принципам зеленого строительства // Вестник МГСУ. 2018. Том 13. Выпуск 3. С. 368–377.

19. Мусафиров Г.Я., Мусафиров Э.В., Лыщик М.В. Блочное пеностекло на основе стеклобоя, доломитовой муки и жидкого стекла // Техника и технология силикатов. 2017. Т. 24. № 1. С. 7–11.

20. Завод по производству пеностекла Ай-СиЭм Гласс Калуга [Электронный ресурс]. URL: <http://www.eco-penosteklo.ru/proizvodstvo> (дата обращения: 05.06.2019)

#### Информация об авторах

**Шелковникова Татьяна Иннокентьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: [tschelk@mail.ru](mailto:tschelk@mail.ru). Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20 лет Октября, д. 84. Россия, 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14.

**Баранов Евгений Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: [baranov.evg@mail.ru](mailto:baranov.evg@mail.ru). Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20 лет Октября, д. 84. Россия, 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14.

**Черкасов Сергей Васильевич**, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: [sergey\\_v\\_cherkasov@mail.ru](mailto:sergey_v_cherkasov@mail.ru). Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20 лет Октября, д. 84. Россия, 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14.

**Пряженцева Екатерина Александровна**, магистрант кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: [Priajentsewa.kat@mail.ru](mailto:Priajentsewa.kat@mail.ru). Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20 лет Октября, д. 84. Россия, 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14.

Поступила в июле 2019 г.

© Шелковникова Т.И., Баранов Е.В., Черкасов С.В., Пряженцева Е.А., 2019

**\*Shelkovnikova T.I., Baranov E.V., Cherkasov S.V., Pryzhentseva E.A.**

Voronezh State Technical University  
Russia, 394006, Voronezh, st. 20 let Oktyabrya, 84  
\*E-mail: [tschelk@mail.ru](mailto:tschelk@mail.ru)

## PROBLEMS AND PROSPECTS OF COLLECTION AND PROCESSING OF BATTLE GLASS AND APPLICATION OF PRODUCTS ON ITS BASIS

**Abstract.** Glass disposal and its recycling is a very important area in the whole industry for dealing with industrial and household waste. It is necessary for the protection of the environment, the conservation of non-renewable natural chemical elements and resources. In most countries with developed economies, this problem is intensively solved. The recycling efficiency of recycled glass reaches significant volumes, since it is very beneficial from an economic point of view. The economic and environmental feasibility of recycling broken glass in recent years has been proven by the practice of its use both in our country and in foreign practice. The main problem in the collection of glass products is the lack of organization of such a process in our country

and in the world as a whole. The data on volumes, types of glass cullet, sources of its formation, existing and promising methods of disposal are given. The events and legal framework are discussed that may allow reorganizing the process of collecting cullet. A scheme is proposed for the use of artificial porous foam glass fillers, which gives a broad idea of the expediency of their use.

**Keywords:** waste recycling, disposal of glass breakage, glass cullet, municipal solid waste, bill, artificial porous foam glass fillers.

## REFERENCES

1. The largest waste processing plants in Russia [Samye krupnye musoropererabatyvayushchie zavody Rossii]. URL: <https://theecology.ru/interesting/musoropererabatyvayushhie-zavody-rossii> (date of application: 05.06.2009) (rus)
2. Problems of glass processing in Russia [Problemy pererabotki stekla v Rossii]. URL: <http://www.megamagnat.ru/business-ideas/361.html> (date of application: 05.06.2009). (rus)
3. Oparina L.A. Fundamentals of resource and energy conservation in construction [Osnovy resurso- i energosberezheniya v stroitel'stve]: textbook. Ivanovo: From PressSto, 2014. 256 p. (rus)
4. Chuprova L.V., Mishurina O.A. Ecological and economic aspects of glass waste disposal [Ekologicheskie i ekonomicheskie aspekty utilizatsii othodov stekla]. International Journal of Applied and Fundamental Research. 2016. No. 11-2. Pp. 222–225. (rus)
5. Chernyshov E.M., Akulova I.I., Potamoshneva N.D., Baranov E.V. Managing the disposal of industrial waste in the production of building materials in the formation of regional industrial clusters in the region [Upravlenie utilizatsiej tekhnogennyh othodov v proizvodstve stroitel'nyh materialov pri formirovanii territorial'no-promyshlennyh klasterov regiona]. Bulletin of the Southwestern State University. 2011. N 5-2 (38). Pp. 19–32. (rus)
6. GOST R 52233-2004. Glass containers. Cullet. General specifications. [GOST R 52233-2004. Tara steklyannaya. Stekloboj. Obshchie tekhnicheskie usloviya] Moscow: publishing house of standards, 2004. 6 p. (rus)
7. Modern experience of glass processing. [Sovremennyy opyt pererabotki stekla]. URL: <https://vtorothodi.ru/pererabotka/vtorichnaya-pere-rabotka-stekla> (date of application: 05.06.2009) (rus)
8. Melkonyan R.G., Vlasova S.G. Environmental and economic problems of the use of cullet in glass production [Ekologicheskie i ekonomicheskie problemy ispol'zovaniya stekloboya v proizvodstve stekla]: a training manual. Yekaterinburg: Publishing House Ural. un-that. 2013. 100 p. (rus)
9. Minko N.I., Kalatozi V.V. The use of cullet in the technology of materials for construction purposes [Ispolzovanie stekloboya v tekhnologii materialov stroitel'nogo naznacheniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 1. Pp. 82–88. (rus)
10. Baranov E.V., Shelkovnikova T.I., Cherkasov S.V., Pryazhentseva E.A. Cullet - technogenic raw materials for the production of building materials [Stekloboj - tekhnogennoe syre dlya proizvodstva stroitel'nyh materialov]. High technologies in construction. 2018. No. 1. Pp. 38–42. (rus)
11. Jani Y., Hogland W. Waste glass in the production of cement and concrete – a review. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2014. Vol. 2. Issue 3. Pp. 1767–1775
12. Bumanis G., Bajare D., Locs J., Korjajins A. Alkali-silica reactivity of foam glass granules in structure of lightweight concrete. Construction and Building Materials. 2013. Vol. 47. Pp. 274–281.
13. Shakhova V.N., Vitkalova I.A., Torlova A.S., Pikalov E.S., Selivanov O.G. Obtaining facing ceramics using unsorted battle of container glass [Poluchenie oblicovochnoj keramiki s ispol'zovaniem nesortirovannogo boya tarnyh stekol]. Ecology and Industry of Russia. 2019. Vol. 23. No. 2. Pp. 36–41. (rus)
14. Your business: processing of cullet. Selection of equipment for glass processing. Glass processing-business plan from A to Z (2018). [Svoj biznes: pererabotka stekloboya. Vybór oborudovaniya dlya pererabotki stekla. Pererabotka stekla – biznes-plan ot A do YA (2018g)]. URL: <https://businessizakon.ru/svoj-biznes-pererabotka-stekloboya-vybór-oborudovaniya-dlya-pererabotki-stekla-pere-rabotka-stekla-biznes-plan-ot-a-do-ya.html> (date of application: 05.06.2009) (rus)
15. Mir stekla. Recycling [Mir stekla. Vtorichnaya pererabotka]. URL: <https://www.mirstekla-expo.ru/ru/ui/17006/> (date of application: 05.06.2009) (rus)
16. Association StekloSouz Russia [Assotsiatsiya StekloSoyuza Rossii]. URL: <http://steklosouz.ru/news/show&id=5427> (date of application: 05.06.2009) (rus)
17. Petukhova R.V., Sadchenko N.P. Foam glass universal thermal insulation material [Penosteklo universal'nyj teploizolyacionnyj material]. Glass of the world. 2002. No. 3. Pp. 69–71. (rus)
18. Ketov P.A. Development of environmentally friendly energy-efficient building cellular material that meets the principles of green building [Razrabotka ekologicheski bezopasnogo energoeffektivnogo stroitel'nogo yacheistogo materiala, sootvetstvuyushchego principam zelenogo stroitelstva].

Vestnik MGSU. 2018. Vol. 13. Issue 3. Pp. 368–377. (rus)

19. Musafirova G.Ya., Musafirov E.V., Lyshchik M.V. Block foam glass based on cullet, dolomite flour and liquid glass [Blochnoe penosteklo na osnove stekloboya, dolomitovoj muki i zhidkogo

stekla]. Technique and technology of silicates. 2017. T. 24. No. 1. Pp. 7–11. (rus)

20. Plant for the production of foam glass Iciem glass Kaluga [Zavod po proizvodstvu penostekla AjSiEm Glass Kaluga]. URL: <http://www.eco-penosteklo.ru/proizvodstvo> (date of application: 05.06.2009). (rus)

*Information about the authors*

**Shelkovnikova, Tatyana I.** PhD, Assistant professor. E-mail: [tschelk@mail.ru](mailto:tschelk@mail.ru). Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, st. 20 let Oktyabrya, 84. Russia, 394026, Voronezh, Moskovsky av, 14.

**Baranov, Evgeny V.** PhD, Assistant professor. E-mail: [baranov.evg@mail.ru](mailto:baranov.evg@mail.ru). Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, st. 20 let Oktyabrya, 84. Russia, 394026, Voronezh, Moskovsky av, 14.

**Cherkasov, Sergey V.** associate professor of the department of technology of building materials products and designs. E-mail: [sergey\\_v\\_cherkasov@mail.ru](mailto:sergey_v_cherkasov@mail.ru). Voronezh State Technical University. Russia, 394060, Voronezh, 20 years of October st., 84. Russia, 394026, Voronezh, Moskovsky av, 14.

**Pryazhentseva, Ekaterina A.** Master student. E-mail: [Priajentsewa.kat@mail.ru](mailto:Priajentsewa.kat@mail.ru). Voronezh State Technical University. Russia, 394060, Voronezh, 20 years of October st., 84. Russia, 394026, Voronezh, Moskovsky av, 14.

---

*Received in July 2019*

**Для цитирования:**

Шелковникова Т.И., Баранов Е.В., Черкасов С.В., Пряженцева Е.А. Проблемы и перспективы сбора и переработки боя стекла и применение изделий на его основе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 14–21. DOI: 10.34031/article\_5da44ad180a513.69952350

**Forcitation:**

Shelkovnikova T.I., Baranov E.V., Cherkasov S.V., Pryzhentseva E.A. Problems and prospects of collection and processing of battle glass and application of products on its basis. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 9. Pp. 14–21. DOI: 10.34031/article\_5da44ad180a513.69952350

DOI: 10.34031/article\_5da44bf06a0238.75457055

<sup>1,\*</sup>Чапидзе О.Д., <sup>2</sup>Жуков Д.И.<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
Россия, 129337, г. Москва, ул. Ярославское шоссе, д. 26<sup>2</sup>Кубанский государственный технологический университет  
Россия, 350042, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2

\*E-mail: otari23@mail.ru

## МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МНОГОЭТАЖНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО КАРКАСА ПОСЛЕ ОГНЕВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

**Аннотация.** Пожар является одной из важнейших проблем в строительстве. В большей степени с этим фактором риска сталкиваются передовые страны, имеющие богатый опыт и знания в области обеспечения пожарной безопасности и современного материаловедения. Различные техногенные процессы способствуют развитию динамической нагрузки, влияющей на конструкцию зданий и сооружений. В статье рассматриваются формы частот собственных колебаний многоэтажного железобетонного каркасного здания, в момент времени до и после приложения пожарной нагрузки. Приводится сценарий развития пожара в многоэтажном каркасном здании на 2, 12 и 21 этажах, с анализом частот собственных колебаний, в количестве – 100 форм. Исходя из полученных данных, с применением математического анализа ПК Ansys 19.1, было выявлено, что после огневого воздействия частота форм собственных колебаний изменяется до 157 %; средний процент изменения форм частот собственных колебаний здания – на 5,4 %. Изменение частоты колебаний здания напрямую зависит от степени огневого поражения его строительных конструкций, влекущее за собой неминуемое снижение динамического сопротивления несущих элементов, приближая частоту форм собственных колебаний к частоте колебаний основания здания, что в свою очередь может привести к состоянию резонанса.

**Ключевые слова:** пожар, огневое воздействие, огнестойкость, железобетон, колебания.

**Введение.** Как известно, в общемировой практике в результате пожаров ежегодно в пострадавших странах фиксируются огромные потери. К примеру, по данным Американского центра огневых испытаний в США каждый год погибает более 12 тыс. человек – больше 100 тыс. получают увечья.

По данным National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA [10], в США, за 2017 год, ущерб от пожаров стал рекордным и составил более 18 млрд долларов. В нашей стране пожары также приносят значительный ущерб: 2017 г. – более 5 млрд руб. [5].

Максимальный материальный ущерб, около 52 %, связан с разрушением строительных конструкций зданий и их последующим обрушением, поскольку при потере несущей способности тяжелые конструкции, падая вниз, нарушают целостность технологического оборудования и всего того, что находится в помещениях. В тоже время, сохранение строительных конструкций существенно снижает ущерб, а последствия таких пожаров связаны лишь с восстановлением технологического оборудования и других материальных ценностей.

Следовательно, обеспечение несущей способности строительных конструкций зданий при пожарах является важной задачей, решение кото-

рой должно создать безопасные условия для работы людей, защиты материальных ценностей и сведения до минимума возможных потерь.

Поведение конструкции в условиях пожара характеризуется ее огнестойкостью – способностью конструкции сопротивляться воздействию пожара в течение определенного времени, сохраняя при этом свои обычные эксплуатационные характеристики.

Огнестойкость строительной конструкции, в первую очередь, определяется характером и интенсивностью температурного режима пожара [7].

Несмотря на исследования проблемы пожаров в зданиях [3, 6, 21], процесс развития и распространения огня, а также сопутствующих опасных продуктов сгорания по помещениям зданий, остается малоизученным, в виду многообразия и вариативности характеров температурных режимов, условиях пожара, количества и вида горючей нагрузки, теплообмена в помещении, теплоемкости, теплофизических характеристик ограждающих конструкций и т.д.

В общем случае режим реального пожара характеризуется сложной температурной кривой, имеющей экстремум, восходящие и нисходящие ветви [21].

Считается, что основное влияние на состояние конструкций в условиях воздействия пожара оказывает период нарастания температуры

среды. Поэтому для целей исследования огнестойкости строительных конструкций и сопоставления полученных результатов в 1961 г. организацией ISO была принята возрастающая температурная кривая именуемая, как – температурный режим стандартного пожара. Она построена по усредненным данным о нарастании температур в жилых и общественных зданиях [21].

Экспериментальные исследования показывают, что огневое воздействие меняет прочностные и деформативные характеристики железобетона, снижая при этом сопротивление к динамической нагрузке [1, 2, 18].

**Методология.** Целью работы является оценка частот собственных колебаний железобетонного многоэтажного здания подверженному огневому воздействию в условиях пожара.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Нелинейный расчет 23-этажного каркасного железобетонного здания при нормальных условиях с температурой среды  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
2. Задание высокотемпературной нагрузки на конструкции здания по ISO-834 с временным промежутком – 30 мин.;
3. Анализ конструкции после огневого воздействия;
4. Модальный анализ здания при нормальных условиях;
5. Модальный анализ здания с учетом деформаций, после огневого воздействия;
6. Произвести качественную и количественную оценку изменения частот собственных колебаний здания по полученным данным в программном комплексе ПК Ansys 19.1.

**Основная часть.** Объектом исследования был выбран 23-этажный жилой дом (см. рис. 1).

Габариты здания в плане  $36,0 \times 30,0$  м, сетка колонн  $6,0 \times 6,0$  м, высота здания 72,6 м.

Конструктивное решение здания – рамный каркас, монолитного исполнения; плита перекрытия толщиной – 200 мм, колонны размером –  $400 \times 400$  мм, ригели сечением – 400 мм. Материал несущих конструкций: бетон класса В25, арматура А500С.

В программном комплексе ПК Ansys 19.1 моделируется математическая модель нелинейно-статического расчета, с учетом всех граничных условий, расчет проводится при нормальных условиях, с температурой среды  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

После проведенного расчета были выявлены значения вертикальных деформаций здания (см. рис. 2).

По нелинейному расчету модели здания в программном комплексе ПК Ansys 19.1, получено:

– максимальная деформация 17,4 мм, что меньше максимально допустимой деформации несущей конструкции – 30 мм.

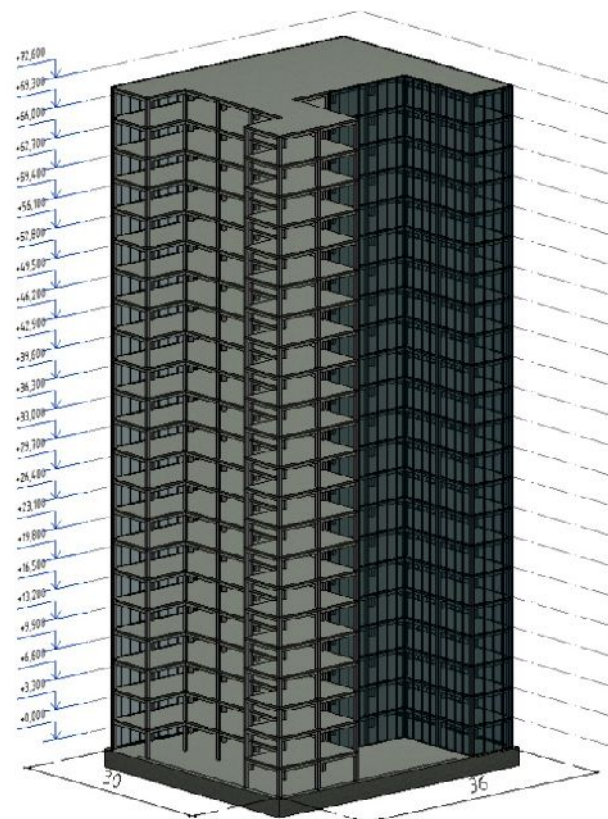


Рис. 1. Параметрическая модель здания

Следующий этап расчета здания – задание огневого воздействия на трех разных уровнях, рассматриваются 2, 12 и 21 этажи. Нелинейно статический расчет на огневое воздействие произведен с учетом нормативного документа [4].

Стандартная кривая температуры пожара задается в программном комплексе ПК Ansys 19.1, временной промежуток огневого воздействия – 30 мин.

Температура стандартного температурного режима определяется по ISO-834, через логарифмическую зависимость [22]:

$$T = 345 \lg(8\tau + 1) + t_e, \quad (1)$$

где  $T$  – температура среды,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau$  – время нагрева, мин.;  $t_e$  – начальная температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;

График зависимости температуры от времени задается в препроцессоре программного комплекса ПК Ansys 19.1 (см. рис. 2).

Огневое воздействие рассматривается на 2, 12 и 21 этажах здания, приводятся изображения температурных полей и деформаций конструкций (см. рис. 4–5).

Численные значения деформации железобетонного здания после огневого воздействия приведены в табличной форме (см. табл. 1).



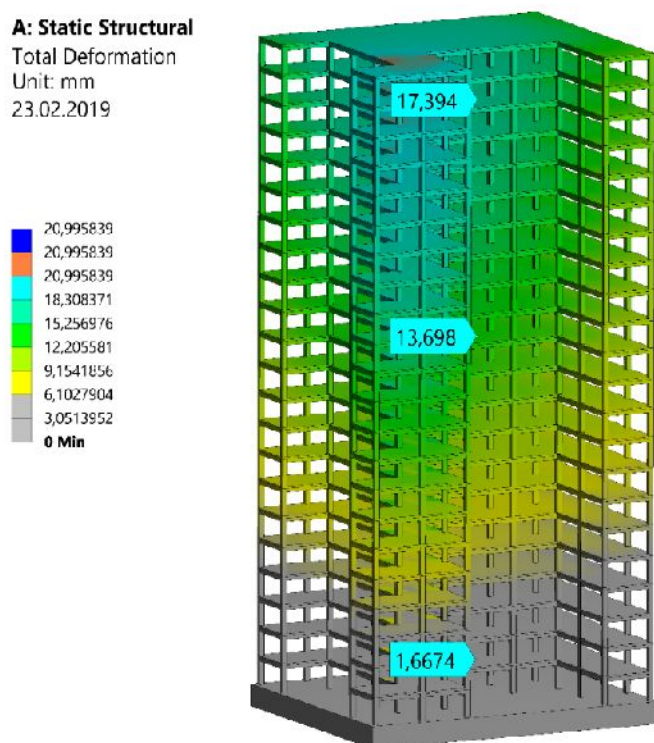


Рис. 2. Деформации конструкций здания при нормальных условиях

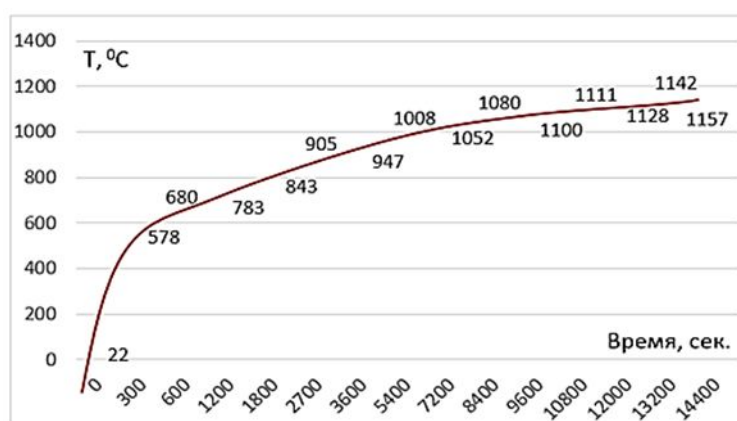


Рис. 3. Стандартная кривая температуры пожара по ISO-834

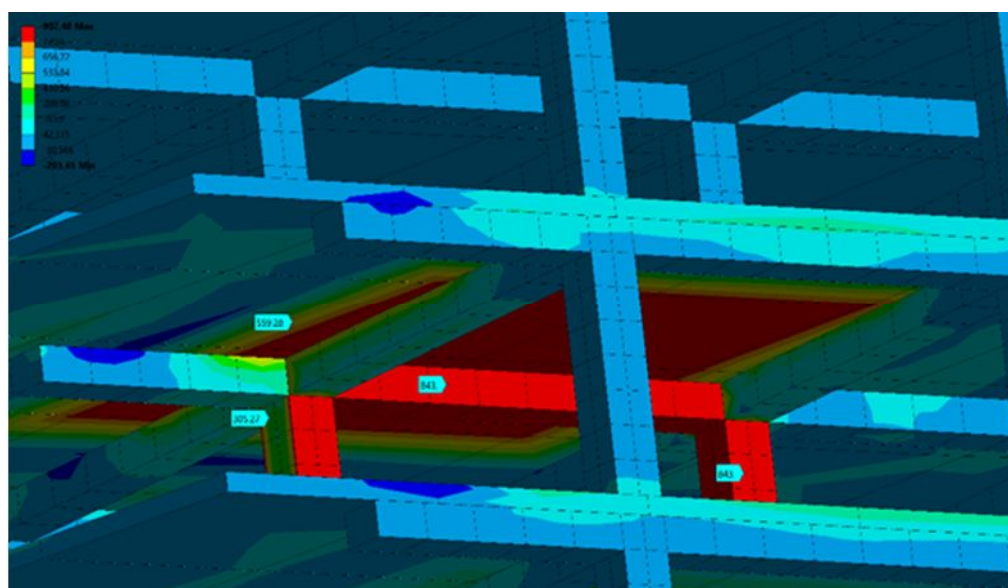


Рис. 4. Температурное поле огневого воздействия на 2 этаже



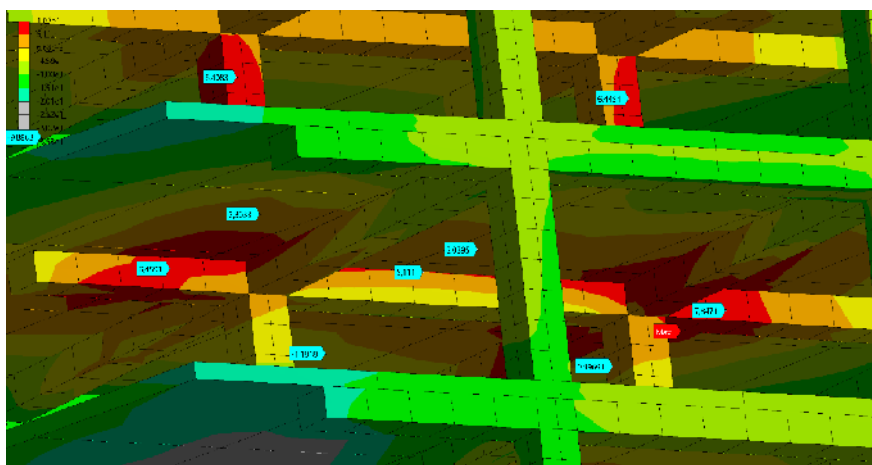


Рис. 5. Температурное поле огневого воздействия на 2 этаже

Таблица 1

**Деформация здания после огневого воздействия**

| Structure        | REI | Деформация конструкций, мм |         |         | Запас прочности, % |    |    |
|------------------|-----|----------------------------|---------|---------|--------------------|----|----|
|                  |     | 2 этаж                     | 12 этаж | 21 этаж |                    |    |    |
| Плита перекрытия | 45  | 8,129                      | 7,932   | 3,276   | 73                 | 74 | 89 |
| Ригель           | 90  | 6,643                      | 5,643   | 2,128   | 77                 | 79 | 93 |
| Колонна          | 90  | 1,221                      | 1,184   | 0,863   | 95                 | 96 | 97 |

На основании полученных данных можно сделать вывод, об обеспеченности огнестойкости строительных конструкций; деформации основных несущих элементов здания находятся в нормативных пределах.

Для анализа собственных частот колебаний здания проведен модальный анализ с учетом 100

форм колебаний в момент времени до и после приложения пожарной нагрузки.

Результаты расчета 100 форм частот собственных колебаний в момент времени до и достижения огневого воздействия с соответствующей температурной нагрузки в уровне приведены в табличной форме (см. табл. 2).

Таблица 2

**Деформация здания после огневого воздействия**

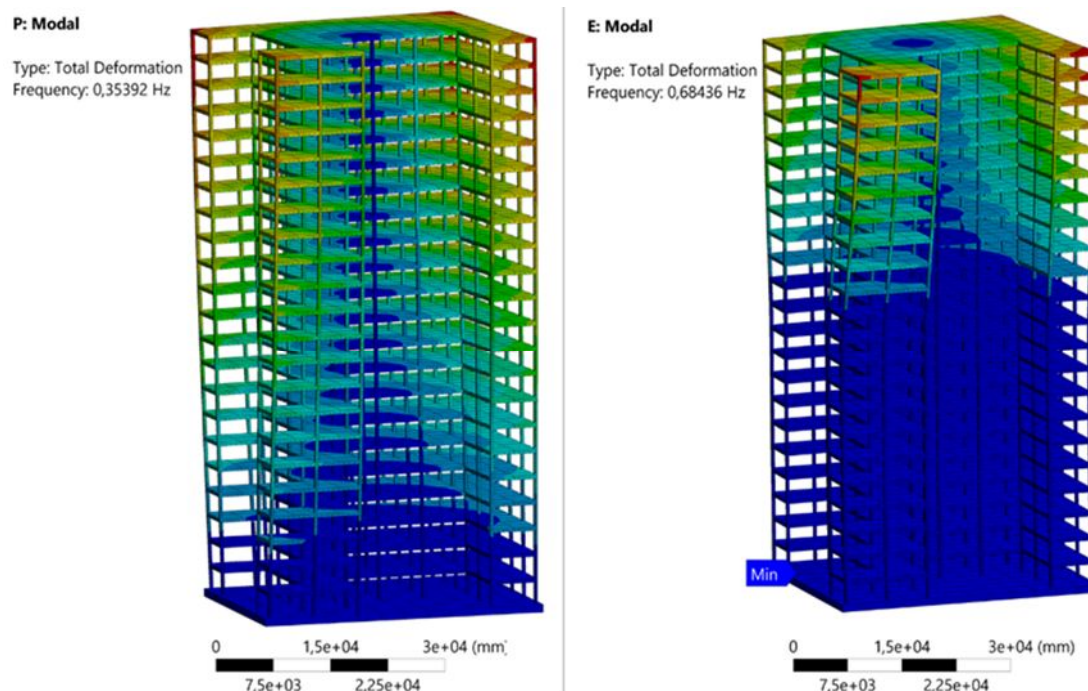
| № Формы колебаний | Частота колебаний до огневого воздействия, Hz | Частота колебаний после огневого воздействия, Hz |         |         | Изменение, % |         |         |
|-------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------|---------|--------------|---------|---------|
|                   |                                               | 2 этаж                                           | 12 этаж | 21 этаж | 2 этаж       | 12 этаж | 21 этаж |
| 1                 | 0,30987                                       | 0,31214                                          | 0,31476 | 0,31575 | 0,73         | 1,57    | 1,89    |
| 2                 | 0,31438                                       | 0,32336                                          | 0,60481 | 0,80795 | 2,86         | 92,38   | 157     |
| 3                 | 0,35392                                       | 0,36639                                          | 0,68436 | 0,89217 | 3,52         | 93,36   | 152     |
| 5                 | 0,9715                                        | 1,0137                                           | 1,4525  | 1,6679  | 4,34         | 49,51   | 71,68   |
| 6                 | 1,0834                                        | 1,1341                                           | 1,5998  | 1,7345  | 4,68         | 47,66   | 60,09   |
| 8                 | 1,7351                                        | 1,8071                                           | 2,0267  | 2,4551  | 4,15         | 16,80   | 41,5    |
| 9                 | 1,9002                                        | 1,9872                                           | 2,2375  | 2,5268  | 4,58         | 17,75   | 32,97   |
| 12                | 2,5922                                        | 2,5953                                           | 2,9431  | 3,0549  | 0,12         | 13,53   | 17,85   |
| 13                | 2,6976                                        | 2,8192                                           | 3,0694  | 3,0845  | 4,51         | 13,78   | 14,34   |
| 16                | 3,2152                                        | 3,2793                                           | 3,3127  | 3,562   | 1,99         | 3,03    | 10,79   |
| 34                | 6,1045                                        | 6,3142                                           | 6,3896  | 6,6454  | 3,44         | 4,67    | 8,86    |
| 57                | 8,989                                         | 9,1896                                           | 9,1504  | 9,4141  | 2,23         | 1,79    | 4,73    |
| 70                | 10,021                                        | 10,178                                           | 10,191  | 10,444  | 1,57         | 1,69    | 4,22    |
| 100               | 12,187                                        | 12,368                                           | 12,288  | 12,44   | 1,49         | 0,82    | 2,07    |

Сравнительный анализ результатов частот собственных колебаний здания при нормальных условиях и в условиях после достижения огневого воздействия (см. рис. 6).

Анализ форм частот собственных колебаний показывает, что частоты форм колебаний здания

увеличивается до 157 %, что обусловлено изменением деформативных свойств материалов при огневых воздействиях [1].

**Выводы.** Программный комплекс ПК Ansys 19.1, позволяет выполнить модальный анализ здания, учитывая при этом высокотемпературный режим воздействия на конструкцию с течением времени.



а) До огневого воздействия

б) После огневого воздействия

Рис. 6. Собственная частота колебания здания

Вертикальные деформации после огневого воздействия, остаются в пределах нормы, что соответствует нормативному документу [12].

Наибольшее изменение частоты собственных колебаний здания достигается при сценарии, когда пожар происходит на 21 этаже, при этом вторая и третья формы колебаний достигли максимальных увеличений частот в 2,52 и в 2,57 раза.

Средний процент изменения частоты колебания на 2 этаже – 1,51 %, на 12 этаже – 5,4 %, на 21 этаже – 8,87 %, соответственно.

Чем выше место расположения деформируемой конструкции в здании после огневого воздействия, тем больше она влияет на частоту собственных колебаний здания, основное изменение происходит при формах на кручение.

Изменение частот собственных колебаний способствует снижению сопротивления к динамической нагрузке, приближая частоту форм собственных колебаний к частоте колебания основания, что в свою очередь может вызвать состояние резонанса в конструкции.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аветисян Л.А., Тамразян А.Г. Влияние динамического эффекта на несущую способность железобетонных колонн, работающих в условиях огневых воздействий // Вестник МГСУ. 2013. №10. С. 13–24.
2. Аветисян Л.А., Тамразян А.Г. Расчет внецентренножатых железобетонных элементов на кратковременную динамическую нагрузку //

Строительство: наука и образование. 2013. №4. Ст. 2. Режим доступа: <http://www.nso-iournal.ru>

3. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Экспериментальный и аналитические исследования несущей способности большепролетных балок при огневом воздействии // Огнестойкость строительных конструкций. 2015. Т. 24. №11. С. 31–38.

4. ГОСТ 30247.0-94 (ИСО 834-75) Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.

5. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2017 году». М.: МЧС России. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2018. 376 с.

6. Курлапов Д.В. Воздействие высоких температур пожара на строительные конструкции // Инженерно-строительный журнал. 2009. №4. С. 50–58.

7. Милованов А.Ф., Яковлев А.И. Огнестойкость изгибаемых предварительно напряженных железобетонных элементов при потере прочности от поперечной силы // В кн.: Огнестойкость строительных конструкций: Сборник трудов вып. 7 / Всероссийский. науч.-иссл. ин-т противопожарной обороны МВД. М.: ВНИПО, 1979. С. 36–49.

8. Мкртычев О.В., Сидоров Д.С. Расчет железобетонного здания на температурное воздействие // Вестник МГСУ. 2012. №5. С. 50–55.

9. Мкртычев О.В., Сидоров Д.С. Расчет огнестойкости высотного здания при пожаре // Вестник МГСУ. 2010. №4. С. 246–249.

10. Мэтт Макграт., BBC [Электронный ресурс] // BBC.com: BBC News Русская служба URL: <https://www.bbc.com/russian/features-42614950>
11. Синицын С.Б. Строительная механика в методе конечных элементов стержневых систем. М., 2001. 320 с.
12. СП 20.13330.2011. СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия. Минрегион России, ОАО «ЦПП. М., 2010. 80 с.
13. СП 63.13330.2012. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Минрегион России, ОАО «ЦПП. М., 2012. 155 с.
14. СТО 365.54501-006-2006 // Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. Москва. 2006.
15. Тамразян А.Г., Булгаков С.Н., Рахман И.А., Степанов А.Ю. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и технического характера // Научное издание. Под общ. ред. Тамразяна А.Г. Издание второе. М.: Издательство АСВ, 2012. 304 с.
16. Тамразян А.Г., Гильмутдинова Л.Р. Оценка надежности железобетонной многослойной плиты перекрытия после огневого воздействия // Сборник трудов конференции. Москва. 2017. С. 273–276.
17. Тамразян А.Г., Мехрализадех А.Б., Особенности проявления огневых воздействий при расчете конструкций на прогрессирующее разрушение зданий с переходными этажами // Пожаровзрыво-безопасность. 2012. Том 21. № 12. С. 41–44.
18. Тамразян А.Г., Аветисян Л.А. К учету коэффициента динамического упрочнения при расчете железобетонных колонн в условиях огневых воздействий // Вестник ИргТУ. 2014. №9 (92). С. 133–138.
19. Capua D.D., Mari A.R. Nonlinear analysis of reinforced concrete cross-sections exposed to fire. Fire Saf J. 2007. 42(2). Pp. 139–49.
20. Davie C.T., Zhang H.L., Gibson A. Investigation of a continuum damage model as an indicator for the prediction of spalling in fire exposed concrete Comput Struct. 2012. 94–95. Pp. 54–64
21. EN 1992-1-2, “Eurocode 2, Design of concrete structures, Part 1-2: General rules – Structural fire design”, Commission of the European Communities, Brussels, 2004.
22. Haei-Juan Lee Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 15 // 2010.
23. Howard C.Q., Cazzolato B.S., Acoustic Analyses Using MATLAB® and ANSYS® (CRC, 2014). 2014. 663 p.
24. Kokot S., Anthoine A., Negro P., Solomos G. Static and dynamic analysis of a reinforced concrete flat slab frame building for progressive collapse // Engineering Structures. 2012. Vol. 40. Pp. 205–217.
25. Shapira A. Potential earthquake risk estimations by application of a simulation process // Tectonophysics. 1983a. Vol. 95. No. 1/2. Pp. 75–89.
26. Shapira A.A. Probabilistic approach for evaluating earthquake risks, with application to the Afro-Eurasian junction // Tectonophysics. 1983b. Vol. 91. N3/4. Pp. 321–334.

*Информация об авторах*

**Чапидзе Отари Джемалиевич**, магистрант кафедры железобетонных и каменных конструкций. E-mail: otari23@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, ул. Ярославское шоссе, д. 26.

**Жуков Дмитрий Игоревич**, бакалавр кафедры строительных конструкций. E-mail: izhukovdmitry@mail.ru. Кубанский государственный технологический университет. Россия, 350042, Краснодар, ул. Московская, д. 2.

*Поступила в мае 2019 г.*

© Чапидзе О.Д., Жуков Д.И., 2019

<sup>1,\*</sup>Chapidze O.D., <sup>2</sup>Zhukov D.I.

<sup>1</sup>National Research University Moscow State University of Civil Engineering  
Russia, 129337, Moscow, Yaroslavl highway, 26

<sup>2</sup>Kuban State Technological University  
Russia, 350042, Krasnodar, st. Moscow, 2

\*E-mail: otari23@mail.ru

## MODAL ANALYSIS OF MULTILEVEL CONCRETE FRAMEWORK AFTER FIRE EXPOSURE

**Abstract.** Fire accidents are one of the most important problems of a society with advanced technology. Moreover, it is more related to advanced countries that have rich experience and knowledge of safety and new

*building materials. Various man-made factors contribute to the development of dynamic loads that affect the design of buildings and structures. The article discusses the frequency forms of natural oscillations of a multi-storey reinforced concrete frame building before and after the fire impact. The scenario of the fire impact of a multi-storey frame building on floors 2, 12 and 21 is considered, and then an analysis of 100 forms of natural frequencies is carried out. Based on the data obtained, the mathematical analysis in the Ansys software package, it was revealed that after the fire impact the frequency of natural oscillations forms up to 157 %. The average percentage change in the shape of the frequency of natural oscillations of a building makes up to 5,4 %. Changing of oscillation frequency depends on the level of fire exposure. A change in the natural vibration frequencies contributes to reducing the resistance to dynamic load, bringing the frequency in turn of the natural vibration forms closer to the frequency of the base oscillation, which can cause a resonant state.*

**Keywords:** fire impact, fire accident, fire resistance, reinforced concrete, vibrations.

## REFERENCES

1. Avetisyan L.A., Tamrazyan A.G. The influence of dynamic effect on the bearing capacity of reinforced concrete columns, working in conditions of unexposed [Vliyanie dinamicheskogo effekta na nesushchuyu sposobnost' zhelezobetonnykh kolonn, rabotayushchih v usloviyah ognevyykh vozdeystviy]. Vestnik MGSU. 2013. No. 10. Pp. 13–24. (rus)
2. Avetisyan L.A., Tamrazyan A.G. Eccentric Calculation of reinforced concrete elements on a short-term dynamic load [Raschet vnecentrennoszhatykh zhelezobetonnykh elementov na kratkovremennuyu dinamicheskuyu nagruzku]. Stroitelstvo: nauka i obrazovanie. 2013. No. 4. <http://www.nso-iournal.ru> (rus)
3. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pehotikov A.V. An experimental and analytical study of the bearing capacity of large-span beams with unexposed [Eksperimental'nyj i analiticheskie issledovaniya nesushchej sposobnosti bol'sheproletnykh balok pri ognevom vozdeystvii]. Fire resistance of building structures. 2015. Vol. 24. No. 11. Pp. 31–38. (rus)
4. GOST 30247.0-94 (ISO 834-75) Konstruktsii stroitel'nye. Metody ispytaniy na ognestoykost'. Obshchie trebovaniya. (rus)
5. State report «O sostoyanii zashchity naseleeniya i territoriy Rossiyskoy Federatsii ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera v 2017 godu». M.: MChS Russia. FGBU VNII GOChS (FTs), 2018. Pp. 376. (rus)
6. Kurlapov D.V. Exposure to high temperatures of fire on building structures [Vozdeystvie vysokih temperatur pozhara na stroitel'nye konstrukcii]. Magazine of Civil Engineering. 2009. No. 4. Pp. 50–58. (rus)
7. Milovanov A.F., Yakovlev A.I. Fire resistance bent prestressed concrete elements with a loss of strength of the lateral force. In the book. [Ognestojkost' izgibaemykh predvaritel'no napryazhennykh zhelezobetonnykh elementov pri potere prochnosti ot poperechnoj sily. Ognestojkost' stroitel'nykh konstrukcij]. Fire resistance of building structures: Proceedings vyp.7. Russian. scientific research in-t of a fire-prevention defense of the Ministry of Internal Affairs. M.: VNIPO, 1979. Pp. 36–49. (rus)
8. Mkrtichev, O.V Sidorov, D.S. Calculation of reinforced concrete buildings on the thermal effect [Raschet zhelezobetonного zdaniya na temperaturnoe vozdeystvie]. Herald MGSU. 2012. No. 5. Pp. 50–55. (rus)
9. Mkrtichev O.V., Sidorov D.S. Calculation of fire resistance of high-rise buildings in case of fire [Raschet ognestojkosti vysotnogo zdaniya pri pozhare]. Vestnik MGSU. 2010. No. 4. Pp. 246–249. (rus)
10. Matt McGrath., BBC. BBC.com: BBC News Russian service URL: <https://www.bbc.com/russian/features-42614950>
11. Sinitsyn S.B., Structural Mechanics in the finite element beam systems [Stroitel'naya mekhanika v metode konechnykh elementov sterzhnevyykh sistem]. M., 2001. 320 p. (rus)
12. SP 20.13330.2011 Load and impact. Russian Ministry of Regional Development, JSC "LAC. M., 2010. 80 p. (rus)
13. SP 63.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. Ministry of Regional Development of Russia, OJSC "ZPP. M., 2012. 155 p. (rus)
14. STO 365.54501-006-2006 Rules to ensure that the fire resistance of reinforced concrete structures and fire protection. Moscow. 2006 (rus)
15. Tamrazyan A.G., Bulgakov S.N., Rahman I.A., Stepanov A.Y. Risk mitigation in the construction of emergency situations of natural and technical [Snizhenie riskov v stroitel'stve pri chrezvychaynykh situatsiyah prirodnogo i tekhnicheskogo haraktera]. Scientific edition. Under total ed. Tamrazyan A.G. Second edition. M.: Publishing House DIA, 2012. 304 p. (rus)
16. Tamrazyan A.G., Gilmudtinova L.R. Evaluation of reliability multivacuum concrete slabs after fire exposure [Ocenka nadezhnosti zhelezobetonnoj mnogopustotnoj plity perekrytiya posle ogneвого vozdeystviya]. Conference Proceedings. M., 2017. Pp. 273–276. (rus)
17. Tamrazyan A.G., Mehralizadeh A.B. Peculiarities of fire effects in the calculation of structures

on the progressive destruction of buildings with the transitional floors. Pozharovzryvo-security. 2012. Vol. 21. No. 12 Pp. 41–44. (rus)

18. Thamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Accounting coefficient K when calculating the dynamic hardening concrete columns under unexposed [K uchetu koefficienta dinamicheskogo uprochneniya pri raschete zhelezobetonnykh kolonn v usloviyakh ognevyykh vozhdejstviy]. Bulletin ISTU. 2014. No. 9 (92). Pp. 133–138. (rus)

19. Capua D.D., Mari A.R. Nonlinear analysis of reinforced concrete cross-sections exposed to fire. Fire Saf J. 2007. 42(2). Pp. 139–49.

20. Davie C.T., Zhang H.L., Gibson A. Investigation of a continuum damage model as an indicator for the prediction of spalling in fire exposed concrete Comput Struct. 2012. 94–95. Pp. 54–64

21. EN 1992-1-2, “Eurocode 2, Design of concrete structures, Part 1-2: General rules – Structural

fire design”, Commission of the European Communities, Brussels, 2004.

22. Haei-Juan Lee Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 15 // 2010.

23. Howard C.Q., Cazzolato B.S., Acoustic Analyses Using MATLAB® and ANSYS® (CRC, 2014). 2014. 663 p.

24. Kokot S., Anthoine A., Negro P., Solomos G. Static and dynamic analysis of a reinforced concrete flat slab frame building for progressive collapse. Engineering Structures. 2012. Vol. 40. Pp. 205–217.

25. Shapira A. Potential earthquake risk estimations by application of a simulation process. Tectonophysics. 1983a. Vol. 95. No. 1/2. Pp. 75–89.

26. Shapira A.A. Probabilistic approach for evaluating earthquake risks, with application to the Afro-Eurasian junction. Tectonophysics. 1983b. Vol. 91. N3/4. Pp. 321–334.

#### *Information about the authors*

**Chapidze, Otari D.** Master student. E-mail: otari23@mail.ru. National Research University Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe highway, 26.

**Zhukov, Dmitry I.** Bachelor student. E-mail: izhukovdmitry@mail.ru. Kuban State Technological University. Russia, 350042, Krasnodar, st. Moscow, 2.

---

*Received in May 2019*

#### **Для цитирования:**

Чапидзе О.Д., Жуков Д.И. Модальный анализ многоэтажного железобетонного каркаса после огневого воздействия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 22–29. DOI: 10.34031/article\_5da44bf06a0238.75457055

#### **For citation:**

Chapidze O.D., Zhukov D.I. Modal analysis of multilevel concrete framework after fire exposure. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 9. Pp. 22–29. DOI: 10.34031/article\_5da44bf06a0238.75457055

DOI: 10.34031/article\_5da44cc0ad5700.29474015

**Солодов Н.В., \*Водяхин Н.В., Ищук Я.Л.***Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46**\*E-mail: partietz5000@bk.ru*

## ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НАХЛЕСТОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ ТОНКОЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

**Аннотация.** В современном, быстро развивающемся мире, полимерные материалы получают все большее распространение. Результаты различных новых исследований позволяют широко использовать их в качестве материалов для новых изделий, а также применять их при усилении несущих конструкций зданий и сооружений.

В данной статье рассмотрен вопрос повышения несущей способности нахлесточного соединения при помощи углеродного волокна. Приведена классификация различных видов композиционных материалов на основе фибры. Изложен механизм усиления стальных пластин волокном с анализом работы полимерного материала, представлены диаграммы нагружения экспериментальных образцов. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о совместной работе материалов, а также возможности применения полимерных материалов на основе углеволокна для повышения или восстановления несущей способности металлических конструкций. Приведен обзор исследований металлических конструкций, усиленных углепластиковым волокном в зарубежных странах. Результаты испытаний, проведенных в зарубежных странах за последнее время, позволяют сделать вывод о возможности применения полимерных материалов для конструкций, подвергающихся циклическим нагрузкам, а также динамическим воздействиям.

**Ключевые слова:** усиление, композитные материалы, тонколистовые пластины, углепластиковое волокно, металлические конструкции, свойства углеродных волокон, режимы разрушения образцов, влияние усталостной нагрузки, динамическая нагрузка.

**Введение.** В современном, быстро развивающемся мире, большое распространение получили полимерные материалы. Результаты различных новых исследований дают возможность широко использовать их в качестве материалов для новых изделий, а также открывают новые области их применения.

Применяемые при реконструкции и усилении строительных конструкций композиционные материалы на основе фибры (волокон) изготавливаются из собственно продолговатых микроволокон, которые омоноличены в отверждающем полимере, объединяющем их в единое целое. Самыми распространенными видами волокон являются арамидные, углеродные и стекловолокна. В качестве связывающего полимера чаще всего применяются эпоксидные или полиакринитриловые смолы. В зависимости от типа волокон (фибры), применяемых для производства композиционного материала (КМФ), их можно разделить на композиционные материалы на основе углеродных волокон (КМФУ), стекловолокон (КМФС) и арамидных волокон (КМФА). В зарубежной научно-технической литературе такие материалы получили название FRP (fibre reinforced polymer).

В последнее время большую актуальность получило применение полимерных композиционных материалов при усилении железобетонных конструкций, т.к. данный способ усиления

позволяет значительно увеличить несущую способность и жесткость конструкций, а также продлить срок эксплуатации всего сооружения.

**Основная часть.** Применение фиброармированных полимерных материалов в металлических конструкциях может найти свое место при восстановлении прочности на растяжение (при повреждении конструктивных элементов коррозией), а также при необходимости увеличения изгибной прочности или усталостной прочности.

Композитные материалы на основе углеродных волокон, применяемые при усилении строительных конструкций, обладают целым рядом преимуществ:

- стойкостью к химическому воздействию;
- высокими механическими характеристиками материалов, составляющих систему усиления;
- выносливостью и способностью воспринимать вибрационные нагрузки;
- способностью воспринимать длительное воздействие ударных и взрывных нагрузок;
- простотой монтажа и транспортировки;
- не поддерживают горение;
- высокой удельной прочностью.

К недостаткам применяемых углепластиков можно отнести:



- высокую ползучесть, что приводит с течением времени к снижению прочности на растяжение;
- необходимость высококачественной очистки поверхности бетона для обеспечения адгезии;
- низкую огнестойкость системы усиления, необходимость защиты элементов усиления от огня;
- старение углеволокна под действием ультрафиолетового излучения;
- высокую ранимость углепластиковых элементов усиления от механических повреждений;
- необходимость в дополнительной анкеровке элементов усиления большого сечения
- высокую стоимость материалов, составляющих элементы системы [1–3].

Стойкость к химическим воздействиям. Углеродные и арамидные волокна способны хорошо сопротивляться большому количеству химических воздействий: щелочам, хлоридам, кислотам, нитратам, сульфатам и др. Большинство типов стекловолокон корродируют в щелочной среде (при  $\text{pH} > 11$ ), но хорошо сопротивляются воздействию солей. Водопроницаемость арамида по сравнению с другими волокнами более значительна. Однако при большой концентрации солей может измениться кристаллическая решетка у всех типов волокон.

Электропроводимость. Арамидные и стекловолокна обладают диэлектрическими свойствами, поэтому они могут применяться для защиты линий электропередачи, а также инженерных коммуникаций.

Деформирование при сжатии. Результаты проведенных лабораторных испытаний композиционных материалов, применяемых для усиления железобетонных конструкций, показали, что прочность на сжатие меньше прочности на растяжение.

При сжатии в продольном направлении разрушение КМФ может происходить от деформаций поперечного растяжения, микроизгиба волокон в поперечном направлении или от среза. Вид разрушения может зависеть от типа волокон, а также их объемного количества в КМФ и типа отверждающего полимера. В среднем прочность на сжатие составляет от прочности на растяжение для КМФУ – 78 %, для КМФС – 55 % и для КМФА – 20 %. Ввиду малого количества проведенных исследований в настоящее время применять композиционные материалы в сжатой зоне конструкции не рекомендуется, поскольку пока невозможно гарантировать необходимую надежность работы такого усиленного железобетонного элемента.

Сопротивление ударным нагрузкам. При упругом деформировании поведение волокон во время приложения ударной нагрузки зависит от величины, полученной ими энергии. Усталостному разрушению хорошо сопротивляются волокна, которые сочетают высокую прочность на растяжение (более 3500 МПа) и обладают большим относительным удлинением (более 2 %).

Температурное воздействие. Значение коэффициентов линейной температурной деформации, составляющих конструкцию материалов, зависит от величины температурного воздействия. Для бетона она равна  $1 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Коэффициент линейной температурной деформации для стекловолокон близок к бетону, у полимера он примерно в 5 раз больше, а для углеродных волокон его значение близко к нулю. Результаты исследований доказали, что температурными воздействиями в диапазоне температур от  $-28 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+28 \text{ }^{\circ}\text{C}$  можно пренебречь [2].

Воздействие огня. Стекловолокна способны сохранять свою прочность вплоть до точки плавления (более  $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), тогда как углеродные волокна подвержены окислению на воздухе при более низком значении температуры – около  $275^{\circ}\text{C}$ . Арамидные волокна нельзя использовать при температуре более  $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Экспериментальные исследования [7] свидетельствуют, что при температурах порядка  $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , что гораздо выше температуры стеклования полимера, прочность на растяжение КМФУ и КМФС снижается примерно на 20 %. Все типы волокон не поддерживают горение. В композиционных материалах при пожаре определяющим будет поведение отверждающего полимера, т.к. при его возгорании могут выделяться токсичные вещества.

Реологические свойства. Ползучесть различных композиционных материалов изменяется в больших пределах, то есть при постоянной нагрузке со временем их прочность на растяжение уменьшается. При этом время ретардации зависит от неблагоприятных воздействий среды – высокой или низкой температуры, ультрафиолетового облучения, щелочного воздействия, циклов «замораживание – оттаивание». Результаты испытаний [7] показали линейную величину длительной прочности от логарифма времени для любого уровня приложенной нагрузки. При испытаниях протяженностью более 500 000 часов коэффициент длительной прочности составил для КМФС – 0,3, для КМФА – 0,47 и для КМФУ – 0,91. Таким образом, можно констатировать, что углеродные волокна практически не подвержены ползучести. Введение в расчет соответствующих понижающих коэффициентов надежности позволяет учесть длительную прочность композиционных материалов.

Чжао и Чжан в исследованиях, проведенных в 2007 году, классифицировали шесть режимов разрушения стальных соединений с углеволокном, в том числе: (а) Стальной и клеевой разрыв зоны контакта; (б) когезионное разрушение (разрушение клеевого слоя); (в) разрушение зоны

контакта углепластика и адгезива; (г) расслаивание углепластика (отделение некоторых углеродных волокон от матрицы смолы); (д) разрыв углеволокна; (е) разрыв стали, как показано на рисунке 1 [8].

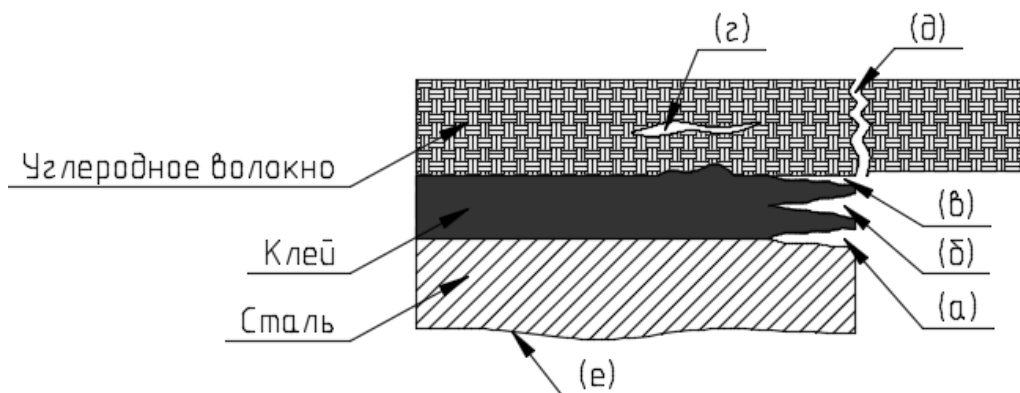


Рис. 1. Классификация режимов разрушения стальных соединений с углеволокном

Связь между углепластиком и сталью является ключевым вопросом при усилении стальных конструкций. Обширные исследования на поведение связи при статической нагрузке были проведены исследователями из Китая – S.H Xia и JG Teng [9].

Для исследования возможного повышения несущей способности нахлесточных соединений тонколистовых деталей было законструировано и изготовлено 2 группы образцов. Образцы первой группы представляли собой нахлесточное соединение в виде трех пластин, соединенных двумя высокопрочными болтами. Общий вид образцов представлен на рис. 2. Класс высокопрочных болтов 10.9.

Образцы были законструированы таким образом, чтобы возможность среза болтов при сдвигающей нагрузке была исключена, а также исключалось смятие кромок крайних пластин, что позволило их использовать в виде сменной оснастки. С целью получения фактической несущей способности по критерию смятия кромки средней пластины было испытано 3 образца.

Величина средней фактической несущей способности составляет 18,1 кН. Величина расчетной несущей способности образца по критерию смятия равна 10,9 кН. На рис. 3 приведено фото образца первой группы после испытаний. Стоит отметить классический вариант разрушения кромки средней пластины.

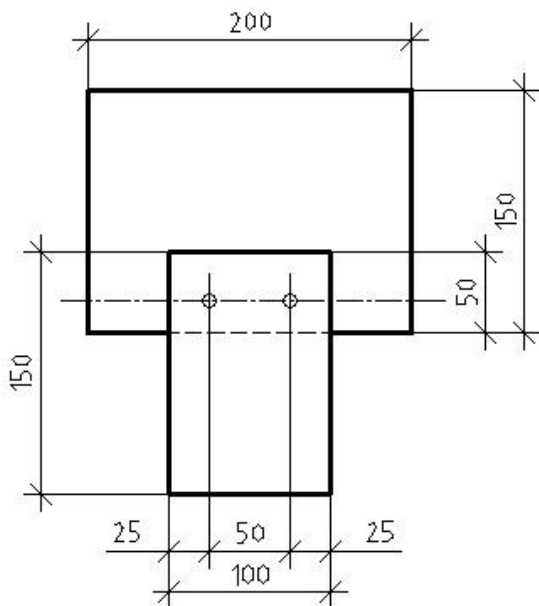


Рис. 2. Общий вид образцов первой группы

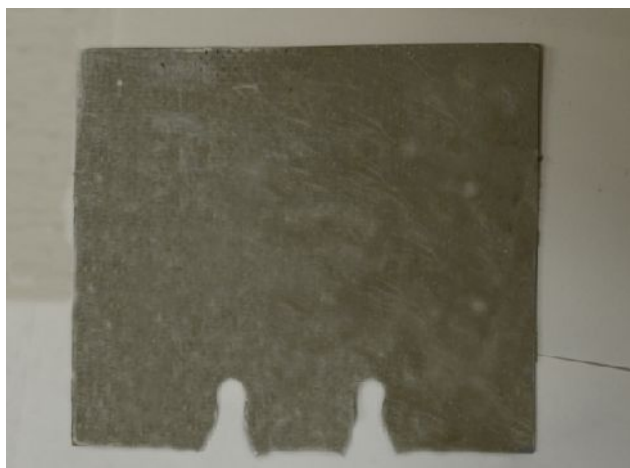


Рис. 3. Общий вид образца первой группы после испытаний

Образцы второй группы представляли собой нахлесточное соединение из трех пластин, усиленных углепластиковым волокном FibArm 530/300. В качестве клеевого слоя использовалась полиэфирная смола Reoflex. Перед укладкой клея на поверхности пластины были нанесены заготовки с шагом 7 мм под углом  $45^\circ$  в двух направлениях, после чего поверхности обезжирили. Затем, с помощью кисти, равномерно наносили клей, после чего последовало нанесение первого слоя с использованием валика для насыщения листа углепластика смолой и выдавливания пузырьков воздуха и избыточного клея. Та же процедура была использована для других слоев углепластика. Усиление пластин было выполнено в двух направлениях с каждой стороны – первый

слой углеродного волокна наклеивался в поперечном направлении, а затем, через 15 минут, наклеивался второй слой в продольном направлении.

Анализ работы полимерного материала под нагрузкой показал, что для достижения наилучшей работы полимера необходимо устройство именно двух слоев в каждом из направлений.

В соответствии с рекомендациями производителя было выдержано необходимое время отверждения в течение пяти суток.

Образцы каждой группы были испытаны в универсальной гидравлической установке WEW-600 грузоподъемностью 60 т. Нагружение образцов производилось плавно с постоянной скоростью равной 10 кгс/с.



Рис. 4. Общий вид испытания образцов нахлесточных соединений

На рис. 5 приведен общий вид экспериментальных образцов после испытаний. Следует отметить пластичный характер разрушения исследуемых образцов, что ярко выражено на результатах диаграммы образцов (рис. 6).

На основании результатов испытаний была построена диаграмма нагружения образцов в координатных осях: нагрузка, кН (вертикальная ось) – ход подвижной траверсы, мм (горизонтальная ось), общий вид диаграммы приведен на рис. 6.



Рис. 5. Общий вид образца второй группы после испытаний

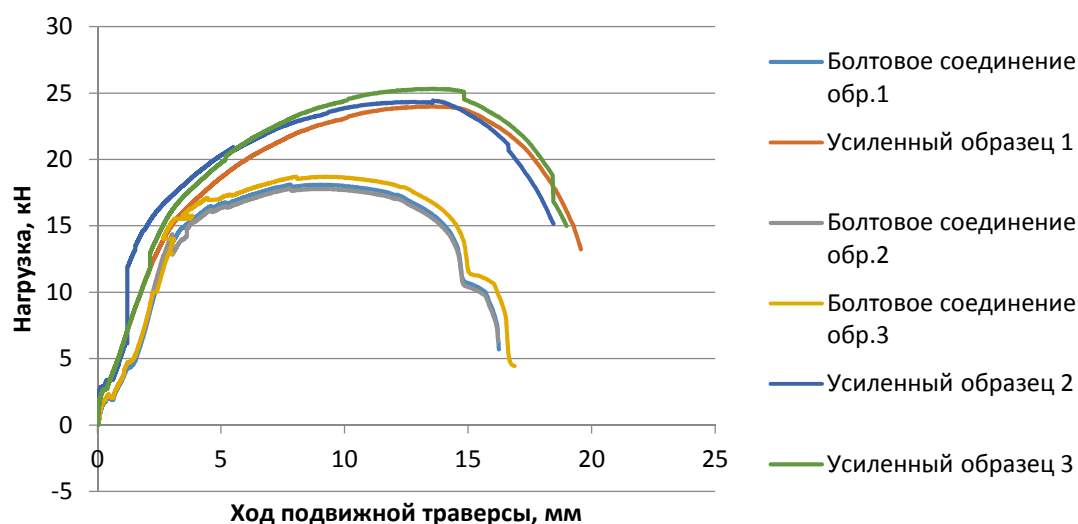


Рис. 6. Диаграмма нагружения образцов нахлесточных соединений

Величина средней фактической несущей способности образцов до усиления составила 18,1 кН, после усиления волокном – 24,1 кН. Соотношение результатов испытаний двух групп позволяет сделать вывод об увеличении несущей способности образцов на 33 %. Образцы второй группы имели схожий характер разрушения тонкой пластины (выкол металла), однако присутствует ярко выраженный характер деформирования зоны металла под болтами в направлении приложенной силы, что также можно отнести к учету совместной работы материалов.

**Вывод.** На основании полученных данных можно сделать вывод о возможности применения полимерных материалов на основе углеволокна для повышения или восстановления несущей

способности металлических конструкций. Однако, в таком случае, мы сталкиваемся с проблемой отсутствия на сегодняшний день в отечественных нормах методики расчета.

Также стоит отметить, что отечественные исследования, посвященные проблеме усиления металлических строительных конструкций композитными материалами на основе углеволокна, практически отсутствуют, что способствует развитию целого направления научных исследований с разработкой методики расчета.

Анализ вопроса применимости полимерных материалов в конструктивных системах европейских стран позволил сделать вывод об их широком распространении в строительном кластере и за его пределами.

В странах дальнего зарубежья данное направление имеет большую популярность, а численность новых исследований постоянно возрастает.

Помимо исследований на статические нагрузки, были проведены испытания с применением динамической нагрузки.

Так, например, исследователи H.A. Al-Zubaidy, X.L. Zhao и R. Al-Mahaidi на основании проведенных испытаний пришли к выводу, что при динамической нагрузке прочность соединения вырастает значительно, поскольку повышается прочность эпоксидной смолы на сдвиг [10].

Результаты исследований, проведенных H.B. Liu, X.L. Zhao и R. Al-Mahaidi на тему влияния усталостной нагрузки на прочность пластин, усиленных углеволокном позволили сделать вывод о том, что решающую роль при циклических нагрузках оказывает величина прикладываемого усилия, а при приложении нагрузки, составляющей менее 40 % от предельной статической нагрузки, разрушения образцов не наблюдалось [11].

Экспериментальным путем было доказано, что применение композитов из углепластика на элементах из конструкционной стали повышает жесткость соединения (Ghafoori и Motavalli 2013), прочность на изгиб (Ghafoori и Motavalli 2015 a & b) и сопротивление усталостному разрушению (Ghafoori et al. 2015 a, Ghafoori et al. 2015b, Ghafoori et al. 2015c) [12].

Однако, до настоящего времени очень мало внимания уделялось анализу жесткости стальных пластин, усиленных углеволокном. Yiyuan Lu и соавторы предложили свою деформационную модель стальных пластин, усиленных углеволокном и на ее основе, с помощью математического анализа, сделали вывод, что жесткость соединения увеличивается почти линейно с увеличением длины зоны анкерки.

Omar H. Elkhabeery и соавторы экспериментальным путем доказали эффективность усиления углепластиковыми холстами стальных балок двутаврового сечения, а также разработали аналитическую методику их расчета.

Изучением работы клевого шва между углепластиком и стальными пластинами при циклической нагрузке занимались Long Zhang и соавторы. На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований авторами была предложена расчетная модель для описания взаимосвязи между скоростью развития трещин и величиной напряжений при циклически повторяющихся нагрузках.

Однако, все выше перечисленные исследования были проведены зарубежными коллегами.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Часть 1. Отечественные эксперименты при статическом нагружении // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Том 8. №3. <http://naukovedenie.ru/PDF/> (доступ свободный).
2. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Часть 2. Влияние температуры // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Том 8. №4. <http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN416.pdf> (доступ свободный).
3. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Чесноков Г.В., Покулаев К.В., Татиев Д.А. Особенности расчета металлических конструкций, усиливаемых фиброармированными пластиками // Инновации и исследования в транспортном комплексе: Материалы II Международной научно-практической конференции. Курган. 2014. 456 с.
4. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Чесноков Г.В., Покулаев К.В., Татиев Д.А. О разработке нормативных документов по усилению металлических строительных конструкций композиционными материалами // Инновации и исследования в транспортном комплексе: Материалы II Международной научно-практической конференции. Курган. 2014. С. 151–157.
5. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Татиев Д.А., Покулаев К.В. Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками: Часть 1. Состояние проблемы // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 3. С. 1–27. Идентификационный номер статьи в журнале 19TVN314.
6. Шилин А.А. и др. Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами. Часть 1. М.: Стройиздат, 2007. 184 с.
7. Long Zhang, Shuangyin Cao, and Xin Tao, Experimental Study on Interfacial Bond Behavior between CFRP Sheets and Steel Plates under Fatigue Loading. Materials. 2019. Vol. 12. Pp. 377–391.
8. Al-Zubaidy H. A., Zhao X. L., Al-Mahaidi R. Effect of Impact Tensile Load on Strength of CFRP Bonded Steel Plate Joints // The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. 2011. Vol. 14. Pp. 1312–1317.
9. Elkhabeery O.H., Safar S.S., Mourad S.A. Flexural strength of steel I-beams reinforced with CFRP sheets at tension flange // Journal of Constructional Steel Research. 2018. Vol. 148. Pp. 572–588.
10. Lu Y., Li W., Ghafoori E., Liang H., Liu Z. Stiffness prediction of CFRP/steel double strap joints



// Fourth Conference on Smart Monitoring. 2017. Vol. 18(1). Pp. 117–125.

11. Liu H.B., Zhao X.L., R. Al-Mahaidi, The effect of fatigue loading of bond strength of CFRP bonded steel plate joints // Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures. 2005. Pp. 451–456.

#### Информация об авторах

**Солодов Николай Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: solodov\_niko\_v@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Водяхин Николай Вячеславович**, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: partietz5000@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

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

Поступила в июле 2019 г.

© Солодов Н.В., Водяхин Н.В., Ищук Я.Л., 2019

**Solodov N.V., \*Vodyahin N.V., Ishchuk Y.L.**

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

*Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46*

*\*E-mail: partietz5000@bk.ru*

## IMPROVING THE STRENGTH OF HARNESSING CONNECTION OF THIN-SHEET PLATES

**Abstract.** *In the modern, rapidly developing world, polymeric materials are widely used. The results of various new studies allow them to be widely used as materials for new products, as well as to apply them when strengthening the supporting structures of buildings and structures.*

*This article discusses the issue of increasing the carrying capacity of lap-joints using FRP sheets. The classification of various types of fiber-based composite materials is given. The mechanism of reinforcement of steel plates with fiber with the analysis of the work of a polymeric material is presented; loading diagrams of experimental samples are presented. The analysis of the obtained results allows us to conclude about the joint work of materials, as well as the possibility of using polymer materials based on carbon fiber to increase or restore the bearing capacity of metal structures. A review of studies of metal structures reinforced with carbon fiber in different countries is given. The results of tests conducted in different countries allow us concluding that polymeric materials can be used for structures subjected to cyclic loading, as well as dynamic effects.*

**Keywords:** *strengthening, composite materials, thin-sheet plates, FRP sheets, metal structures, properties of FRP sheets, modes of sample failure, the effect of fatigue load, dynamic load.*

### REFERENCES

1. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. Analysis of experimental studies strengthening of reinforced concrete structures by polymer composite materials. Part 1. Native experiments under static load [Analiz eksperimentalnykh issledovaniy po usileniyu zhelezobetonnykh konstruktsiy polimernymi kompozitnymi materialami. Chast 1. Otechestvennyye eksperimenty pri staticheskom nagruzhении]. Naukovedenie. 2016. Vol. 8. No. 3. <http://naukovedenie.ru/PDF/> (rus)

2. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. Analysis of experimental studies strengthening of reinforced concrete structures by polymer composite materials. Part 2. Study of the effect of temperature [Analiz eksperimentalnykh issledovaniy po usileniyu zhelezobetonnykh konstruktsiy polimernymi kompozitnymi materialami. Chast 2. Vliyaniye temperatury]. Naukovedenie. 2016. Vol. 8. No. 4. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN416.pdf> (rus)

3. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Tatiev D.A., Pokulaev K.V. Strengthening of metal structures by fibro-reinforced



plastics. [Osobennosti rascheta metallicheskih konstruktsiy, usilivaemyih fibroarmirovannyimi plastikami]. Innovatsii i issledovaniya v transportnom komplekse: Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kurgan. 2014. Pp. 141–151. (rus)

4. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Pokulaev K.V., Tatiev D.A. On the development of regulatory documents on the strengthening of metal building structures with composite materials [O razrabotke normativnykh dokumentov po usileniyu metallicheskih stroitelnykh konstruktsiy kompozitsionnyimi materialami]. Innovatsii i issledovaniya v transportnom komplekse: Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kurgan. 2014. Pp. 151–157. (rus)

5. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Tatiev D.A., Pokulaev K.V. Strengthening of metal structures by fibro-reinforced plastics. Part 1. Co-standing of the problem [Usilenie metallicheskih konstruktsiy fibroarmirovannyimi plastikami: chast 1. Sostoyanie problemy]. Naukovedenie. 2014. No. 3. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/19TVN314.pdf> (rus)

6. Shilin A.A. etc. External bonding of concrete structures with composite materials. Part 1 [Vneshnee armirovanie zhelezobetonnykh konstruktsiy kompozitnyimi materialami. Chast 1]. M. Stroiizdat. 2007. 184 p. (rus)

7. Long Zhang, Shuangyin Cao, and Xin Tao, Experimental Study on Interfacial Bond Behavior between CFRP Sheets and Steel Plates under Fatigue Loading. Materials. 2019. Vol. 12. Pp. 377–391.

8. Al-Zubaidy H. A., Zhao X. L., Al-Mahaidi R. Effect of Impact Tensile Load on Strength of CFRP Bonded Steel Plate Joints. The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. 2011. Vol. 14. Pp. 1312–1317.

9. Elkhabeery O.H., Safar S.S., Mourad S.A. Flexural strength of steel I-beams reinforced with CFRP sheets attention flange. Journal of Constructional Steel Research. 2018. Vol. 148. Pp. 572–588.

10. Lu Y., Li W., Ghafoori E., Liang H., Liu Z. Stiffness prediction of CFRP/steel double strap joints. Fourth Conference on Smart Monitoring. 2017. Vol. 18(1). Pp. 117–125.

11. Liu H.B., Zhao X.L., Al-Mahaidi R. The effect of fatigue loading of bond strength of CFRP bonded steel plate joints. Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures. 2005. Pp. 451–456.

12. Redikultsev E.A. Numerical research of behavior of ferro-concrete elements by means of program complex ANSYS. Akademicheskij vestnik uralniiproekt RAASN. 2009. Vol. 2. Pp. 81–87.

#### *Information about the authors*

**Solodov, Nikolay V.** PhD, Assistant professor. E-mail: [solodov\\_niko\\_v@mail.ru](mailto:solodov_niko_v@mail.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Vodyahin, Nikolay V.** Postgraduate student. E-mail: [partietz5000@bk.ru](mailto:partietz5000@bk.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Ishchuk, Yana L.** Postgraduate student. E-mail: [Yana.ishuk@yandex.ru](mailto:Yana.ishuk@yandex.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received in July 2019*

#### **Для цитирования:**

Солодов Н.В., Водяхин Н.В., Ищук Я.Л. Повышение несущей способности нахлесточного соединения тонколистовых деталей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 30–37. DOI: 10.34031/article\_5da44cc0ad5700.29474015

#### **For citation:**

Solodov N.V., Vodyahin N.V., Ishchuk Y.L. Improving the strength of harnessing connection of thin-sheet plates. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 9. Pp. 30–37. DOI: 10.34031/article\_5da44cc0ad5700.29474015

DOI: 10.34031/article\_5da44d75248a17.80826244

**Наумов А.Е., Шевченко А.В., \*Долженко А.В., Бодяков С.Н., Гвасалия Х.Д.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46

\*E-mail: dolzhenko.av@bstu.ru, da7182@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ КОНТАКТА ПЛАСТИКОВОЙ ТРУБЫ И БЕТОНА ПРИ РАСЧЕТЕ ПЛАСТИКОТРУБОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Аннотация.** Представлены численные исследования напряженно-деформированного состояния центрально сжатых коротких пластикотрубобетонных (ПТБ) цилиндрических стоек, экспериментально получено и проанализировано влияние касательных сил трения на границе слоев бетонного ядра и пластиковой оболочки на напряженно-деформированное состояние ПТБ стойки в предположении упругой работы материалов ядра и оболочки. Необходимость проведения данных исследований связана с недостатком теоретических и численных исследований влияния касательных сил трения на напряженно-деформированное состояние такого вида конструктивных элементов, в том числе и классического решения со стальной оболочкой. В связи с этим, математическое моделирование и создание инженерных методик расчета ПТБ на основе изучения действительной совместной работы бетонного ядра и цилиндрической пластиковой оболочки имеет существенный научный потенциал.

Выполненные расчеты продемонстрировали справедливость с инженерной точностью использования математической модели короткой ПТБ стойки для проведения инженерных расчетов и структурного анализа конструкции. Установлено, что использование аналитической модели позволяет исследовать влияние вариации физико-механических свойств материалов ядра и оболочки ПТБ на параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции и осуществлять рациональное проектирование ПТБ элементов в составе конструкций гражданских и промышленных зданий с привязкой к фактически используемым широко представленным на рынке материалам.

**Ключевые слова:** пластикотрубобетон, труботетон, трехосное сжатие, касательные силы, трение, прочностные расчеты строительных конструкций.

Труботетонные колонны с оболочкой из стальных труб широко используются в строительстве из-за своей высокой прочности, устойчивости, пластичности и огнестойкости [1]. Такие колонны имеют более высокую чем у обычных железобетонных колонн жесткость. Существующие методики их расчета основываются на эмпирических данных, однако требуют учета ненормируемых, определяемых экспериментально, параметров, существенно усложняющих применение этих методик реальном проектировании [2–6].

Ранее авторами было предложено использование в качестве оболочки труботетонных колонн пластиковой трубы и обоснована возможность её использования в качестве оболочки центрально сжатых труботетонных элементов при малых сжимающих нагрузках с сохранением основных преимуществ классического труботетона [7, 8]. Однако, полученные аналитические зависимости и результаты численного моделирования пластикотрубобетонной стойки нуждаются в экспериментальном подтверждении [9].

В текущей работе авторы рассматривают влияние касательных сил трения на границе слоев бетонного ядра и пластиковой оболочки на напряженно-деформированное состояние ПТБ стойки в предположении упругой работы материалов ядра и оболочки с учетом экспериментально

полученных данных по влиянию сил трения на напряженно-деформированное состояние ПТБ стойки.

Рассмотрим работу сил трения при осевом сжатии ПТБ стойки. Вырежем круговой сегмент  $d\theta$ . За счет разности модулей деформации, в продольном направлении, происходит передача сдвигающих усилий с пластиковой оболочки на бетонное ядро. В случае передачи через силы трения сдвигающие усилия на контакте вызовут сдвигающие напряжения в оболочке и ядре. Рассмотрим всю конструкцию, как составной стержень. Участок между осями, будет играть роль шва, обладающего некоторой податливостью (рис. 1).

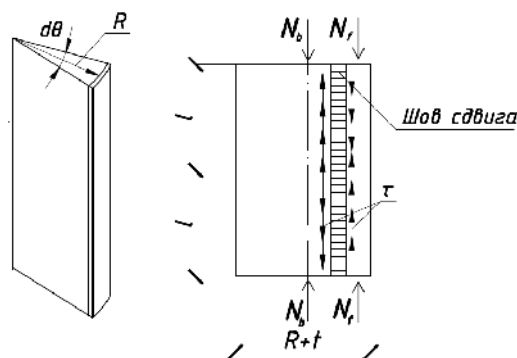


Рис. 1. К определению сил трения в пластикотрубобетоне

Для оценки взаимодействия на контакте пластиковой оболочки и бетонного ядра рассмотрим испытанный образец как составной стержень, передающий усилия с одного элемента на другой [8, 9].

Решение для суммарных сдвигающих усилий во внецентренно сжатом составном стержне, согласно [10, 11] имеет вид:

$$T = C_1 \operatorname{sh}(\lambda x) + C_2 \operatorname{ch}(\lambda x) - \frac{A}{\gamma},$$

$$\sum EJ = E_b \int_0^{2\pi} \frac{1}{36} R^4 d\theta + E_f \int_0^{2\pi} \frac{5}{36} [(R+t)^4 - R^4] d\theta = E_b \frac{\pi}{18} R^4 + E_f \frac{5\pi}{18} [(R+t)^4 - R^4]$$

$A_b$  – площадь бетона;  $A_f$  – площадь оболочки;  $R$  – внутренний радиус цилиндрической оболочки;  $t$  – толщина оболочки;  $E_b$  – модуль деформации бетона;  $E_f$  – модуль деформации оболочки;  $s$  – расстояние между осями инерции сектора ядра батона и оболочки;  $N_f$  – усилие в оболочке;  $\xi$  – коэффициент жесткости шва.

Коэффициент жесткости шва найдем, интегрируя характеристику жесткости шва по контакту между бетоном и материалом оболочки:

$$\xi = \int_0^{2\pi} \left( \frac{1}{2G_f} + \frac{1}{R G_b} \right)^{-1} R d\theta = \left( 2\pi R \left( \frac{2}{t G_f} + \frac{3}{R G_b} \right)^{-1} \right),$$

$$G_b = \frac{E_b}{2(1+\mu_b)},$$

$$G_f = \frac{E_f}{2(1+\mu_f)},$$

здесь  $G_b$  – модуль сдвига бетона;  $G_f$  – модуль сдвига пластика;  $\mu_b$  – коэффициент Пуассона бетона;  $\mu_f$  – коэффициент Пуассона материала оболочки.

Усилия сдвига передаются от оболочки на бетонное ядро по известной зависимости [4]:

$$T = \frac{1}{\gamma \operatorname{sh}(\lambda L)} \left[ \frac{P}{E_b A_b} \operatorname{sh}(\lambda(L-x)) - \frac{P}{E_b A_b} \operatorname{sh}(\lambda L) - \frac{P}{E_f A_f} \operatorname{sh}(\lambda x) \right], \quad (1)$$

а сдвигающие напряжения будут равны:

$$\tau = \frac{\lambda}{\gamma \operatorname{sh}(\lambda L)} \left[ -\frac{P}{E_b A_b} \operatorname{ch}(\lambda(L-x)) - \frac{P}{E_f A_f} \operatorname{ch}(\lambda x) \right]. \quad (2)$$

При решении этой задачи необходимо учесть следующие особенности: физическую нелинейность бетона и пластика [12, 13], учет обжатия бетонного ядра пластиковой оболочкой, а также напряженно-деформированное состояние шва.

Для вычисления сил трения, будем считать их пропорциональными прижимающим силам, а именно давлению пластика на бетон –  $p$ . Трение противодействует сдвигу с силой:

$$T_{\text{тр}} = p A \phi l, \quad (3)$$

здесь

$$\Delta = -\frac{N_f}{E_f A_f} + \frac{N_b}{E_b A_b} = -\frac{\sigma_{f2}}{E_f} + \frac{\sigma_b}{E_b},$$

$$\gamma = \frac{1}{E_f A_f} + \frac{1}{E_b A_b} + \frac{c^2}{\sum EJ},$$

$$\lambda = \sqrt{\xi \gamma},$$

где  $\phi$  – коэффициент трения пластика по бетону,  $p$  – давление оболочки на бетонное ядро;  $A$  – площадь;  $l$  – длина участка.

С целью уточнения коэффициента  $\phi$  авторами были проведены экспериментальные исследования, моделирующие смещение бетона относительно пластика (рис. 2 и 3).

По результатам испытания сдвиг элементов ПТБ стойки на большинстве испытанных образцов произошел при нагрузках 600–700 кг (рис. 4).



Рис. 2. Экспериментальные исследования

Предельную прочность сцепления пластика с бетоном (сопротивление сдвигу)  $R_{b,sh}$ , примем на основе псевдозернистой модели бетона, описанной в [14].

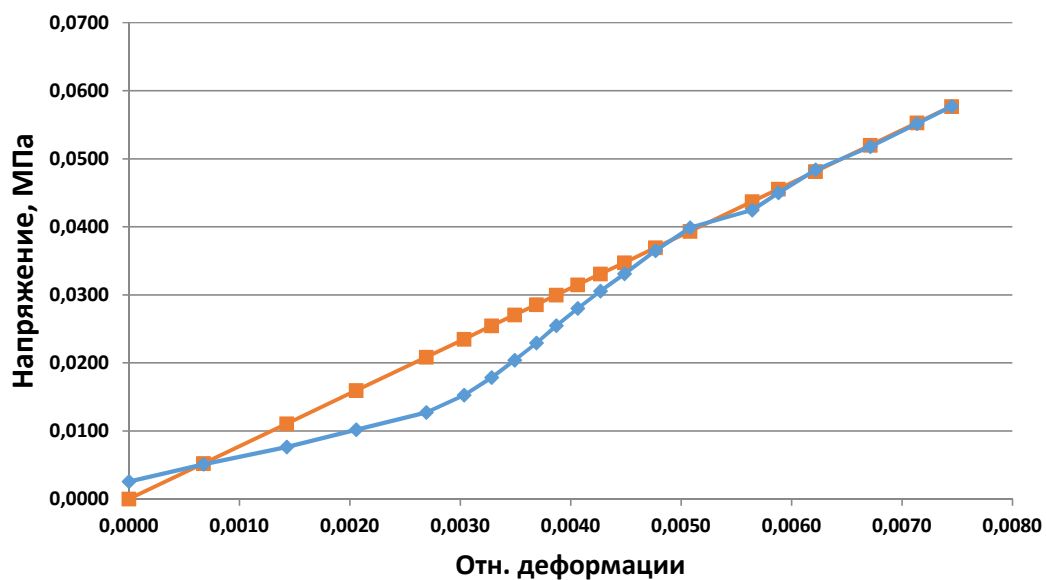
При значении угла наклона площадок сдвига  $\alpha = 0$  и наличия на них нормального давления  $p$  предельное сопротивление сдвигу равно

$$R_{b,sh} = R_{bt,n} \frac{\phi}{2} + p \phi,$$

где  $R_{bt,n}$  – нормативное сопротивление бетона осевому растяжению.



Рис. 3. Деформация образца в процессе испытания нагрузкой

Рис. 4. График зависимости напряжений на границе слоев  $\sigma_2$  от относительной деформации их смещения  $\xi$  относительно друг друга

В расчете принимается следующая предпосылка-если напряжения на контакте меньше прочности сцепления пластика с бетоном  $R_{b,sh}$ , то усилия в шве вычисляются по зависимостям (1) и (3), в противном случае на контакте действуют только силы трения.

$$\frac{\tau}{2\pi R} = \begin{cases} \frac{\tau}{2\pi R}, & \frac{\tau}{2\pi R} \leq R_{b,sh} \\ p\varphi, & \frac{\tau}{2\pi R} > R_{b,sh} \end{cases}$$

В случае, если напряжения на контакте превышают величину  $R_{b,sh}$ , то напряжения в бетоне и пластике находим по следующим формулам полученным ранее [9].

Если условие прочности на контакте выполняется, то напряжения в бетоне и пластике находим по формулам

$$\sigma_{f2} = \frac{T_{tot}}{A_f}, \quad (4)$$

$$\sigma_{b3} = \frac{N - T_{tot}}{A_b}, \quad (5)$$

здесь  $T_{tot}$  сдвигающие силы в рассматриваемом сечении, определяемые по формулам 1 и 3.

Для учета физической нелинейности в формулах 1 и 3, а также в коэффициенте жесткости шва заменим  $E_b$  на  $k_3 E_b$  и  $E_f$  на  $v_f E_f$ .

В качестве реализации данной методики рассчитаем элемент длиной 100 мм с внутренним

диаметром трубы 100 мм. Толщина стенки пластиковой оболочки 5 мм. Материал ядра – тяжелый бетон класса В15. Начальный модуль упругости бетона  $E_b=24000$  МПа. Коэффициент Пуас-

сона  $\mu_b^0 = 0,2$ . Материал оболочки – полипропилен (ТУ 2248-001-22230841-2004). Модуль упругости пластика  $E_f=1983$  МПа. Коэффициент Пуассона  $\mu_f^0 = 0,42$ . Диаграммы деформирования материалов даны на рис. 5 и 6.

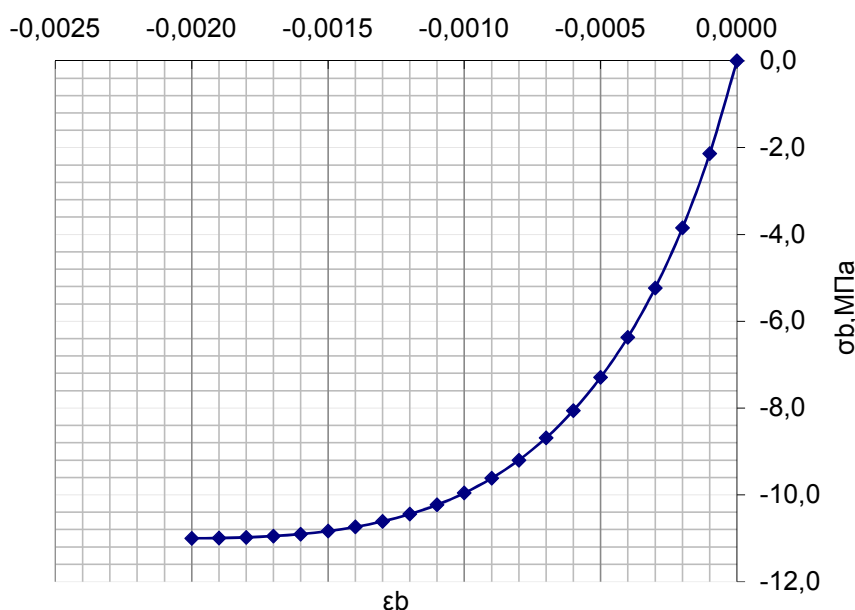


Рис. 5. График деформации бетонного ядра

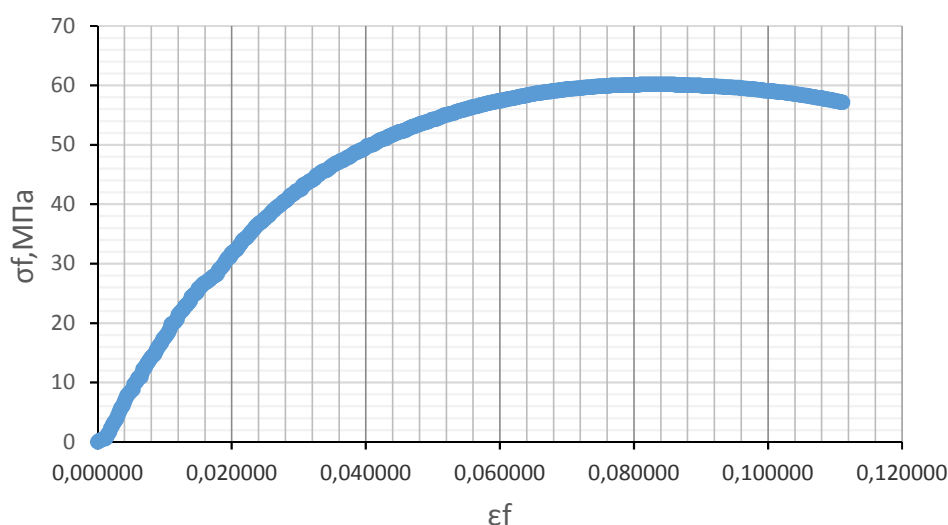


Рис. 6. График деформации пластиковой оболочки

Расчет ведем шагово-итерационным методом. Параметры, по которым контролируется сходимость-относительные деформации бетона и пластика, силы в контактном шве, длина контакта, где соблюдается условие прочности шва. Разбиваем конструкцию на участки длиной 5 мм и производим расчет по формулам 1 и 3.

Расчет показал, что разрушение трубобетона по контакту наступило при нагрузке 825 Н.

Результаты расчетов показаны на рис. 7–9.

Из графиков видно, что полные деформации бетона и относительные смещения имеют разные характеристики. Например, тангенсы углов наклона до начала разрушения на контакте различаются на порядок. Поэтому применение зависимости « $\tau$ - $U$ » на основе полных перемещений бетонного ядра, которое легко получить экспериментально, справедливо лишь при оценке прочности конструкции в целом, а именно в момент разрушения.



Расчет показал, что разрушение контактной зоны «пластик-бетон» начался гораздо раньше полного разрушения при сдвиге. Начало разрушения составило 54,5 % от разрушающей нагрузки. Далее постепенно происходило выключение контакта и препятствие сдвигу переходило к силам трения (см. графики распределения сдвигающих напряжений на контакте). Характер деформаций сдвига показывает, что после начала разрушения контакта относительные смещения

практически прекратились, что связано с выключением контакта «пластик-бетон» и дальнейшей работой только сил трения в этой зоне. Этот конструктивно-нелинейный эффект необходимо учесть при расчете трещиностойкости трубобетона, когда образованию и раскрытию трещин препятствуют силы на контакте, что особенно важно для слабо армированных трубобетонных конструкций.

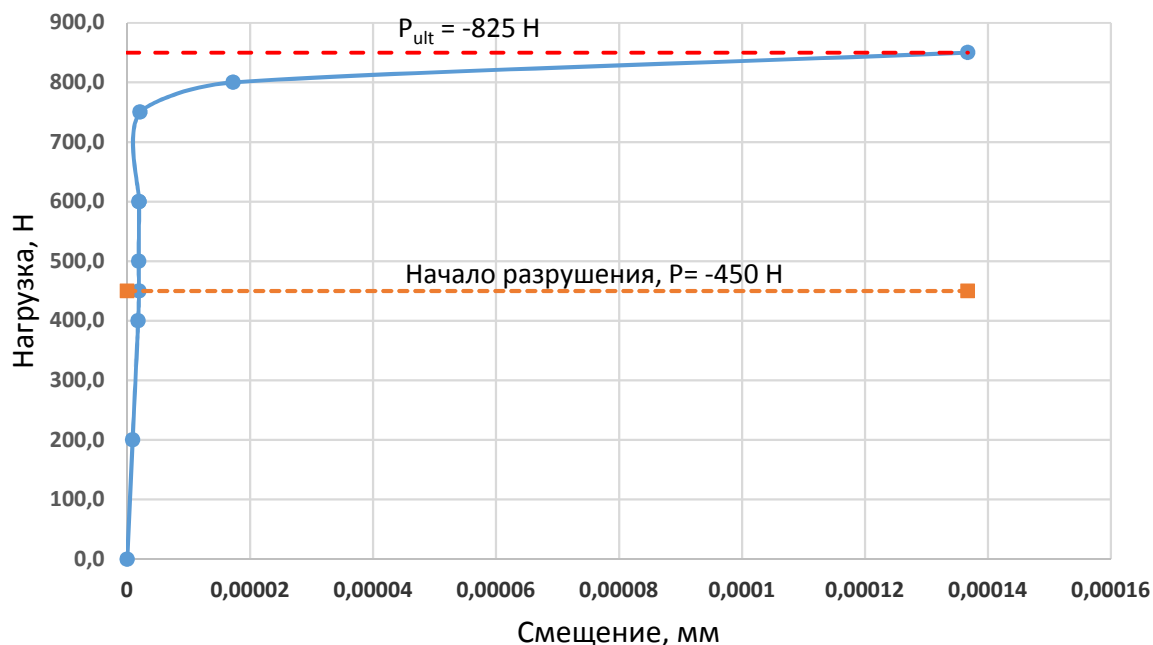


Рис. 7. График относительных смещений бетонного ядра относительно пластиковой оболочки

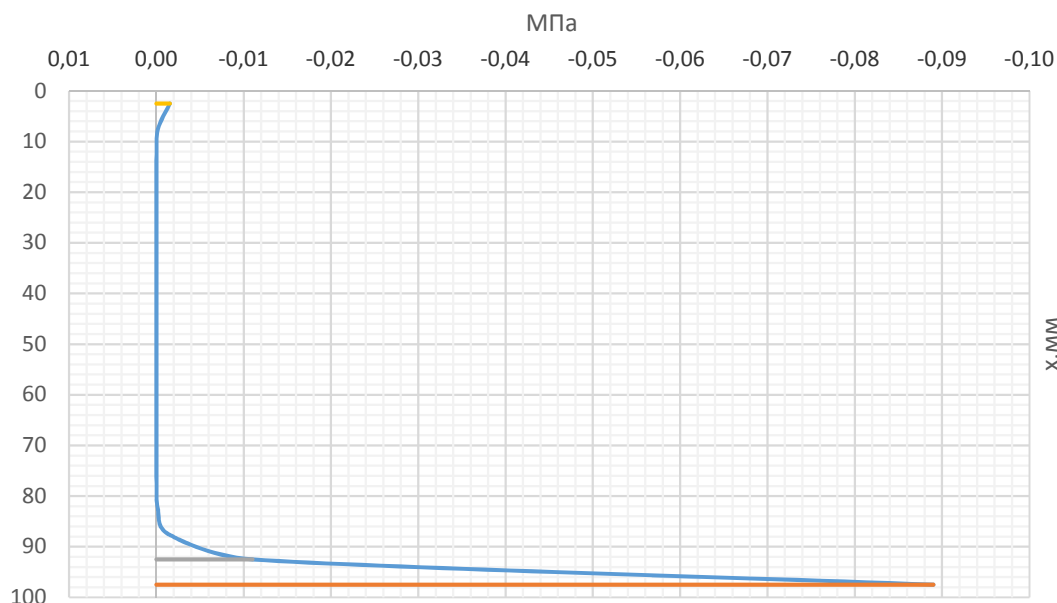
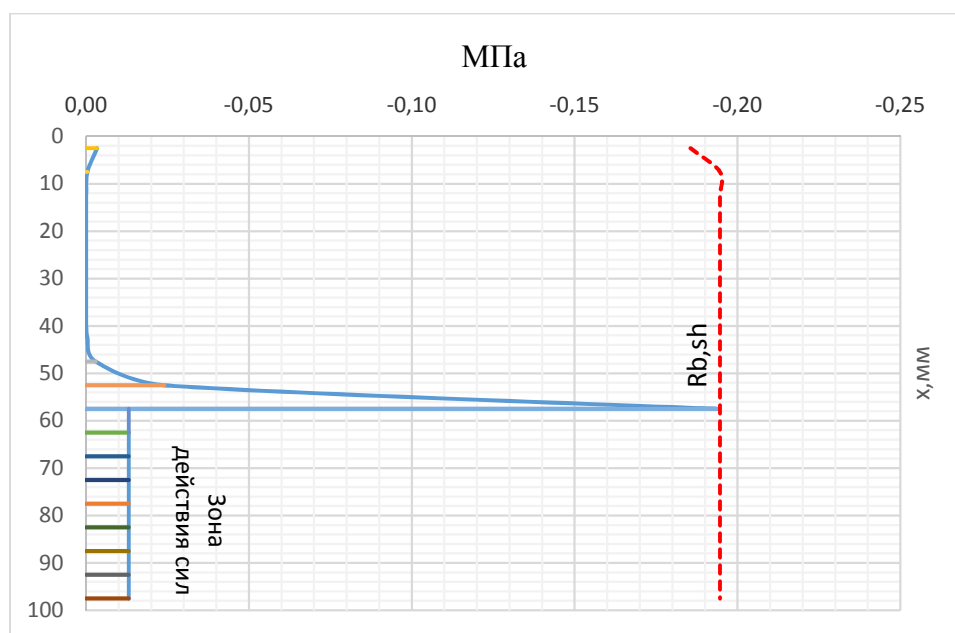


Рис. 8. Распределение сдвигающих напряжений на контакте при  $P=200\text{Н}$



Рис. 9. Распределение сдвигающих напряжений на контакте  $P=-600\text{Н}$ 

Таким образом, представленные в работе аналитические зависимости, анализ экспериментальных данных и сформированная на их основе методика расчета параметров НДС ПТБ стоек позволяет учитывать фактическое трение между бетонным ядром и пластиковой оболочкой, реализуя потенциал детального учета фактических условий работы конструкций, в действительности выполняемых из широкого спектра материалов, обладающих существенным разнообразием прочностных и деформативных свойств.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шахворостов А.И. Исследование напряженно-деформированного состояния трубобетона на напрягающем цементе, Дисс...канд. техн. наук. М., 2000.
2. Кришан А.Л., Сагадатов А.И. Трубобетонные элементы с предварительно обжатым ядром - Бетон и железобетон - пути развития. Научные труды 2-ой Всероссийской конференции по бетону и железобетону. 5-9 сентября 2005. Т. 2. М.: НИИЖБ, 2005.
3. Sakino K., Nakahara H., Morino S., Nishiyama I., Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns // Struct. Eng. ASCE 2004. Vol. 130(2). Pp. 180–188.
4. Schneider S.P. Axially loaded concrete-filled steel tubes // Struct. Eng. ASCE. 1998. Vol. 124. Pp. 1125–1138.
5. Huang C.S., Yeh Y.K., Liu G.Y., Hu H.T., Tsai K.C., Weng Y.T., Wang S.H., Wu M.H., Axial load behavior of stiffened concrete-filled steel columns // Struct. Eng. ASCE. 2002. Vol. 128(9). Pp. 1222–1230.
6. Uy B., High-strength steel-concrete composite columns for buildings // Struct. Build. 2003. Vol. 156. Pp. 3–14.
7. Dolzhenko A., Naumov A., Shevchenko A. Bearing capacity and rigidity of short plastic-concrete-tubal vertical columns under transverse load // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. 327 p.
8. Долженко А.В., Наумов А.Е., Шевченко А.В., Стойкович Н. Численные исследования напряженно-деформированного состояния пластикотрубобетонного центрально-сжатого короткого стержня // Вестник БГТУ. 2018. № 10. С. 23–32.
9. Долженко А.В., Наумов А.Е. Шевченко А.В., Стойкович Н. Влияние касательных сил трения на напряженно-деформированное состояние пластикотрубобетонного центрально-сжатого короткого стержня // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №12. С. 42–51.
10. Ржаницын А.Р. Составные стержни и пластинки, М.: Стройиздат, 1986. 316 с.
11. Колчунов В.И., Панченко Л.И. Расчет составных тонкостенных конструкций. М.: Изд-во АСВ, 1999. 281 с.
12. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
13. Филин А.П. Элементы теории оболочек. Изд. 2-е, доп. и перераб. Л.: Стройиздат, 1975. 256 с.
14. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном, М.: Стройиздат, 1981. 184 с.

*Информация об авторах*

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

**Шевченко Андрей Викторович**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: andsheff@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

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

**Бодяков Сергей Николаевич**, аспирант кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: kafeun@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Гвасалия Хатуна Давидовна**, магистрант кафедры промышленной экологии. E-mail: gvasalia-83@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

---

*Поступила в августе 2019 г.*

© Наумов А.Е., Шевченко А.В., Долженко А.В., Бодяков С.Н., Гвасалия Х.Д., 2019

***Naumov A.E., Shevchenko A.V., \*Dolzhenko A.V., Bodiakov S.N., Gvasalia K.D.***

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

*Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46*

*\*E-mail: dolzhenko.av@bstu.ru, da7182@mail.ru*

## **RESEARCH OF STRENGTH OF CONTACT OF THE PLASTIC PIPE AND CONCRETE WHEN CALCULATING PLASTIC PIPE CONCRETE STRUCTURES**

**Abstract.** *This article presents numerical studies of the stress-strain state of centrally compressed short plastic-tube-concrete (PTC) cylindrical cores, having experimentally obtained and analyzed the influence of the tangential friction forces at the boundary of the concrete core and plastic shell layers on the stress-strain state of the PTC core under the assumption of elastic work of the core materials and shell. The need for these studies is associated with a lack of theoretical and numerical studies of the influence of tangential friction forces on the stress-strain state of this type of structural elements, including the classical solution with a steel shell. In this regard, mathematical modeling and the creation of engineering methods for calculating the PTC based on the study of the actual joint work of the concrete core and the cylindrical plastic shell has significant scientific potential.*

*The performed calculations demonstrated the relevance with engineering accuracy of using the mathematical model of a short PTC rack for engineering calculations and structural analysis of the structure. It has been established that the use of an analytical model allows us to study the effect of variations in the physical and mechanical characteristics of the materials of the core and shell of the PTC on the parameters of the stress-strain state of the structure and to rationally design the PTC elements in the construction of civil and industrial buildings with reference to the widely used materials market.*

**Keywords:** *plastic-tube-concrete, tube concrete, triaxial compression, tangential forces, friction, strength calculations of building structures.*

### **REFERENCES**

1. Shahvorostov A.I. The study of the stress-strain state of concrete on stress cement. [Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya trubobetona na napryagayuschem cemente]. Moscow, 2000.
2. Krishan A.L., Sagadatov A.I. Pre-compressed tube-concrete elements [Trubobetonnye elementy s

predvaritel'no obzhatym yadrom]. Beton i zhelezobeton - puti razvitiya. Nauchnye trudy 2-oy Vserossiyskoy konferencii po betonu i zhelezobetonu. 5-9 sentyabrya, t.2 Moscow: NIIZhB, 2005.

3. Sakino K., Nakahara H., Morino S., Nishiyama I. Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns. Struct. Eng. ASCE 2004. Vol. 130(2). Pp. 180–188.

4. Schneider S.P. Axially loaded concrete-filled steel tubes. Struct. Eng. ASCE. 1998. Vol. 124. Pp. 1125–1138.
5. Huang C.S., Yeh Y.K., Liu G.Y., Hu H.T., Tsai K.C., Weng Y.T., Wang S.H., Wu M.H., Axial load behavior of stiffened concrete-filled steel columns. Struct. Eng. ASCE. 2002. Vol. 128(9). Pp. 1222–1230.
6. Uy B., High-strength steel-concrete composite columns for buildings. Struct. Build. 2003. Vol. 156. Pp. 3–14.
7. Dolzhenko A., Naumov A., Shevchenko A. Bearing capacity and rigidity of short plastic-concrete-tubal vertical columns under transverse load. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. 327 p.
8. Dolzhenko A.V., Naumov A.E., Shevchenko A.V., Stoykovich N. Numerical studies of the stress-strain state of a plastic-tube concrete centrally compressed short core [Chislennye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya plastikotrubobetonno central'no-szhatogo korotkogo sterzhnya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 10. Pp. 23–32. (rus)
9. Dolzhenko A.V., Naumov A.E. Shevchenko A.V., Stoykovich N. The influence of tangential friction forces on the stress-strain state of a plastic-tube concrete centrally compressed short core [Vliyaniye kasatel'nyh sil treniya na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie plastikotrubobetonno central'no-szhatogo korotkogo sterzhnya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 12. Pp. 42–51. (rus)
10. Rzhanicyn A.R. Compound rods and plates [Sostavnye sterzhni i plastinki]. Moscow: Stroyizdat, 1986. 316 p.
11. Kolchunov V.I., Panchenko L.I. Calculation of composite thin-walled structures. [Raschet sostavnyh tonkostennykh konstrukciy]. M: ASV, 1999. 281 p. (rus)
12. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. [Obschie modeli mehaniki zhelezobetona]. Moscow: Stroyizdat, 1996. 416 p. (rus)
13. Filin A.P. Shell theory elements. [Elementy teorii obolochek]. Leningrad: Stroyizdat, 1975. 256 p. (rus)
14. Holmyanskiy M.M. Reinforcement contact with concrete. [Kontakt armatury s betonom]. Moscow: Stroyizdat, 1981. 184 p. (rus)

#### Information about the authors

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

**Shevchenko, Andrey V.** PhD, Assistant professor. E-mail: andsheff@rambler.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

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

**Bodiakov, Sergey N.** Postgraduate student. E-mail: kafeun@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Gvasalia, Khatuna D.** Master student. E-mail: gvasalia-83@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received in August 2019*

#### Для цитирования:

Наумов А.Е., Шевченко А.В., Долженко А.В., Бодяков С.Н., Гвасалия Х.Д. Исследование прочности контакта пластиковой трубы и бетона при расчете пластикотрубобетонных конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 38–45. DOI: 10.34031/article\_5da44d75248a17.80826244

#### For citation:

Naumov A.E., Shevchenko A.V., Dolzhenko A.V., Bodiakov S.N., Gvasalia K.D. Research of strength of contact of the plastic pipe and concrete when calculating plastic pipe concrete structures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 8. Pp. 38–45. DOI: 10.34031/article\_5da44d75248a17.80826244

DOI: 10.34031/article\_5da44e83653801.83128737

<sup>1</sup>Коркина Е.В., <sup>2</sup>\*Войтович Е.В., <sup>2</sup>Плющенко Н.Ю., <sup>2</sup>Столяров М.Д.<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт строительной физики

Российской академии архитектуры и строительных наук

Россия, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26

\*E-mail: e.voitovich@mail.ru

## ТЕПЛОПОСТУПЛЕНИЯ НА ФАСАД ЗДАНИЯ В ЗАСТРОЙКЕ ПРИ УЧЕТЕ ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ

**Аннотация.** При рассмотрении температурного режима в городских условиях изучаются различные факторы, влияющие на повышение температуры воздуха. Однако, на температурный режим могут влиять и другие составляющие. Представляется интересным рассмотреть, нагрев поверхностей фасадов за счет солнечной радиации и дальнейший теплообмен излучением между нагретыми поверхностями. Для этого предложен метод, основанный на применении формулы А.М. Шкловера, определяющей нагрев поверхности от солнечной радиации, с дальнейшим вычислением по формуле Стефана-Больцмана количества дополнительной лучистой теплоты, поступающей на фасад здания от прилегающих объектов и определяющей дополнительный нагрев поверхности фасада. Применение метода проиллюстрировано примером расчета для зданий, последовательно расположенных в городах с различным климатом: г. Москва, г. Краснодар и г. Чита. Расчет нагрева поверхности фасада проводился для ясного дня за один час. Учитывалось влияние прилегающих объектов на поступление солнечной радиации к исследуемым поверхностям. Показано повышение температуры нагрева исследуемого фасада при учёте поступления лучистой теплоты от прилегающих объектов. Развитие предложенного метода может быть использовано при изучении температурного режима в городских условиях.

**Ключевые слова:** солнечная радиация, температурный режим, застройка, поглощение солнечной радиации, фасады зданий, лучистый теплообмен.

**Введение.** Общеизвестен тот факт, что в городских условиях температурный режим отличается от такового в сельских. Исследования температурного режима в городах проводятся в ряде работ при изучении температуры нагрева воздуха [1, 2], при этом рассматриваются различные закономерности и составляются математические модели [3]. Согласно [3] повышение температуры воздуха может происходить по нескольким причинам: вариации солнечной постоянной, трансформация свойств земной поверхности (например, альбедо), изменение состава атмосферы. Однако, на температурный режим в застройке, как в многокомпонентной среде [4], могут влиять и другие составляющие, определяемые процессами их взаимодействия. Представляется интересным рассмотреть нагрев поверхности фасадов зданий от солнечной радиации и следующие за этим теплофизические процессы, приводящие к повышению температуры поверхностей фасадов зданий, находящихся в застройке.

В строительной практике принято проводить расчёты теплопоступлений в здание от солнечной радиации через светопрозрачные заполнения светопроемов<sup>1</sup> [5, 6], в том числе с учётом различной ориентации фасадов зданий по сторонам света с целью экономии энергии на отопление [7] и кондиционирование [7, 8, 9]. При этом недостаточно рассмотрены факторы дополнительного нагрева самой поверхности фасада, не включающей остекление. Поверхность фасада, вследствие нагрева от солнечной радиации, вступает в теплообмен излучением с окружающими его объектами, величина которого зависит от температуры их поверхностей. Данный вид теплообмена обеспечивает дополнительный приток теплоты к фасадам зданий, что в совокупности с факторами, указанными К.Я. Кондратьевым [3], объясняет более высокую их температуру в городских условиях, по сравнению с сельскими [1]. Настоящая работа посвящена определению дополнительной теплоты, поступающей на фасад здания, находящегося в застройке, от теплообмена излучением с окружающими объектами. Развитие методов

<sup>1</sup> СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. Утв. приказом Минрегион России от 30.06.2012 №265. Введ. в действие с 01.07.2013. М.: ФАУ «ФЦС», 2012. 100 с.

расчёта, предлагаемых в настоящей работе, может быть направлено на изучение теплового режима в городских условиях.

**Методология.** Как известно, поступающее на поверхность суммарное (прямое плюс рассеянное) солнечное излучение  $I$ , которое является тепловым потоком (при отнесении к единичной площади – удельным тепловым потоком, Вт/м<sup>2</sup>), частично отражается от нее, частично поглощается ею, частично проходит через нее:

$$I = I_{\text{отр}} + I_{\text{погл}} + I_{\text{прош}} \quad (1)$$

При рассмотрении фасадов, не имеющих светопроемов, составляющая, проходящая через поверхность, равняется нулю  $I_{\text{прош}}=0$ , что позволяет определить коэффициент отражения фасада через коэффициент поглощения и наоборот.

Поглощенная составляющая солнечного излучения  $I_{\text{погл}}$  затем участвует в теплообмене излучением с окружающими объектами  $E_{\text{луч}}$ , расходуется на конвективный теплообмен  $E_{\text{конв}}$ , а также сохраняется в виде внутренней энергии поверхности  $E_{\text{внутр}}$ . При этом можно допустить, что составляющая, теряемая на теплопроводность в воздух, мала вследствие малого значения теплопроводности воздуха, заполняющего пространство между поверхностями фасадов. Тогда выражение баланса удельного теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>, для поверхности фасада, отдающего теплоту излучением, выглядит следующим образом:

$$I_{\text{погл}} = E_{\text{луч}} + E_{\text{конв}} + E_{\text{внутр}} \quad (2)$$

Но поверхность фасада может не только отдавать, но и получать теплоту излучением от окружающих объектов. В данной работе рассматривается нагрев поверхности фасада вследствие поглощения теплоты от солнечного излучения  $I_{\text{погл}}$  при наличии застройки, а также теплообмен излучением и определение величины  $E_{\text{луч}}$ , получаемой от соседних поверхностей, в результате которого происходит дополнительный нагрев поверхности фасада. В этом случае выражение баланса удельного теплового потока для поверхности фасада, принимающего теплоту излучением записывается как:

$$(I + E_{\text{луч}})_{\text{погл}} = E_{\text{конв}} + E_{\text{внутр}} \quad (3)$$

**Основная часть. Метод учёта влияния застройки при теплообмене излучением.** Для проведения дальнейших теоретических выкладок и расчетов следует указать принятые допущения:

- отсутствует многократное отражение и поглощение между фасадами зданий и подстилающей поверхностью;

- поверхности фасадов считаются серыми телами;

- вследствие большого сопротивления тепlopередаче стен фасадов [10] считается, что температура наружной поверхности не зависит от температуры внутреннего воздуха помещения;

- вычисления производятся для тонкого поверхностного слоя фасада за один час, поэтому считается, что тонкий слой принял постоянную температуру, соответствующую окончанию временного интервала;

- рассматриваемые поверхности фасадов не имеют светопроемов;

- ослабление э/м излучения в воздушном пространстве между зданиями и подстилающей поверхностью отсутствует, т.е. влияние атмосферы не рассматривается.

На первом этапе последовательно проводится расчёт температуры нагрева поверхностей фасадов зданий и подстилающей поверхности от солнечной радиации в соответствии с формулой А.М. Шкловера [11] за один час светового дня:

$$t_{\text{н}}^{\text{усл}} = t_{\text{н}} + \frac{I \cdot \rho}{\alpha_{\text{н}}} \quad (4)$$

где  $t_{\text{н}}$  – температура наружного воздуха, °С, определяемая по<sup>2</sup>;  $I$  – суммарная солнечная радиация, поступающая на вертикальную поверхность фасада за исследуемый промежуток времени, Вт/м<sup>2</sup>, при ясном небе, определяется согласно [5] с использованием данных справочника [12] о почасовых значениях солнечной радиации;  $\rho$  – коэффициент поглощения солнечной радиации поверхностью фасада, определяемый по разделу 6 СП 50.13330.2012;  $\alpha_{\text{н}}$  – коэффициент теплообмена у поверхности фасада, Вт/м<sup>2</sup>°С, вычисляемый согласно разделу 6 СП 50.13330.2012.

На втором этапе расчётов определяется поверхность  $p$  с наименьшей температурой  $t_{\text{н}}^{\text{усл}}$ , т.к. она будет принимать лучистый тепловой поток от прилегающих поверхностей [13]. При этом считается, что температура тонкого нагретого слоя поверхности  $p$  приняла постоянную температуру в конце рассматриваемого временного интервала. Затем по формуле Стефана-Больцмана с учётом углового коэффициента излучения [13] последовательно определяется дополнительный тепловой поток, Вт, получаемый лучистым теплообменом принимающей поверхностью  $p$  от каждой из прилегающих поверхностей  $i$ :

<sup>2</sup> СП 131.13330.2012 «Строительная климатология» Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\*. М.: Минрегион России, 2012. 116 с.

$$Q_i = \varepsilon_{i-p} C_0 \left[ \left( \frac{T_i}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_p}{100} \right)^4 \right] A_p \varphi_{i-2} \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{i-p}$  – приведенный коэффициент излучения поверхностей  $i$  и  $p$ , определяется согласно [13];  $C_0$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>;  $T_1$ ,  $T_2$  – температура первой и второй поверхностей, К, определяется из формулы (3);  $A$  – площадь исследуемой поверхности, м<sup>2</sup>;  $\varphi_{i-p}$  – угловой коэффициент излучения, т.е. доля лучистой энергии, которая покидает поверхность  $i$  и достигает поверхности  $p$ , определяется согласно [11, 13].

Общий приход лучистого удельного теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>, к поверхности  $p$  определяется как:

$$E_{\text{луч}} = \sum_{i=1}^n Q_i / A_p \quad (6)$$

На третьем этапе расчётов в соответствии с формулами (3) и (4) определяется температура

$t_{\text{доп}}$  поверхности  $p$  при учете дополнительного лучистого удельного теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>, от теплообмена излучением:  $(I + E_{\text{луч}})$ . Рассчитанная температура  $t_{\text{доп}}$  относится к концу рассматриваемого временного промежутка, равного одному часу и может быть использована при дальнейших расчетах за следующий временной промежуток.

**Пример расчёта.** В качестве методического примера рассматривается теплообмен излучением между двумя зданиями и подстилающей поверхностью, расположенными по схеме, представленной на рис. 1. Фасад здания №1 ориентирован на юг, фасад здания №2 ориентирован на восток. Расчетный час – с 10 до 11 часов утра. Расчетные месяцы: декабрь, март, июнь. Для сравнения результатов вычислений, последовательно рассматриваются три местоположения зданий с различным климатом: Москва, Краснодар и Чита.

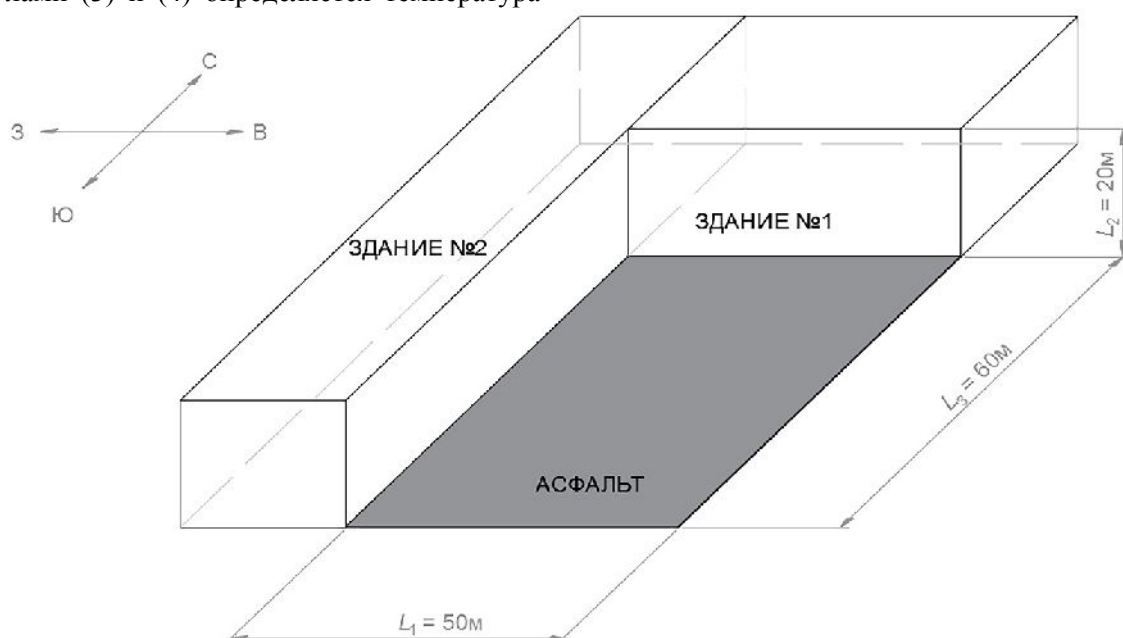


Рис. 1. Схема расположения зданий и подстилающей поверхности

*Первый этап – расчёт радиационной температуры нагрева поверхностей.*

Солнечная радиация  $I$  определяется согласно [5] при ясном небе с использованием значений прямой и рассеянной радиации за промежуток 10–11 ч по истинному солнечному времени по данным [12]. При расчёте солнечной радиации по [5] не участвует составляющая, отраженная от подстилающей поверхности, т.к. при ее учете было бы справедливо учесть и составляющую, отраженную от прилегающего здания, что представляется возможным в дальнейших работах авторов. Часы облучения прямой радиацией выбраны такие, что облучаются оба фасада и подстилающая поверхность, т.е. не происходит перекрытие прямой радиации прилегающим зданием.

Расчет рассеянной радиации проводится с учетом перекрытия части небосвода прилегающим зданием согласно методике, представленной в [14], по которой определен коэффициент перекрытия небосвода, равный для фасада №2: 0,07, для фасада №1: 0,09.

Температура наружного воздуха  $t_n$ , °С определена по<sup>2</sup>. Коэффициент теплообмена у поверхности фасада  $\alpha_n$ , Вт/м<sup>2</sup> °С, вычислен согласно разделу 6 нормативного документа СП 50.13330.2012. Коэффициенты поглощения поверхностей фасадов и подстилающей поверхности приняты по СП 50.13330.2012:  $\rho_1 = \rho_2 = 0,8$  (облицовочная плитка),  $\rho_3 = 0,9$  (асфальт).



Результаты расчётов температуры нагрева фасадов (поверхности №1 и №2) и подстилающей поверхности (№3) от солнечной радиации по

формуле (4) представлены в таблице 1 для рассматриваемых городов.

Таблица 1

**Температуры нагрева поверхностей №1, 2, 3 в гг. Москве, Краснодаре, Чите**

| Месяц        | $I_1, \text{Вт/м}^2$ | $I_2, \text{Вт/м}^2$ | $I_3, \text{Вт/м}^2$ | $t_{n1}^{\text{усл}}, ^\circ\text{C}$ | $t_{n2}^{\text{усл}}, ^\circ\text{C}$ | $t_{n3}^{\text{усл}}, ^\circ\text{C}$ |
|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| г. Москва    |                      |                      |                      |                                       |                                       |                                       |
| Декабрь      | 466                  | 91                   | 128                  | 7,8                                   | -3,0                                  | -1,5                                  |
| Март         | 628                  | 295                  | 497                  | 17,0                                  | 7,3                                   | 15,0                                  |
| Июнь         | 409                  | 354                  | 800                  | 31,1                                  | 29,2                                  | 48,2                                  |
| г. Краснодар |                      |                      |                      |                                       |                                       |                                       |
| Декабрь      | 713                  | 156                  | 292                  | 24,9                                  | 7,0                                   | 12,6                                  |
| Март         | 598                  | 281                  | 631                  | 22,8                                  | 13,6                                  | 26,0                                  |
| Июнь         | 277                  | 275                  | 867                  | 30,0                                  | 30,0                                  | 52,8                                  |
| г. Чита      |                      |                      |                      |                                       |                                       |                                       |
| Декабрь      | 588                  | 147                  | 178                  | 0,4                                   | -16,9                                 | -14,8                                 |
| Март         | 664                  | 349                  | 547                  | 12,1                                  | 1,8                                   | 10,5                                  |
| Июнь         | 382                  | 321                  | 844                  | 28,4                                  | 26,5                                  | 46,4                                  |

Второй этап – расчёт поступления лучистой теплоты к исследуемой поверхности.

Из данных таблицы 1 видно, что температура нагрева фасада №2 ниже, чем у прилегающих поверхностей для всех трех вариантов расположения зданий, значит поверхность фасада №2 является принимающей лучистую теплоту (поверхность  $p$ ).

Коэффициенты излучения приняты равными коэффициентам поглощения, что справедливо

для серых тел при стационарном тепловом режиме [13], т.е.  $\varepsilon_1=\rho_1=0,8$ ,  $\varepsilon_2=\rho_2=0,8$ ,  $\varepsilon_3=\rho_3=0,9$ . Угловые коэффициенты излучения поверхности №1 на поверхность №2 и поверхности №3 на поверхность №2 определены согласно [11] и равны  $\varphi_{1-2}=0,12$ ,  $\varphi_{3-2}=0,37$ .

Результаты расчётов по формулам (5) и (6) поступления лучистого удельного теплового потока к фасаду №2 от фасада №1 и подстилающей поверхности №3 представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Лучистый удельный тепловой поток от поверхностей №1 и №3 на поверхность №2,  $Q_{1-2}$  и  $Q_{3-2}$ , соответственно, и суммарный лучистый удельный тепловой поток  $E_{\text{луч}}$  в гг. Москве, Краснодаре и Чите**

| Месяц        | $Q_{1-2}, \text{Вт/м}^2$ | $Q_{3-2}, \text{Вт/м}^2$ | $E_{\text{луч}}, \text{Вт/м}^2$ |
|--------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| г. Москва    |                          |                          |                                 |
| Декабрь      | 3,9                      | 1,8                      | 5,8                             |
| Март         | 3,9                      | 10,7                     | 14,6                            |
| Июнь         | 0,9                      | 31,6                     | 32,5                            |
| г. Краснодар |                          |                          |                                 |
| Декабрь      | 7,5                      | 7,6                      | 15,1                            |
| Март         | 4,0                      | 18,9                     | 22,9                            |
| Июнь         | 0,03                     | 42,9                     | 42,9                            |
| г. Чита      |                          |                          |                                 |
| Декабрь      | 5,6                      | 2,1                      | 7,7                             |
| Март         | 3,9                      | 11,5                     | 15,4                            |
| Июнь         | -0,9                     | 32,7                     | 33,6                            |

Третий этап – расчёт дополнительной температуры нагрева исследуемой поверхности на конец временного интервала.

Данные расчетов температуры нагрева фасада №2,  $t_{\text{доп}}$ , по формуле (4) с использованием

суммарного притока теплоты ( $I+E_{\text{луч}}$ ) в соответствии с формулой (3) приведены в таблице 3 для трех рассматриваемых городов. Для сравнения приведена разница между температурой нагрева

с учётом дополнительного нагрева от теплообмена излучением и без учёта  $\Delta t = t_{\text{доп}} - t_{\text{н2}}^{\text{усл}}$ .

Таблица 3

**Температура  $t_{\text{доп}}$  восточного фасада при дополнительном лучистом удельном тепловом потоке ( $I + E_{\text{луч}}$ ) для фасада №2**

| Месяц   | г. Москва                        |                            | г. Краснодар                     |                            | г. Чита                          |                            |
|---------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|
|         | $t_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$ | $\Delta t, ^\circ\text{C}$ | $t_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$ | $\Delta t, ^\circ\text{C}$ | $t_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$ | $\Delta t, ^\circ\text{C}$ |
| Декабрь | -2,8                             | 0,2                        | 7,5                              | 0,5                        | -16,6                            | 0,3                        |
| Март    | 7,7                              | 0,4                        | 14,2                             | 0,7                        | 2,3                              | 0,5                        |
| Июнь    | 32,3                             | 1,1                        | 31,4                             | 1,4                        | 29,5                             | 1,1                        |

Из таблицы 3 видно, что дополнительный нагрев  $\Delta t$  фасада №2 составляет 0,2–0,5 °C в декабре, при этом наибольшее значение для южного города Краснодара.

В марте, когда наблюдается наибольший приход солнечной радиации на южный фасад, различия в температурах между южным и восточным фасадом значительны (см. табл.1), за счет чего наблюдается дополнительный нагрев фасада №2  $\Delta t$  на 0,4–0,7 °C, наибольшее значение – для г. Краснодара.

Для июня различия в наружных температурах поверхностей фасадов не так значительны в сравнении с различием температуры исследуемого фасада и подстилающей поверхности, что связано с большим приходом солнечной радиации на горизонтальные поверхности в летний период. Поэтому дополнительный нагрев фасада №2  $\Delta t$  составляет от 1,1–1,4 °C, опять же наибольший – для Краснодара.

Для всех рассмотренных случаев приток теплоты от подстилающей поверхности выше вследствие того, что она имеет больший коэффициент поглощения солнечной радиации и, соответственно, больший коэффициент излучения, а также больший угловой коэффициент излучения вследствие большей зоны контакта  $\varphi_{3-2} > \varphi_{1-2}$ .

**Выводы.** Рассмотрены этапы расчёта дополнительной температуры нагрева фасада здания, находящегося в застройке, от лучистого теплообмена. Расчёты проведены при расположении зданий в трёх городах, имеющих различный климат. Показано, что исследуемая поверхность фасада имеет дополнительный нагрев от лучистого теплообмена за исследуемый временной интервал, равный одному часу, наибольший для южного города.

Следует отметить, что исследуемый фасад №2 получает также дополнительную теплоту от отраженной от окружающих его объектов солнечной радиации, а именно от фасада №1  $E_{\text{фасад№1}}$  и подстилающей поверхности  $E_{\text{пов}}$ . Тогда суммарные дополнительные теплоступления к фасаду №2 записываются в виде:

$$E_{\text{фасад№2}} = E_{\text{луч}} + E_{\text{фасад№1}} + E_{\text{пов}} \quad (7)$$

В данной работе, как уже отмечалось, рассмотрено вычисление величины  $E_{\text{луч}}$ . Расчёты по определению других составляющих формулы (7) с определением дополнительной температуры нагрева планируется проводить в дальнейшем с расчётом коэффициентов поступления отраженной радиации.

При учете указанных составляющих формулы (7), а также при учёте нестационарного теплового режима возможно предположить больший дополнительный нагрев фасадов зданий, находящихся в застройке.

Данная работа может быть направлена на развитие методов расчёта температурного режима в застройке.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вязанкин А.С., Вязанкин С.А., Жадин Е.А., Кадыгров Е.Н. Анализ вертикального распределения температуры в пограничном слое атмосферы в пригороде и мегаполисе // Метеорология и гидрология. 2003. № 7. С. 5–12.
2. Григорова Е.С. О мезоклимате московского мегаполиса // Метеорология и гидрология. 2004. №10. С. 36–45.
3. Кондратьев К.Я. Глобальный климат. СПб.: Изд-во Наука: С.-Петербург. отд-ние, 1992. 356 с.
4. Черныш Н.Д., Тарасенко В.Н. Микроклимат селитебной территории как многокомпонентная среда архитектурно-строительного проектирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 6. С. 57–61.
5. Коркина Е.В., Горбаренко Е.В., Гагарин В.Г., Шмаров И.А. Основные соотношения для расчета облучения солнечной радиацией стен отдельно стоящих зданий // Жилищное строительство. 2017. №6. С. 27–33.
6. Гагарин В.Г., Коркина Е.В., Шмаров И.А. Теплоступления и теплотери через стекло-

пакеты с повышенными теплозащитными свойствами // Academia. Архитектура и строительство. 2017. №2. С. 106–110.

7. Lan Pan. Orientation effect on thermal and energy performance of vertical greenery systems// Energy and Buildings. 2018. Vol. 175. Pp. 102–112.

8. Prieto A., Knaack U., Auer T., Klein T. Passive cooling & climate responsive façade design: Exploring the limits of passive cooling strategies to improve the performance of commercial buildings in warm climates // Energy and Buildings. 2018. Vol. 175. Pp. 30–47.

9. Takebayashi H., Kasahara M., Tanabe Sh., Kouyama M. Analysis of Solar Radiation Shading Effects by Trees in the Open Space around Buildings // Sustainability. 2017. Vol. 9. Issue 8. doi:10.3390/su9081398.

10. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Требования к теплозащите и энергетической эффективности в проекте актуализированного СНиП «Тепловая защита зданий» // Жилищное строительство. 2011. №8. С. 2–6.

11. Шкловер А.М., Васильев Б.Ф., Ушков Ф.В. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий. М.: Гос. изд. литературы по строительству и архитектуре, 1956. 350 с.

12. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1–6, вып. 1–34. Санкт-Петербург: Гидрометеоздат. 1989–1998.

13. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). Учебник для вузов. 2-е изд., пераб. и доп. М.: Высш. Школа, 1982. 415 с.

14. Коркина Е.В., Шмаров И.А. Аналитический метод расчета рассеянной солнечной радиации, поступающей на вертикальную поверхность при частично перекрытом небосводе // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. №3(375). С. 230–236.

#### Информация об авторах

**Коркина Елена Владимировна**, кандидат технических наук, доцент. E-mail: elena.v.korkina@gmail.com. Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Россия, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21.

**Войтович Елена Валерьевна**, кандидат технических наук, доцент. E-mail: e.voitovich@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

**Плющенко Наталья Юрьевна**, старший преподаватель. E-mail: Natasha\_tgv@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

**Столяров Михаил Дмитриевич**, студент. E-mail: m\_100lyarov@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

Поступила в апреле 2019 г.

© Коркина Е.В., Войтович Е.В., Плющенко Н.Ю., Столяров М.Д., 2019

**<sup>1</sup>Korkina E.V., <sup>2</sup>\*Voytovich E.V., <sup>2</sup>Plyushchenko N.Yu., <sup>2</sup>Stolyarov M.D.**

<sup>1</sup>Research Institute of building physics of the Russian Academy of architecture and building sciences  
Russia, Moscow, Lokomotivny proezd, 21

<sup>2</sup>Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)  
Russia, Moscow, Yaroslavl'skoe shosse, 26

\*E-mail: e.voitovich@mail.ru

## HEAT ACCESS ON THE FACADE BUILDING IN THE DEVELOPMENT WHEN TAKING INTO ACCOUNT HEAT EXCHANGE BY RADIATION

**Absrtact.** When considering the temperature regime in urban conditions, various factors affecting the increase in air temperature are studied. However, other components can influence the temperature regime. It is interesting to consider the heating of the surfaces of the facades due to solar radiation and further heat exchange by radiation between the heated surfaces. For this, a method based on the use of the formula of A.M. Shklover, which determines the heating of the surface from solar radiation, with further calculation using the Stefan-Boltzmann formula of the amount of additional radiant heat supplied to the facade of the building from adjacent objects and determining the additional heating of the surface of the facade. The application of the

method is illustrated by an example of calculation for buildings that are sequentially located in cities with different climates: Moscow, Krasnodar and Chita. The calculation of the heating surface of the facade was carried out for a clear day in one hour. The influence of adjacent objects on the influx of solar radiation to the studied surfaces was taken into account. An increase in the heating temperature of the investigated facade is shown when taking into account the radiant heat input from the adjacent objects. The development of the proposed method can be used to study the temperature regime in urban environments.

**Keywords:** solar radiation, temperature, building, absorption of solar radiation, building facades, radiant heat exchange.

## REFERENCES

1. Vyazankin A.S., Vyazankin S.A., Zhadin E.A., Kadygrov E.N. Analysis of the vertical temperature distribution in the atmospheric boundary layer in the suburbs and megalopolises [Analiz vertikal'nogo raspredeleniya temperatury v pogranichnom sloe atmosfery v prigorode i megapolise]. Meteorology and Hydrology. 2003. No. 7. Pp. 5–12. (rus)
2. Grigorov E.S. On the mesoclimate of the Moscow metropolis [O mezoklimat moskovskogo megapolisa]. Meteorology and Hydrology. 2004. No. 10. Pp. 36–45. (rus)
3. Kondratyev K.Ya. Global climate [Global'nyj klimat]. SPb.: Science: St. Petersburg. Separation. 1992. 356 p. (rus)
4. Chernysh N. D., Tarasenko V.N. Microclimate of a residential area as a multi-component environment of architectural and construction design [Mikroklimat selitebnoj territorii kak mnogokomponentnaya sreda arhitekturno-stroitel'nogo proektirovaniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. No. 6. Pp. 57–61.
5. Korkina E.V., Gorbarenko E.V., Gagarin V.G., Shmarov I.A. Basic ratios for calculation of irradiation of solar radiation of walls of detached buildings [Osnovnye sootnosheniya dlya rascheta obluche-niya solnechnoj radiacii sten otdel'no stoyashchih zdaniy]. Zhilishchnoe stroitel'stvo [Housing construction]. 2017. No. 6. Pp. 27–33. (rus)
6. Gagarin V.G., Korkina E.V., Shmarov I.A. Heat gains and heat losses through the double-glazed windows with high heat-shielding properties. Academia [Teplopostupleniya i teplopoteri cherez steklopakety s povyshennymi teplozashchitnymi svojstvami]. Architecture and construction. 2017. No. 2. Pp. 106–110. (rus)
7. Lan Pan. Orientation effect on greenery systems. Energy and Buildings. 2018. Vol. 175. Pp. 102–112.
8. Prieto A., Knaack U, Auer T, Klein T. Clients. Energy and Buildings. 2018. Vol. 175. Pp. 30–47.
9. Takebayashi H., Kasahara M., Tanabe Sh. Analysis of Solar Radiation Shading Effects in the Open Space around Buildings. Sustainability. 2017. Vol. 9. Issue 8. doi: 10.3390 / su9081398.
10. Gagarin V.G., Kozlov V.V. Requirements for thermal protection and energy efficiency in the draft updated SNiP «Thermal protection of buildings» [Trebovaniya k teplozashchite i energeticheskoy effektivnosti v proekte aktualizirovannogo SNiP «Teplovaya zashchita zdaniy»]. Housing construction. 2011. No. 8. Pp. 2–6. (rus)
11. Shklover A.M., Vasiliev B.F., Ushkov F.V. Basics of building heat engineering of residential and public buildings [Osnovy stroitel'noj teploekhniki zhilyh i obshchestvennyh zdaniy]. M: State. ed. literature on construction and architecture. 1956. 350 p. (rus)
12. Applied reference book on climate of the USSR. Series 3. Long-term data. Parts 1-6. Vol. 1-34 [Nauchno-prikladnoj spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye. CHasti 1–6, vyp. 1-34.]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat. 1989–1998. (rus)
13. Bogoslovsky V.N. Building Thermal Physics (thermal physics of heating, ventilation and air conditioning) [Stroitel'naya teplofizika (teplofizicheskie osnovy otopleniya, ventilyacii i kondicionirovaniya vozduha)]. Textbook for universities. 2 nd ed., Perab. and add. M.: Higher. School. 1982. 415 p. (rus)
14. Korkina E.V., Shmarov I.A. Analytical method of calculation of the diffuse solar radiation received on a vertical surface with partially obstructed sky News of higher educational institutions [Analiticheskij metod rascheta rasseyannoj solnechnoj radiacii, postupayushchej na vertikal'nuyu poverhnost' pri chastichno perekrytom nebosvode]. Technology of the textile industry. 2018. No. 3(375). Pp. 230–236. (rus)

## Information about the authors

**Korkina, Elena V.** PhD, Senior Researcher. E-mail: elena.v.korkina@gmail.com. Russian Academy of architecture and building sciences. Russia, 127238, Moscow, Lokomotivny proezd, 21.

**Voitovich, Elena V.** PhD, Associate Professor. E-mail: e.voitovich@mail.ru. Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

**Plyushchenko, Natalia Y.** Senior lecturer. E-mail: Natasha\_tgv@mail.ru. Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

**Stolyarov, Mikhail D.** Student. E-mail: m\_100lyarov@mail.ru. Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

---

*Received in April 2019*

**Для цитирования:**

Коркина Е.В., Войтович Е.В., Плющенко Н.Ю., Столяров М.Д. Теплопоступления на фасад здания в застройке при учете теплообмена излучением // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 46–53. DOI: 10.34031/article\_5da44e83653801.83128737

**For citation:**

Korkina E.V., Voytovich E.V., Plyushchenko N.Yu., Stolyarov M.D. Heat access on the facade building in the development when taking into account heat exchange by radiation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 9. Pp. 46–53. DOI: 10.34031/article\_5da44e83653801.83128737

DOI: 10.34031/article\_5da452a45dbf30.07663447

**\*Буланин В.А.**

ООО «Инновационные технологии – Энергетика»

Россия, 308007, г. Белгород, ул. Мичурина, 56

E-mail: v\_bulanin@mail.ru

## АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИСТОЧНИКА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

**Аннотация.** Основным энергозатратным элементом системы централизованного теплоснабжения городов и поселений является источник тепловой энергии – тепловая электростанция и котельная. В связи с необходимостью минимизации затрат топлива и электроэнергии на теплоснабжение в статье приведен анализ энергетического баланса паротурбинной установки, на основании которого разработаны новые аналитические выражения, всесторонне характеризующие экономичность работы энергоустановки. В 2000 году введен в действие РД 153-34.1-09.163-00 «Типовая программа проведения энергетических обследований тепловых электрических станций и районных котельных акционерных обществ энергетики и электрификации России». Рассмотрены некоторые аспекты анализа энергетического баланса паротурбинной установки с использованием относительного прироста расхода теплоты на конденсационную выработку энергии. Произведена аналитическая оценка влияния затрат энергии на собственные нужды котлоагрегата на энергетический баланс тепловой электростанции – источника теплоснабжения.

**Ключевые слова:** теплоснабжение, теплофикация, тепловая электростанция, топливно-энергетический комплекс, энергетический баланс, комбинированное производство, когенерация.

**Введение.** Когенерация (комбинированная выработка тепловой и электрической энергии) является одним из энергоэффективных методов работы источников централизованного теплоснабжения, в связи с чем этой теме посвящено множество публикаций, например [1, 2, 3].

В разработанной Минэнерго СССР в 1988 году научно-технической концепции развития теплоснабжения и теплофикации на период до 2005 года в качестве основных способов покрытия тепловых нагрузок городов и промышленных районов были приняты теплофикация (комбинированная выработка тепловой и электрической энергии) и централизованное теплоснабжение [4].

Указанная концепция получила подтверждение в Федеральном законе РФ от 27.07.2010 № 190-ФЗ "О теплоснабжении", согласно которому (статья 3) к общим принципам организации отношений в сфере теплоснабжения, в частности, отнесены: обеспечение энергетической эффективности теплоснабжения и потребления тепловой энергии; обеспечение приоритетного использования комбинированной выработки электрической и тепловой энергии для организации теплоснабжения; развитие систем централизованного теплоснабжения.

Согласно "Доктрине энергетической безопасности Российской Федерации", утвержденной Указом Президента РФ от 13.05.2019 № 216:

"5. <...> Топливно-энергетический комплекс Российской Федерации включает в себя <...> электроэнергетику и теплоснабжение, играет

ключевую роль в формировании доходов бюджетной системы Российской Федерации" <...>.

27. Задачами по совершенствованию территориально-производственной структуры топливно-энергетического комплекса <...> являются: г) обеспечение экономически эффективного сочетания использования систем централизованного электро- и теплоснабжения с развитием распределенной генерации электрической энергии <...>".

В решении поставленных задач одной из них является оценка энергоэффективности источников тепловой энергии для теплоснабжения [5], проявляемая себя в экономии топлива, в первую очередь, за счет организации комбинированного производства тепловой и электрической энергии на тепловых конденсационных (КЭС), теплофикационных (ТЭЦ) электростанциях и районных котельных (РК). При этом на тепловых электростанциях в качестве основного оборудования используются паротурбинные, газотурбинные, дизельные и газопоршневые установки.

Задачей этой статьи является разработка метода анализа энергетического потенциала источников тепловой энергии для теплоснабжения городов и поселений.

**Методика.** При проведении исследования использовался метод анализа энергетического баланса тепловой электростанции [6].

**Основная часть статьи** состоит из разделов, специфических для анализа энергоэффективности источника теплоснабжения.

На практике с 2000 года для оценки эффективности использования топлива и энергии при



проведении первичного, периодического (повторного), внеочередного обследования, локальных экспресс-обследований на тепловых электростанциях и районных котельных применя-

ются показатели удельных потерь энергоэффективности при отпуске электроэнергии ( $\Delta b_{\text{эз}}^{\text{пот}}$  г/(кВт·ч)) и тепла ( $\Delta b_{\text{тз}}^{\text{пот}}$  кг/Гкал) в соответствии с РД 153-34.1-09.163-00 [7]:

$$\begin{aligned} \text{для ТЭС} - \Delta b_{\text{эз}}^{\text{пот}} &= \frac{\left[ \Delta B_{\text{эксп+рем}}^{\text{эз}} + \left( \Delta B_{\text{втф}} + \Delta B_{\text{опт}} + \Delta B_{\text{тепл.сх}} + \Delta B_{\text{рек}} + \Delta B_{\text{учет}} \right) K_{\text{э}} \right] 10^3}{\mathcal{Q}_{\text{отп}}}; \\ \Delta b_{\text{тз}}^{\text{пот}} &= \frac{\left[ \Delta B_{\text{эксп+рем}}^{\text{тз}} + \left( \Delta B_{\text{втф}} + \Delta B_{\text{опт}} + \Delta B_{\text{тепл.сх}} + \Delta B_{\text{рек}} + \Delta B_{\text{учет}} \right) (1 - K_{\text{э}}) \right] 10^3}{Q_{\text{отп}}}; \\ \text{для РК} - \Delta b_{\text{тз}}^{\text{пот}} &= \frac{\left( \Delta B_{\text{эксп+рем}}^{\text{тз}} + \Delta B_{\text{рек}} + \Delta B_{\text{учет}} \right) 10^3}{Q_{\text{отп}}}; \end{aligned}$$

где  $\Delta B_{\text{эксп+рем}}^{\text{тз}}$ ,  $\Delta B_{\text{опт}}$ ,  $\Delta B_{\text{тепл.сх}}$ ,  $\Delta B_{\text{рек}}$ ,  $\Delta B_{\text{учет}}$  – величины возможного снижения расхода условного топлива в годовом разрезе, т;  $\mathcal{Q}_{\text{отп}}$ ,  $Q_{\text{отп}}$  – отпуск электроэнергии и отпуск тепла, тыс. кВт·ч и Гкал;  $K_{\text{э}}$  – коэффициент отнесения затрат топлива энергетическими котлами на производство электроэнергии.

Величины  $\Delta b_{\text{эз}}^{\text{пот}}$ ,  $\Delta b_{\text{тз}}^{\text{пот}}$  характеризуют выявленный при обследовании топливный эквивалент потенциала энергосбережения  $\Delta B_{\text{эн.сб}}^{\text{пот}}$  в пересчете на условное топливо, т:

$$\text{для ТЭС} - \Delta B_{\text{эн.сб}}^{\text{пот}} = \left( \Delta b_{\text{эз}}^{\text{пот}} \mathcal{Q}_{\text{отп}} + \Delta b_{\text{тз}}^{\text{пот}} Q_{\text{отп}} \right) 10^{-3};$$

$$\text{для РК} - \Delta B_{\text{эн.сб}}^{\text{пот}} = \Delta b_{\text{тз}}^{\text{пот}} Q_{\text{отп}} 10^{-3};$$

В данной статье приводится ряд дополнений, не учтенных в упомянутом РД [7].

**Анализ энергетического баланса паротурбинной установки.** Вычислительная техника (ЭВМ, компьютер), несомненно, заменяет малопродуктивные вычисления, производимые вручную, однако они становятся эффективными только при условии многократного увеличения числа выполняемых расчетов при незначительном увеличении исходной информации. В связи с этим целесообразна разработка новых аналитических выражений, всесторонне характеризующих экономичность работы энергоустановки.

С целью решения поставленной задачи рассмотрим некоторые аспекты анализа энергетического баланса паротурбинной установки с использованием относительного прироста расхода теплоты на конденсационную выработку энергии  $\Delta q$  [6].

Соотношение между полезно выработанной энергией (при отсутствии отпуска теплоты) и энергией, поступившей в конденсатор, то есть потерянной в окружающую среду, можно представить как отношение  $1/(\Delta q - 1)$ . Тогда на каж-

дый килограмм пара, поступивший в конденсатор, приходится полезная суммарная выработка энергии

$$\mathfrak{z} = \frac{N}{D_{\kappa}} = \frac{i_o - \bar{i}_{\kappa}}{\Delta q - 1}, \quad (1)$$

в том числе выработка потоком пара, поступившим в конденсатор,

$$\mathfrak{z}_{\kappa} = i_o - i_{\kappa} + \Delta i_{\text{тн}} \quad (2)$$

и дополнительная выработка потоком пара, поступившим в схему регенерации для подогрева 1 кг конденсата,

$$\mathfrak{z}_{\text{р}} = \mathfrak{z} - \mathfrak{z}_{\kappa} = \frac{i_o - \bar{i}_{\kappa}}{\Delta q - 1} - (i_o - i_{\kappa} + \Delta i_{\text{тн}}). \quad (3)$$

Здесь  $N$  – мощность генератора, кВт;  $D_{\kappa}$  – расход пара в конденсатор, кг/с;  $i_o$ ,  $i_{\kappa}$  – энтальпия пара соответственно перед турбиной и перед конденсатором, кДж/кг;  $\bar{i}_{\kappa}$  – энтальпия конденсата в конденсаторе, кДж/кг;  $\Delta q$  – относительный прирост расхода теплоты на турбину в относительных единицах;  $\Delta i_{\text{тн}}$  – приращение энтальпии пара в промперегревателе, кДж/кг. Если промперегрев пара отсутствует, то здесь и далее  $\Delta i_{\text{тн}} = 0$ .

Относительная выработка на базе регенеративного подогрева питательной воды на основании выражений (2) и (3) составит:

$$\mathfrak{z}_{\text{р}}^{\text{отн}} = \frac{\mathfrak{z}_{\text{р}}}{\mathfrak{z}_o} = \frac{i_o - \bar{i}_{\kappa}}{(\Delta q - 1)(i_o - i_{\kappa} + \Delta i_{\text{тн}})}. \quad (4)$$

Подставив выражение (1) в (4), получим:

$$\mathfrak{z}_{\text{р}}^{\text{отн}} = \frac{N}{D_{\kappa} (i_o - i_{\kappa} + \Delta i_{\text{тн}})} - 1.$$

Из уравнения (1) можем также найти следующие соотношения, которыми можно пользоваться для проверки достоверности результатов балансовых испытаний паротурбинных установок и соответствующих расчетов:

$$\Delta q = \frac{i_o - \bar{t}_k}{\varepsilon} + 1; \quad i_o - \bar{t}_k = \varepsilon(\Delta q - 1);$$

$$i_o = \varepsilon(\Delta q - 1) + \bar{t}_k, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  – отношение выработки энергии к расходу пара в конденсатор (для теплофикационной турбины – приращение выработки энергии при увеличении расхода пара в конденсатор и постоянном отборе теплоты), кДж/кг.

При отпуске теплоты из отбора турбины паром с энтальпией  $i_{омб}$  на тепловом потреблении вырабатывается на каждый килограмм отпускаемого пара энергия  $\mathcal{E}_T = \mathcal{E}_\Pi + \mathcal{E}_p$ , представляющая сумму выработки основным потоком пара, направленным потребителю, и дополнительным потоком пара, поступившим в схему регенерации для подогрева возвращаемого от потребителя 1 кг конденсата согласно выражению (3).

$$\mathcal{E}_o = i_o - i_{омб} + \Delta i''_{\Pi\Pi} \quad (6)$$

Суммируя выражения (3) и (6), получаем:

$$\mathcal{E}_T = \frac{i_o - \bar{t}_k}{\Delta q - 1} - (i_{омб} - i_k + \Delta i'_{\Pi\Pi}), \quad (7)$$

а с учетом выражения (1):

$$\Delta q_1 = \frac{i_o - \bar{t}_{нс}}{i_o - \bar{t}_{нс} - \alpha_k(i_{к1} - \bar{t}_k)} = \frac{3480 - 965}{3480 - 965 - 0,7(2260 - 105)} = 2,50;$$

$$\Delta q_2 = \frac{i_o - \bar{t}_{нс}}{i_o - \bar{t}_{нс} - \alpha_k(i_{к2} - \bar{t}_k)} = \frac{3480 - 965}{3480 - 965 - 0,7(2470 - 105)} = 2,94.$$

Подставляя в формулу (7) значение  $\Delta q$  и других параметров, получим:

$$\mathcal{E}_{T1} = \frac{2260 - 105}{2,50 - 1} - (2600 - 2260) = 1095 \text{ кДж/кг};$$

$$\mathcal{E}_{T2} = \frac{2470 - 105}{2,94 - 1} - (2600 - 2470) = 1090 \text{ кДж/кг}.$$

Значения  $\mathcal{E}_{T1}$  и  $\mathcal{E}_{T2}$  практически совпали.

Из выражений (3) и (6) можем найти и относительную комбинированную выработку электроэнергии на базе регенеративного подогрева воды (на внутреннем теплоснабжении):

$$\mathcal{E}_p^{отн} = \frac{\mathcal{E}_p}{\mathcal{E}_o} = \frac{\frac{i_k - \bar{t}_k}{\Delta q - 1} - (i_o' - i_k + \Delta i_{nn})}{i_o - i_{омб} + \Delta i''_{nn}}.$$

$$\mathcal{E}_T = \frac{N}{D_k} - (i_{омб} - i_k + \Delta i'_{\Pi\Pi}).$$

Приращение энтальпии пара  $\Delta i'_{\Pi\Pi}$  и  $\Delta i''_{\Pi\Pi}$  учитывается в формулах только в тех случаях, когда отпуск теплоты производится из отбора соответственно до и после промперегрева.

При переходе от конденсационного к теплофикационному режиму работы турбоустановки существенное изменение претерпевает энтальпия поступающего в конденсатор пара, которое, казалось бы, должно заметно повлиять на значение  $\mathcal{E}_T$ , полученное по формуле (7). Фактически же оно остается практически неизменным, так как одновременно с изменением энтальпии  $i_k$  происходит изменение и относительного прироста расхода теплоты  $\Delta q$ , компенсирующие друг друга. Покажем это на примере.

**Даны:** энтальпия, в кДж/кг:  $i_o = 3480$ ,  $\bar{t}_{нс} = 965$ ,  $i_{омб} = 2600$ ,  $\bar{t}_k = 105$ ,  $\Delta i'_{\Pi\Pi} = 0$  и доля поступившего в конденсатор пара  $\alpha_k = 0,7$ . Известны также энтальпии пара на входе в конденсатор в конденсационном режиме ( $i_{к1} = 2260$  кДж/кг) и в теплофикационном режиме ( $i_{к2} = 2470$  кДж/кг).

**Сначала найдем** относительный прирост расхода теплоты на конденсационную выработку для первого и второго случаев:

$$\text{Здесь возможна подстановка } \frac{i_k - \bar{t}_k}{\Delta q - 1} = \frac{N}{D_k} -$$

отношение выработки энергии к потерям теплоты в конденсатор, кДж/кг.

Наличие отпуска теплоты от отдельных энергоблоков затрудняет оценку их экономичности в сопоставлении с другими энергоблоками. Сопоставление целесообразно производить при расчетном (конденсационном) режиме работы энергоблоков, когда отпуск теплоты потребителям отсутствует, поэтому возникает необходимость **приведения удельных показателей работы энергоустановок к расчетному режиму.**

Для решения поставленной задачи достаточно определить дополнительную электрическую мощность, которую энергоустановка могла бы иметь при данном расходе топлива, но при закрытом отборе пара на сторону [7]:

$$\Delta N = \frac{D_{отб}}{3600} \left[ (i_{отб} - i_k) + \Delta i_{пп} \frac{\Delta q - 1}{\Delta q} \right],$$

где  $\Delta N$  – изменение мощности при отборе пара при постоянном расходе теплоты на турбину, МВт;  $D_{отб}$  – отбор пара на сторону, т/ч;  $i_{отб}$  и  $i_k$  – энтальпия пара в рассматриваемом отборе и в конденсаторе турбины, кДж/кг;  $\Delta i_{пп}$  – приращение энтальпии пара при промежуточном его перегреве, кДж/кг;  $\Delta q$  – относительный прирост расхода теплоты на конденсационную выработку электроэнергии, без отпуска теплоты потребителям.

Слагаемое  $\Delta i_{пп} (\Delta q - 1) / \Delta q$  учитывается только в случае, когда пар на сторону отбирается до промперегрева, в том числе из котла, в остальных случаях оно отбрасывается.

Если расход пара  $D_{отб}$  заменить на расход пара, подаваемого в турбоагрегат от постороннего источника в точку соответствующего отбора,  $D_{отт}$ , тогда величина  $\Delta N$  примет отрицательное значение и в расчетах ее нужно использовать со знаком "минус".

Формулы расчета показателей работы энергоблока после приведения к конденсационному режиму примут следующий вид:

– удельный расход условного топлива на отпущенную электроэнергию, в г/кВт·ч:

$$b_{э(кр)}^{отп} = \frac{B}{N - N_{эбл}^{сн} + \sum \Delta N};$$

– удельный расход теплоты на турбоагрегат, в кДж/кВт·ч:

$$q_{т(кр)} = \frac{Q_t \cdot 10^3}{N - N_t^{сн} + \sum \Delta N};$$

– электрическая нагрузка энергоблока, в МВт:

$$N_{кр} = N + \Delta N,$$

где  $B$  – расход условного топлива на энергоблок, кг/ч;  $N$  – фактическая электрическая нагрузка блока, МВт;  $N_{эбл}^{сн}$  – мощность, потребляемая на собственные нужды энергоблока, МВт;  $N_t^{сн}$  – мощность, потребляемая на собственные нужды турбоагрегата, МВт;  $Q_t$  – расход теплоты на турбоагрегат, ГДж/ч.

Эту же задачу можно решить значительно проще, воспользовавшись формулами на основе

коэффициента относительной эффективности использования теплоты отборов турбины  $K_{о.эф}$  (см. главу вторую):

$$\Delta B = \frac{34,1}{\eta_t} \Delta Q_t \quad \text{и} \quad \Delta Q_t = (1 - K_{о.эф}) Q_{отб},$$

где  $\Delta B$  и  $\Delta Q_t$  – соответственно приращение расхода условного топлива на энергоблок, кг/ч, и расхода теплоты на турбоагрегат, ГДж/ч, при отпуске теплоты на сторону, ГДж/ч.

В этом случае удельный расход условного топлива на отпущенную электроэнергию вычислим по формуле:

$$b_{э(кр)}^{отп} = \frac{B - \sum \Delta B}{N - N_{эбл}^{сн}},$$

а удельный расход теплоты на турбоагрегат по формуле:

$$q_t = \frac{(Q_t - \sum \Delta Q_t) \cdot 10^3}{N - N_t^{сн}}.$$

*Предложенные формулы позволяют приводить показатели работы энергоблоков и турбоагрегатов к конденсационному режиму с целью анализа их работы, сопоставления этих показателей с нормативными их значениями и однотипных энергоблоков между собой в одинаковых условиях.*

**Оценка влияния затрат энергии на собственные нужды на энергетический баланс ТЭС.** Для обеспечения нормальной работы тепловой электростанции она имеет совокупность вспомогательных устройств, называемых механизмами собственных нужд, для привода которых потребляется часть произведенной на ТЭС энергии. Потребленная энергия затрачивается на сжатие и транспорт рабочих тел в цикле ТЭС и в основном возвращается в цикл в виде приращения энтальпии энергоносителей (соответствующих рабочих тел). Эту энергию следует учитывать в энергобалансе соответствующего агрегата как возвращенную энергию, аналогично учету теплоты, возвращенной в котлоагрегат с питательной водой:

$$Q_{воз} = 3,6 \mathcal{E}_{сн},$$

где  $Q_{воз}$  – возвращенная механизмами собственных нужд теплота, ГДж; 3,6 – физический эквивалент, ГДж/(МВт·ч);  $\mathcal{E}_{сн}$  – энергия, потребляемая механизмами собственных нужд, МВт·ч.

Однако выработка энергоблоком потребляемой механизмами собственных нужд энергии, также, как и отпущенной энергии, сопровожда-

ется согласно второму закону термодинамики соответствующими потерями энергии в цикле (преимущественно через конденсатор турбины в окружающую среду). На собственные нужды тепловой электростанции расходуется до 6 % вырабатываемой энергии, в связи с чем в окружающую среду теряется до 4 % располагаемой теплоты сгорания используемого топлива. Столь значительный непроизводительный расход топлива должен строго учитываться и анализироваться с целью разработки мероприятий по его снижению.

Одной из задач при составлении энергетического баланса ТЭС является достоверный учет и обоснованное распределение затрат энергии на собственные нужды между отдельными ее энергоустановками. Сокращение расхода энергии на привод механизмов собственных нужд является важной задачей повышения к.п.д. ТЭС и дополнительного отпуска электроэнергии народному хозяйству с шин электростанций без увеличения ее установленной мощности.

При учете и анализе расхода энергии на собственные нужды необходимо учитывать *два следующие аспекта* этого вопроса:

- при составлении энергетического баланса и вычислении показателей работы **брутто** каждого из агрегатов вносимая в них механизмами собственных нужд энергия *должна учитываться в полном соответствии с первым законом термодинамики* (законом сохранения энергии);

- при вычислении показателей **нетто** в них *должны учитываться потери, сопровождающие выработку энергии для механизмов собственных нужд*, а распределение этих потерь между агрегатами следует производить в соответствии с тем, каким технологическим процессом они вызваны.

Определенные затруднения в методическом плане вызывает учет в структуре энергобаланса ТЭС энергии, потребляемой дымососом. Считают [8], что нагрев уходящих газов в дымососе происходит за пределами котлоагрегата, поэтому его не учитывают как возвращенную теплоту. Однако это не так. Теплотой сгорания топлива считают количество теплоты, образующейся при сжигании топлива при постоянном давлении, поэтому и показатели работы котлоагрегата должны учитываться при постоянном, как правило, атмосферном давлении. Если считать, что котлоагрегат кончается перед дымососом, то это условие не будет соблюдено.

Дымосос, преодолевая гидравлическое сопротивление на участке "топочная камера котла – конвективная шахта – воздухоподогрева-

тель", расходует энергию на приведение уходящих газов к первоначальному давлению, при котором находится холодный воздух, используемый для сжигания топлива. В котлоагрегатах с наддувом работу дымососа выполняет дутьевой вентилятор. Все это говорит за то, чтобы энергия, потребляемая дымососом, учитывалась как возвращенная в котлоагрегат наравне с энергией, потребляемой дутьевым вентилятором.

Однако более сложным оказался вопрос учета затрат энергии на привод питательного насоса. Согласно [9] "Распределение отдельных расходов теплоты и электроэнергии между агрегатами и ступенями производства должно быть вполне определенным, выполненным в соответствии с тем, каким технологическим процессом вызван расход. Принадлежность расходов энергии на собственные нужды очевидна, за исключением расходов энергии на питательные насосы. Они условно отнесены к котельной...". Принятая условность относительно затрат энергии на питательные насосы придает условный характер и показателям экономичности котло- и турбоагрегатов, а также распределению использованного топлива между произведенными теплотой и электроэнергией. Проанализируем этот вопрос.

Изоэнтропная работа питательного насоса при данной температуре воды на входе пропорциональна повышению давления в нем [10]. В идеальном случае, когда гидравлическое сопротивление пароводяного тракта котла равно нулю, достаточно, чтобы питательный насос развивал на напоре давление, равное давлению пара перед турбиной. При этом потери энергоустановки, связанные с выработкой энергии для привода питательного насоса, должны относиться на турбоагрегат и отражаться только в показателях его работы.

Реальный пароводяной тракт котла имеет сопротивление, для преодоления которого насос должен развивать дополнительный напор. Необходимая при этом дополнительная энергия на привод насоса, вырабатываемая энергоблоком, сопровождается дополнительными термодинамическими потерями цикла, которые должны относиться на котлоагрегат и отражаться на его к.п.д., так как они полностью зависят только от конструктивных характеристик пароводяного тракта котлоагрегата.

Как правило, развиваемое питательным насосом давление больше, чем требуется иметь перед котлоагрегатом. Это – результат несовершенства применяемых способов регулирования давления воды на выходе из насоса, то есть несовершенства самого насоса, который в принципе должен выполнять эту функцию. Поскольку потери энергии, связанные с работой питательного

насоса, должны распределяться между котло- и турбоагрегатом, то и дополнительно возникающие из-за его несовершенства потери следует распределять пропорционально долям относимых на них основных потерь, либо учитывать их в коэффициенте теплового потока нетто [11].

Доли потерь энергоустановки, связанные с работой питательного насоса, относимые на турбо- и котлоагрегат, обозначим соответственно  $\alpha_{\text{тур}}^T$  и  $\alpha_{\text{тур}}^K$ . Их значения зависят как от режима работы энергоустановки (скользящее или номинальное давление), так и от сопротивления пароводяного тракта. Если значения этих долей не известны, то они могут быть с достаточной для практических расчетов точностью приняты следующими:  $\alpha_{\text{тур}}^T = 0,8$  и  $\alpha_{\text{тур}}^K = 0,2$ .

Немаловажное значение имеет и правильная оценка потерь энергии, связанных с транспортом рабочих тел. Обычно эти потери учитывают коэффициентом теплового потока. Согласно [12] "... величина потерь теплового потока на электростанции складывается из потерь теплоты с излучением от поверхностей оборудования и паро- и водопроводов, а также с парениями и пропусками арматуры и эксплуатационными сбросами пара и воды". Очевидно, такая формулировка – нечеткая и ее следовало бы заменить следующей: потери теплового потока есть потери теплоты от трубопроводов, соединяющих котло- и турбоагрегаты и не входящих в комплект их поставки заводами-изготовителями, то есть не учтенными к.п.д. этих агрегатов. А потери теплоты котло- и турбоагрегатами учитываются коэффициентами полезного действия этих энергоустановок.

**Коэффициент теплового потока "брутто"**  $\eta_{mn}^{\text{бр}} = 1 - \sum \Delta Q_i / Q$  не учитывает потери, сопровождающие процесс выработки энергии, расходуемой питательными насосами на транспорт энергоносителя (рабочего тела). Поэтому представляется целесообразным ввести понятие **коэффициента теплового потока "нетто"**:

$$\eta_{mn}^{\text{н}} = 1 - \frac{\sum \Delta Q_i + (\Delta q - A \sum m_i \Delta P_i)}{Q},$$

где  $Q$  – тепловой поток от котло- к турбоагрегату;  $\Delta Q_i$  – потери теплоты между котло- и турбоагрегатом от трубопроводов перегретого пара

$$\eta_{\text{к}}^{\text{н}} = \frac{Q_{\text{к}} - 3,6 \mathcal{E}_{\text{тлм}}}{29,31 B} \cdot \frac{100 - \mathcal{E}_{\text{сн}}^{\text{бл}}}{100 - \alpha_{\text{пн}}^T \mathcal{E}_{\text{пн}} - \mathcal{E}_{\text{сн}}^{\text{м}}} = \frac{Q_{\text{к}}}{29,31 B} \cdot \left( 1 - \frac{3,6 \mathcal{E}_{\text{тлм}}}{Q_{\text{к}}} \right) \cdot \frac{100 - \mathcal{E}_{\text{сн}}^{\text{бл}}}{100 - \alpha_{\text{пн}}^T \mathcal{E}_{\text{пн}} - \mathcal{E}_{\text{сн}}^{\text{т}}},$$

где  $Q_{\text{к}}$  – теплота, выработанная в пароводяном тракте котлоагрегата, ГДж;  $\mathcal{E}_{\text{тлм}}$  – расход электроэнергии на тягодутьевые механизмы котло-

и питательной воды;  $m_i$  – масса рабочего тела;  $\Delta P_i$  – потеря напора в трубопроводах пара и воды;  $\sum m_i \Delta P_i$  – потеря работы насоса между котло- и турбоагрегатом;  $A$  – тепловой эквивалент работы;

$\Delta q$  – безразмерный относительный прирост расхода теплоты на выработку энергии по конденсационному циклу (без отпуска теплоты потребителям).

Коэффициент теплового потока "нетто" учитывает сумму затрат энергии в цикле на транспорт теплового потока между котло- и турбоагрегатом. Существенными, если не основными, при транспортировании являются потери за счет дросселирования потока рабочего тела в регулирующих клапанах на линии питания котла.

Таким образом, **коэффициент теплового потока "нетто" является характеристикой транспортных средств теплового потока: насоса (с точки зрения качества регулирования напора) и трубопроводов, соединяющих котлоагрегат с турбоагрегатом**. Разность значений коэффициентов теплового потока брутто и нетто  $\Delta \eta_{mn}$ , как правило, составляет 0,001...0,005:

$$\Delta \eta_{mn} = \eta_{mn}^{\text{бр}} - \eta_{mn}^{\text{н}} = \frac{(\Delta q - A \sum m_i \Delta P_i)}{Q}.$$

Последнее выражение может быть использовано для оценки влияния на экономичность энергоблока гидравлического сопротивления любого другого участка тепловой схемы, в том числе регулирующих клапанов турбины. При нормальных параметрах и 50 %-ной нагрузке турбины, например, около 40 % потерь энергии, связанных с работой питательного насоса, вызваны дросселированием рабочего тела (преодолением гидравлического сопротивления) в регулирующих клапанах турбины.

С учетом изложенного, приняв во внимание энергию, вносимую в цикл механизмами собственных нужд, выведем формулы показателей экономичности работы котло- и турбоагрегата и энергоустановки в целом [13].

Коэффициент полезного действия котлоагрегата "нетто", в долях единицы:

агрегата, МВт.ч; 29,31 – теплота сгорания условного топлива, ГДж/т;  $B$  – количество израсходованного условного топлива, т;  $\mathcal{E}_{\text{пн}}$  – расход электроэнергии на питательный насос, %;

$\mathcal{E}_{\text{сн}}^{\text{т}}$ ,  $\mathcal{E}_{\text{сн}}^{\text{бл}}$  – расходы электроэнергии на собственные нужды соответственно турбоагрегата (без учета питательного насоса, который здесь рассматривается отдельно) и энергоустановки, %.

На основании формулы (1) введем понятия **коэффициента возврата теплоты** в котлоагрегат механизмами собственных нужд  $K_{\text{вт}}^{\text{к}} = 1 - 3,6\mathcal{E}_{\text{тдм}}^{\text{т}}/Q_{\text{к}}$  и **коэффициента расхода электроэнергии** на собственные нужды котлоагрегатов энергоблоков:

- с питательным электронасосом:

$$K_{\text{сн}}^{\text{к}} = \frac{100 - \mathcal{E}_{\text{сн}}^{\text{бл}}}{100 - \alpha_{\text{пэн}}^{\text{т}} \mathcal{E}_{\text{пэн}}^{\text{т}} - \mathcal{E}_{\text{сн}}^{\text{т}}};$$

- с питательным турбонасосом:

$$K_{\text{сн}}^{\text{к}} = \frac{100 - \mathcal{E}_{\text{сн}}^{\text{бл}}}{100 - \alpha_{\text{пэн}}^{\text{к}} \mathcal{E}_{\text{пэн}}^{\text{к}} - \mathcal{E}_{\text{сн}}^{\text{т}}},$$

где  $\mathcal{E}_{\text{пэн}}$  – приведенный расход электроэнергии на питательный турбонасос, %.

В целях упрощения записи других формул технико-экономических показателей, объединим эти коэффициенты в одном множителе, который назовем **фактором собственных нужд** котлоагрегата:

$$f_{\text{сн}}^{\text{к}} = (K_{\text{вт}}^{\text{к}} \cdot K_{\text{сн}}^{\text{к}})^{-1}.$$

Подставив выражение (2) в (1), получим удобную для практических целей формулу коэффициента полезного действия котлоагрегата в долях единицы:

$$\eta_{\text{к}}^{\text{н}} = \frac{Q_{\text{к}}}{29,31B} \cdot \frac{1}{f_{\text{сн}}^{\text{к}}}.$$

Затем определим расход условного топлива на производство тепловой энергии, отпускаемой из турбоагрегата. Принимая во внимание, что потери турбоагрегата не относятся на тепловую энергию, так как они в соответствии с принятой в СНГ методикой [1] полностью связаны с преобразованием тепловой энергии в механическую и электрическую энергию, запишем:

#### Значения фактора собственных нужд котлоагрегата и их составляющих

| Способ вычисления                                                | $K_{\text{вт}}^{\text{к}}$ | $K_{\text{сн}}^{\text{к}}$ | $f_{\text{сн}}^{\text{к}}$ |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Предложенный метод ( $\alpha_{\text{пэн}}^{\text{т}} = 0,8$ )    | 0,995                      | 0,985                      | 1,020                      |
| Существующая практика ( $\alpha_{\text{пэн}}^{\text{т}} = 0,0$ ) | 0,995                      | 0,960                      | 1,045                      |

При учете влияния питательного насоса предложенным методом действительный КПД котлоагрегата и удельный расход теплоты на турбоагрегат оказываются на 2...3 % больше, чем по действующему в настоящее время методу учета этих показателей. Независимо от способа учета

$$B_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{омн}}}{29,31\eta_{\text{мн}}\eta_{\text{к}}^{\text{н}}},$$

где  $B_{\text{т}}$  – расход условного топлива на производство отпускаемой потребителю теплоты, т;  $\eta_{\text{мн}} = Q_{\text{м}}/Q_{\text{к}}$  – коэффициент теплового потока;  $Q_{\text{омн}}$  – теплота, отпущенная потребителям из отборов турбины, ГДж;  $Q_{\text{м}}$  – теплота, поступившая из котло- в турбоагрегат по пароводяному тракту, ГДж.

Подставив выражение (3) в (4), получим искомое выражение расхода условного топлива на производство теплоты:

$$B_{\text{т}} = B f_{\text{сн}}^{\text{к}} Q_{\text{отп}}/Q_{\text{к}}.$$

Количество условного топлива в тоннах на выработку электроэнергии найдем по разности:

$$B_{\text{э}} = B - B_{\text{т}} = B(1 - f_{\text{сн}}^{\text{к}} Q_{\text{отп}}/Q_{\text{к}}),$$

тогда формула удельного расхода условного топлива на отпущенную электроэнергию примет следующий вид:

$$b_{\text{э}} = B(1 - f_{\text{сн}}^{\text{к}} Q_{\text{отп}}/Q_{\text{к}})/\mathcal{E}_{\text{отп}} \cdot 10^3,$$

где  $b_{\text{э}}$  – удельный расход топлива на отпущенную электроэнергию, г/(кВт·ч);  $\mathcal{E}_{\text{отп}}$  – количество отпущенной электроэнергии, МВт·ч.

С учетом вышеизложенного, воспользовавшись формулой удельного расхода топлива [12]

$$b_{\text{э}} = q_{\text{т}}^{\text{н}}/29,31\eta_{\text{тп}}\eta_{\text{к}}^{\text{н}},$$

составим формулу удельного расхода теплоты "нетто" на отпуск электроэнергии турбоагрегатом (в килоджоулях на киловатт-час):

$$q_{\text{т}}^{\text{н}} = 29,31b_{\text{э}}\eta_{\text{мн}}\eta_{\text{к}}^{\text{н}} = \frac{Q_{\text{м}}}{\mathcal{E}_{\text{отп}} \cdot 10^3} \left( \frac{1}{f_{\text{сн}}^{\text{к}}} - \frac{Q_{\text{омн}}}{Q_{\text{к}}} \right),$$

Согласно расчетам, выполненным для энергоблока 160 МВт, получены следующие значения фактора собственных нужд котлоагрегата и их составляющих:

Таблица 1

влияния питательного насоса, полученные формулы значительно проще и точнее отражают действительные технико-экономические показатели ТЭС.

**Выводы.** Разработан алгоритм анализа энергетического баланса паротурбинной



установки, на основании которого разработаны новые аналитические выражения, всесторонне характеризующие экономичность работы энергоустановки, работающей в составе источника теплоснабжения. Рассмотрены некоторые аспекты анализа энергетического баланса паротурбинной установки с использованием относительного прироста расхода теплоты на конденсационную выработку энергии. Произведена аналитическая оценка влияния затрат энергии на собственные нужды на энергетический баланс ТЭС.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Райс Дж.Г. Термодинамическая оценка циклов совместной выработки тепла и электроэнергии в газотурбинных установках. Часть 1 – Расчет по методу теплового баланса // Тр. амер. общ. инженеров-механиков. Энергетические машины и установки. 1987. №1. С. 1–10.
2. Горшков А.С. Техничко-экономические показатели тепловых электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
3. Андрущенко А.И. Комбинированные системы энергоснабжения // Теплоэнергетика. 1997. № 5. С. 2–6.
4. Андрущенко А.И. Возможности повышения эффективности централизованного теплоснабжения городов // Промышленная энергетика. 2002. № 6. С. 15–18.
5. Буланин В.А. Некоторые вопросы анализа энергобаланса ТЭС // В кн.: Проблемы общей энергетики и топливно-энергетического комплекса. Труды Энергосетьпроекта, Выпуск 12. М., 1979. С. 10–20.
6. Буланин В.А., Родимкин Е.Д. Метод анализа энергобаланса паротурбинной установки // Электрические станции. 1978. № 11. С. 27–31.
7. РД 153-34.1-09.163-00. Типовая программа проведения энергетических обследований тепловых электрических станций и районных котельных акционерных обществ энергетики и электрификации России.
8. Бененсон Е.И., Иоффе Л.С. Теплофикационные паровые турбины. М.: Энергия, 1976. 264 с.
9. Буланин В.А. Приведение удельных показателей работы энергоустановок к расчетному режиму // Научно-технические проблемы развития и совершенствования автоматизации управления в Белорусской энергосистеме. Тезисы докладов н.-т. совещания. Минск, 1977.
10. Баринберг Г.Д., Бененсон Е.И. Влияние параметров свежего пара, промежуточного перегрева и единичной мощности на экономичность теплофикационных турбин // В сб.: Опыт создания турбин и дизелей. Свердловск, Ср.-Уральск. кн. изд-во, 1969. С. 97–102.
11. Саламов А.А. Перспективы развития электростанций на органическом топливе // Электрические станции. 1993. № 8. С. 60–64.
12. Белинский С.Я., Липов Ю.М. Энергетические установки электростанций. Учебник для вузов. М.: Энергия, 1974. 304 с.
13. Апатовский Л.Е., Крылова Л.Д., Смирнова Г.Б. Выбор рациональных схем включения калориферных установок в тепловую схему блока // Энергомашиностроение. 1975. № 6. С. 12–15.

Информация об авторах

**Буланин Владимир Анатольевич**, кандидат технических наук. Генеральный директор ООО "Инновационные технологии – Энергетика". E-mail: v\_bulanin@mail.ru. Россия, 308007, г. Белгород, ул. Мичурина, 56.

Поступила в июне 2019 г.

© Буланин В.А., 2019

**\*Bulanin V.A.**

LLC «Innovative technologies – Energy»  
Russia, 308007, Belgorod, ul. Michurina, 56.  
\*E-mail: v\_bulanin@mail.ru

### THE ALGORITHM OF ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY OF HEAT SUPPLY SOURCE

**Abstract.** The main energy-consuming element of the heat supply system of cities and settlements is a source of heat energy. In connection with the need to minimize the cost of fuel and electricity for heat supply, the article presents an analysis of the energy balance of the steam turbine installation, on the basis of which new analytical expressions are developed that comprehensively characterize the efficiency of the power plant. In 2000 epy RD 153-34.1-09.163-00 "Model program of energy audits of thermal power plants and district boiler houses of joint-stock companies of power and electrification of Russia" was enacted. Some aspects of

*the analysis of the energy balance of the steam turbine installation using the relative increase in heat consumption for condensation power generation are considered. An analytical assessment of the impact of energy costs on the boiler unit's own needs on the energy balance of the thermal power plant is made.*

**Keywords:** heat supply, heating, thermal power plant, fuel and energy complex, energy balance, combined production, cogeneration.

## REFERENCES

1. Rice J.G. Thermodynamic evaluation of the cycles of joint heat and power generation in gas turbine plants. Part 1 - Calculation by the method of heat balance [Termodinamicheskaya ocenka ciklov sovmestnoj vy`rabotki tepla i e`lektroe`nergii v gazoturbinn`x ustanovkax. Chast` 1 - Raschet po metodu teplovogo balansa] Tr. Amer. Ls. of mechanical engineers. Power machines and installations. 1987. No. 1. Pp. 1–10. (rus)
2. Gorshkov A.S. Technical and economic indicators of thermal power plants [Tekhniko-ekonomicheskie pokazateli teplovyh elektrostancij]. M.: Energoatomizdat. 1984. 240 p. (rus)
3. Andryushchenko A.I. Combined systems of power supply [Kombinirovanny`e sistemy` e`nergosnabzheniya]. Power engineering. 1997. No. 5. Pp. 2–6. (rus)
4. Andryushchenko A.I. Possibility of improving the efficiency of district heating of cities [Vozmozhnosti pov`sheniya e`ffektivnosti centralizovannogo teplosnabzheniya gorodov]. Industrial energy. 2002. No. 6. Pp. 15–18. (rus)
5. Bulanin V.A. Some problems of the analysis of the energy balance of thermal power plant [Nekotory`e voprosy` analiza e`nergobalansa TE`S]. In book problems of General energy and fuel and energy complex. Proceedings of the power grid Project, Issue 12. M., 1979. Pp. 10–20. (rus)
6. Bulanin V.A., Rodimkin E.D. Method of analysis of steam turbine unit energy balance [Metod analiza e`nergobalansa paroturbinnoy ustanovki]. Power plants. 1978. No. 11. Pp. 27–31. (rus)
7. RD 153-34.1-09.163-00. A typical program of energy surveys of thermal power plants and district boiler joint-stock companies of energy and electrification of Russia [Tipovaya programma provedeniya e`nergeticheskix obsledovaniy teplovy`x e`lektricheskix stancij i rajonny`x kotel`ny`x akcionerny`x obshhestv e`nergetiki i e`lektrifikacii Rossii] (rus)
8. Benenson E.I., Ioffe L.S. Heat steam turbines [Teplofikacionnye parovye turbiny]. M.: Energy, 1976. 264 p. (rus)
9. Bulanin V.A. Reduction of specific performance indicators of power plants to the design mode [Privedenie udel`ny`x pokazatelej raboty` e`nergoustanovok k raschetnomu rezhimu]. Scientific and technical problems of development and improvement of control automation in the Belarusian power system. Abstracts of the meeting. Minsk, 1977. (rus)
10. Barinberg G.D., Benenson E.I. The effect of fresh steam parameters, intermediate overheating and single power on the efficiency of thermal turbines [Vliyaniye parametrov svezhego para, promezhutochnogo peregreva i edinichnoj moshchnosti na ekonomichnost' teplofikacionnyh turbin]. In Sat.: Experience creating a tour of bins and diesels. Sverdlovsk. Sr.-Uralsk. Kn. Ed-Vo, 1969. Pp. 97–102. (rus)
11. Salamov A. A. Prospects of development of power plants on organic fuel [Perspektivy` razvitiya e`lektrostancij na organicheskom toplive]. Power plants. 1993. No. 8. Pp. 60–64. (rus)
12. Belinsky S.Y., Lipov Y.M. Power plants. A textbook for universities [Energeticheskie ustanovki elektrostancij. Uchebnik dlya vuzov]. M.: Energy, 1974. 304 p. (rus)
13. Apatovsky L.E., Krylova L.D., Smirnova G.B. Choosing rational schemes to include calorie-making plants in the thermal scheme of the block [Vybor racional'nyh skhem vkluycheniya kalorifernykh ustanovok v teplovuyu skhemu bloka]. Energy engineering. 1975. No. 6. Pp. 12–15. (rus)

## Information about the authors

**Bulanin, Vladimir A.** PhD, General Director LLC «Innovative technologies – Energy». E-mail: v\_bulanin@mail.ru. Russia, 308007, city Belgorod, street Michurina, 56.

*Received in June 2019*

## Для цитирования:

Буланин В.А. Алгоритм анализа энергоэффективности источника теплоснабжения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 54–62. DOI: 10.34031/article\_5da452a45dbf30.07663447

## For citation:

Bulanin V.A. The algorithm of analysis of energy efficiency of heat supply source. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 9. Pp. 54–62. DOI: 10.34031/article\_5da452a45dbf30.07663447

DOI: 10.34031/article\_5da4538a5391f9.46809256

**\*Серебрякова М.В.***Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26**\*E-mail: smv2312@mail.ru*

## **ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ С УЧЁТОМ ТРЕБОВАНИЙ ИНСОЛЯЦИИ И СОЛНЦЕЗАЩИТЫ**

**Аннотация.** В статье обозначены проблемы развития крупных городов в России и зарубежных странах, связанные с дефицитом земельных участков на территориях крупных городов для реализации новых инвестиционно-строительных проектов. В связи с чем перед современными архитекторами и градостроителями возникают сложные задачи, связанные с размещением новых объектов недвижимости в сложившейся городской застройке на ограниченных по площади земельных участках. Новые здания должны соответствовать требованиям инсоляции, при этом территории, прилегающие к новым и существующим зданиям, также должны быть обеспечены необходимым солнечным излучением. В статье выполнен анализ зарубежного опыта реализации инвестиционно-строительных проектов зданий различного функционального назначения с учётом требований инсоляции и солнцезащиты, выполнен анализ объёмно-планировочных решений зданий, наиболее интересных с точки зрения проектирования инсоляции. Дается описание современных технических приёмов и инновационных решений, реализуемых зарубежными архитекторами в процессе проектирования инсоляции зданий. Даны рекомендации по применению программного обеспечения российских и зарубежных производителей. Акцентируется внимание российских архитекторов о необходимости моделирования инсоляции на начальном этапе реализации инвестиционно-строительного проекта. Обозначена роль архитектора при создании архитектурной концепции здания и её влияние на последующие этапы развития инвестиционно-строительного проекта.

**Ключевые слова:** зарубежный опыт, инвестиционно-строительный проект, инсоляция, солнцезащита зданий, архитектурная концепция, проектирование.

**Введение.** За последние десятилетия архитектура современных городов значительно изменилась и продолжает меняться.

Территории крупных городов освобождаются от ветхой и малоэтажной застройки, а также старых промышленных предприятий, на их месте реализуются современные многоэтажные здания и комплексы, а в существующих кварталах сложившейся застройкой реализуются точечные объекты недвижимости [1].

Значительная миграция населения из пригородов в крупные города вызывает увеличение плотности населения, в связи с чем для строительства новых объектов недвижимости остаётся все меньше земельных участков, свободных от застройки.

В условиях ограниченности земельных ресурсов и повышенной их стоимости девелоперским компаниям приходится решать проблемы, связанные с повышением эффективности инвестиционно-строительных проектов за счёт увеличения этажности зданий. При этом земельный участок, выделяемый под размещение нового здания, как правило, ограничен по площади, в связи с чем, всё чаще реализуются многоэтажные высотные здания.

Архитектура современных жилых и общественных зданий приобретает новые черты: помимо того, что увеличивается этажность, также

изменяется геометрическая форма зданий и объёмно-пространственные решения застройки кварталов, а современная отделка фасадов придаёт возведенным зданиям новый современный облик.

Для районов с умеренным климатом увеличение этажности зданий создаёт проблемы с обеспечением нормативного уровня инсоляции существующих зданий окружающей застройки и прилегающих территорий [2].

В южных районах с жарким климатом увеличение этажности зданий незначительно сказывается на инсоляции окружающей застройки, но в этом случае приходится решать задачи, связанные с защитой фасадов зданий от чрезмерного перегрева и устройством солнцезащитных элементов [3].

Аналогичные тенденции и проблемы развития современных городов свойственны зарубежным странам.

В практике зарубежного строительства успешно реализуются проекты зданий, расположенные в сложившейся городской застройке. В процессе создания проектов зарубежные архитекторы уделяют большое значение проблемам инсоляции зданий и через поиск нескольких вариантов проектных решений определяют такую

геометрическую форму здания, при которой достигаются наиболее комфортные условия инсоляции зданий и прилегающих территорий.

В практике зарубежного проектирования достаточно давно и успешно применяются методы трёхмерного моделирования инсоляции и солнцезащиты зданий с использованием современных компьютерных программ, таких как: Autodesk Project Vasari, Archicad, Autodesk Revit, Rhinoceros и аналогичных.

Средствами компьютерного моделирования на этапе создания архитектурной концепции проекта анализируются различные варианты геометрической пространственной формы одно и того же здания с использованием траектории движения солнечных лучей.

Методами трёхмерного моделирования определяется площадь поверхности фасада для размещения солнцезащитных устройств, определяются эффективные углы наклона фасадных панелей для установки солнечных батарей [4].

Результаты трёхмерного моделирования инсоляции могут значительно повлиять на конфигурацию здания, его этажность, увеличить или уменьшить объём всего здания или отдельных элементов [4].

Рассмотрим некоторые примеры успешно реализованных зарубежных проектов, при создании которых архитекторам удалось расположить здания в окружающей застройке без ущерба для её инсоляции и при этом создать комфортные условия для жизнедеятельности людей.

Значительный вклад в развитие моделирования зданий с учётом солнечной энергии вносит международное архитектурное бюро «NBBJ».

Бюро «NBBJ» имеет проектные офисы в нескольких странах, в том числе, в США, Великобритании, Китае, Индии [5]. Инженеры «NBBJ» занимаются изучением солнечного излучения и его влиянием на геометрию фасадов зданий, защитой зданий от чрезмерного солнечного излучения и перегрева, проектированием автоматических устройств солнцезащиты.

Архитектурное бюро «NBBJ» является автором проекта по созданию концепции двух рядом расположенных высотных зданий башенного типа, пространственная и геометрическая форма которых была определена по траектории движения солнечных лучей [6].

Архитектурная концепция предусматривает возведение двух небоскребов в районе Гринвич г. Лондон (Великобритания), которые не будут отбрасывать тени на соседние здания и прилегающие территории (в соответствии с рисунком 1).

Данная концепция получила название «здания без теней». Здания расположены таким образом, что большую часть солнечного излучения

фасады отражают на затенённые территории и фасады самих зданий.



Рис. 1. «Здания без теней» в районе Гринвич (г. Лондон, Великобритания). 3D-визуализация

Для трёхмерного моделирования зданий применялось компьютерное программное обеспечение «Rhinoceros».

По результатам трёхмерного моделирования фасад одного из зданий запроектирован в форме гигантского изогнутого зеркала. Фасад этого здания отражает свет на затенённый участок, образованный его «южным» двойником, а специфическая кривая стеклянной поверхности фасада равномерно отражает солнечное излучение в течение всего дня.

Геометрическая форма изогнутого фасада повторяет кривую движения солнечных лучей (в соответствии с рис. 2). За счёт использования рассеянного отражения от поверхности фасадов с высоким коэффициентом отражения обеспечивается инсоляция затенённых территорий и фасадов рядом расположенных зданий.

На начальном этапе моделирования в программное обеспечение «Rhinoceros» было заложено множество исходных данных, в том числе, архитектурные и нормативные требования к общественным и жилым помещениям.

По результатам моделирования программа предложила несколько возможных вариантов моделей, которые были проанализированы архитекторами и доработаны с учётом максимально возможного рассеянного отражения. Итогом этого сложного процесса получился концептуальный проект двух рядом расположенных зданий башенного типа, который потенциально может исключить около 60 процентов теней, падающих от самих зданий.



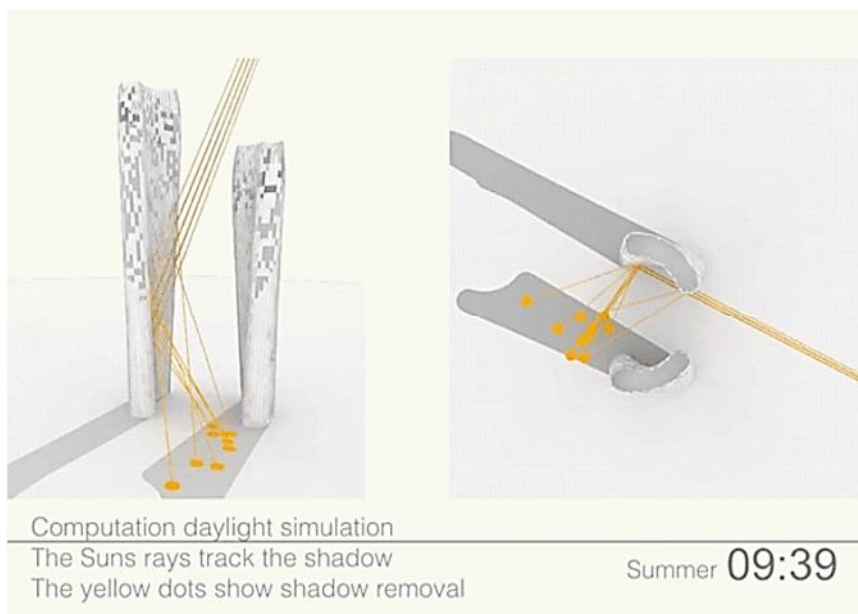


Рис. 2. Использование отражённого солнечного излучения, предложенного архитекторами бюро «NBBJ»

Программное обеспечение «Rhino» не ограничено какой-либо конкретной географической зоной и может применяться для различных вариантов освещения затенённых территорий в любой точке земного шара. Это может быть основным преимуществом при планировании быстро растущих городских районов и решать проблемы неравномерного распределения солнечного излучения в городской застройке.

Вторым известным объектом архитектурного бюро «NBBJ» является концепция многофункционального здания «Rainier Square» в г. Сиэтл (США) (в соответствии с рис. 3) [7].

Здание «Rainier Square» расположено в центре города рядом с достопримечательностью г. Сиэтл – башней «Rainier Tower», построенной по замыслу японского архитектора Минору Ямаки в середине прошлого века.

Форма здания «Rainier Square» была определена на основании анализа пространственной трёхмерной модели окружающей застройки и напоминает форму «каблука». Новое здание отступает назад, открывая вид на башню «Rainier Tower».

Изогнутая поверхность фасада обеспечивает не только хорошие видовые характеристики и обзор на соседнюю башню, но также необходимую инсоляцию и освещённость здания «Rainier Tower» (в соответствии с рис. 4).

Для облицовки фасада здания «Rainier Square» были применены металлические «призматические» панели. В зависимости от положения солнечных лучей на небосводе металлические панели автоматически изменяют своё положение в течение дня: добавляются, исключаются, либо

поворачиваются на 180 градусов, что создаёт изменения на фасаде (в соответствии с рис. 5, 6).

Благодаря такому интегрированному и комплексному подходу к созданию объекта недвижимости системы «Rainier Square» позволяют повысить уровень энергоэффективности здания, как минимум на 7,5 % выше требований Сиэтлского энергетического кодекса, который является одним из самых требовательных в США.



Рис. 3. Многофункциональное здание «Rainier Square» (г. Сиэтл)

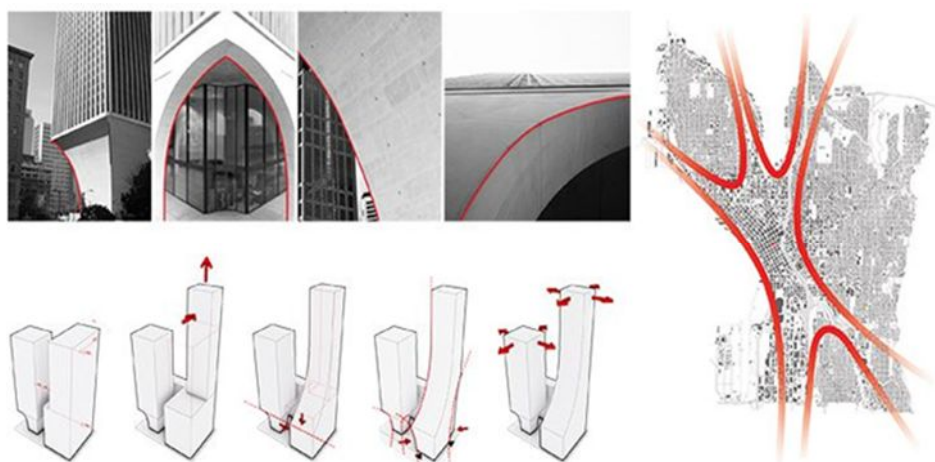


Рис. 4. Здание «Rainier Square»: различные варианты объёмно-планировочных решений



Рис. 5. Фрагмент фасада здания «Rainier Square»

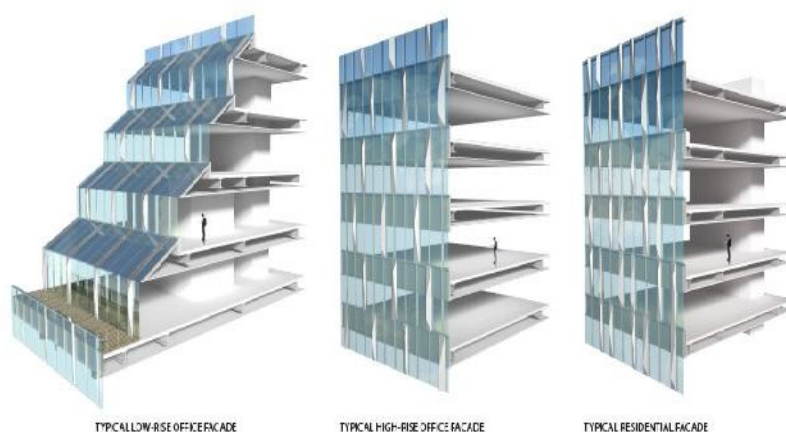


Рис. 6. Здание «Rainier Square»: различные положения металлических панелей

Здание «Rainier Square» является ярким примером подтверждающим, что, если на этапе создания архитектурной концепции будущего объекта недвижимости уделить достаточное внимание вопросам инсоляции через поиск оптимальной формы здания, то это позволит инвесторам и

застройщикам реализовывать амбициозные проекты на ограниченных по площади земельных участках в условиях сложившейся городской застройки.

Инновационный проект с использованием солнечного излучения был реализован в г. Сидней (Австралия) по замыслу архитектора Жана



Нувеля. По замыслу архитектора реализовано многофункциональное здание «One Central Park», которое представляет собой две жилые многоквартирные башни, одна из которых 34-х этажная высотой 116 м, вторая – 12-ти этажная высотой 64,5 м [8].

В башнях предусмотрены 623 жилые квартиры и 16 000 кв. м. торговых площадей. Общая площадь здания составляет 97 000 кв. м.

На нижележащих этажах обе башни объединяются общественным пространством - торговым центром, на кровле которого предусмотрены площадки для отдыха (в соответствии с рисунком 7). Башни и прилегающий парк объединены каскадом озеленённых террас. Из парка можно напрямую добраться до торгового центра.

В верхней части 34-х этажной башни подвешен мощный гелиостат, который улавливает солнечный свет и отражает его вниз в область парка, затененную башней (в соответствии с рисунком 8). Над гелиостатом предусмотрена консоль, на которой расположены помещения общего пользования и панорамная терраса для жилых квартир.



Рис. 7. Общий вид здания «One Central Park», г. Сидней (Австралия)

Опорные тросы, встроенные в фасады башен, поддерживают различные растения. Растения защищают фасады зданий от перегрева и действуют, как естественное устройство для контроля солнечного излучения, которое меняется в зависимости от сезона, тем самым защищая жилые помещения от прямых солнечных лучей летом, при этом допуская максимум солнечного света зимой.

В данном проекте отражённый солнечный свет используется для освещения затенённой территории, расположенной между двумя зданиями,

которая в дальнейшем может использоваться для размещения площадок для отдыха.

Концепция здания «One Central Park» - яркий пример инновационного использования солнечного излучения и траектории движения солнечных лучей при создании объекта недвижимости с такими объёмно-планировочными и конструктивными решениями, при которых формируется среда, комфортная для проживания и жизнедеятельности людей, а также достигаются высокие показатели эффективности проекта за счёт рационального использования площади земельного участка.



Рис. 8. Использование отражённого солнечного излучения в здании «One Central Park», г. Сидней (Австралия)

В современной архитектуре формообразующее действие света представлено таким интересным проектом, как торговый центр «Галерея Лафайет» в г. Берлин (Германия) с оригинальной системой «световых воронок» для естественного освещения помещений [9].

Автором проекта торгового центра «Галерея Лафайет» выступает французский архитектор Жан Нувель. Для естественного освещения помещений использован принцип световых воронок или конусов. Крышу торгового центра венчает огромный стеклянный конус с вершиной, возвышающейся над кровлей здания. Такой же конус, но перевернутый уходит своей вершиной на нижние этажи (в соответствии с рисунком 9) [10].



Рис. 9. Здание торгового центра «Галерея Лафайет» (г. Берлин). Вид на верхнюю и нижнюю световую воронку

Техническое решение с использованием световых воронок обеспечивает доступ природного света в помещения надземных торговых залов и офисов и частично в помещения подземной автостоянки, что гарантирует существенную экономию энергоресурсов на этапе эксплуатации здания.

В практике зарубежного строительства широко применяются современные автоматизированные саморегулируемые солнцезащитные

устройства (СЗУ), которые подстраиваются под траекторию движения солнечных лучей и регулируют степень солнечного облучения здания. Например, 25-ти этажные офисные здания «Al Bahar Towers» в г. Абу-Даби (ОАЭ), построенные с системой регулируемых СЗУ в форме динамически открывающихся блоков-лепестков (в соответствии с рисунком 10) [11].

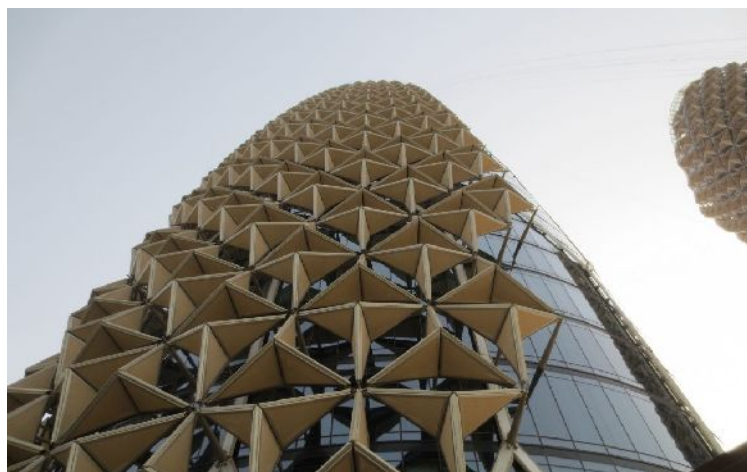


Рис. 10. Офисное высотное здание «Al Bahar Towers», г. Абу-Даби (ОАЭ)

Каждый отдельный протектор (блок-лепесток) открывается и закрывается по мере движения солнечных лучей, фильтрует свет и уменьшают слепимость. Огромная решётка практически полностью окружает две башни по контуру, за исключением, той части фасадов, которые ориентированы на север.

Каждая из двух башен оснащена более чем 1000 индивидуальными солнечными протекторами, которые контролируются через автоматизированную систему управления зданием, таким образом, создавая интеллектуальный фасад.

Применение современных технологий параметрического и алгоритмического моделирования позволило доработать архитектурную концепцию здания «Al Bahar Towers» без искажения первоначального архитектурного замысла проекта.

**Выводы.** На основании анализа зарубежного опыта проектирования зданий с учётом требований инсоляции и солнцезащиты можно сделать вывод, что при создании архитектурной концепции зданий различного функционального назна-

чения достаточно глубоко изучаются и применяются физические явления, связанные с использованием солнечного излучения и траектории движения солнечных лучей. Фактически солнечные лучи являются «строительным материалом», формирующим окружающую застройку [12].

Исследования, проводимые зарубежными архитекторами в процессе проектирования зданий, позволяют использовать солнечные лучи и искусственно создавать траекторию их движения в необходимом для человека направлении, что способствует созданию зданий с необычной геометрической формой и оригинальной архитектурой.

Успешное использование отражённого солнечного излучения в комбинации с современными облицовочными материалами для фасадов зданий предоставляет возможности для реализации проектов на ограниченных по площади земельных участках, как это было реализовано архитектурным бюро «NBBJ» при создании «зданий без теней».

Применение современных инновационных решений с гелиостатами позволяет использовать отражённое солнечное излучение для освещения и облучения закрытых изолированных территорий, что позволяет создавать комфортные пространства для жизнедеятельности и пребывания людей.

Особенно стоит отметить, что использование отражённого солнечного излучения позволяет улучшить условия инсоляции затенённых территорий в условиях плотной городской застройки, а также более эффективно использовать свободные земельные участки в крупных городах.

Применение технологий трёхмерного моделирования зданий позволяют находить оптимальные решения застройки практически без ограничения числа вариантов объёмно-планировочных решений, при этом обеспечивается пространственное и объёмно-визуальное представление об условиях инсоляции. Для расчёта продолжительности инсоляции и уровня естественной освещённости зданий используются различные программные комплексы российского и зарубежного производства.

Среди зарубежных программных комплексов наиболее успешно применяются: Autodesk Ecotect Analysis, Autodesk Revit, Autodesk Project Vasari, Archicad, Rhinoceros. Среди российских программных комплексов применяются программы СИТИС: Солярис и BASE (производитель ООО ПСП «Стройэкспертиза»). Из перечисленных программных комплексов наиболее приемлемыми для трёхмерного моделирования инсоляции зданий с учётом требований российских

норм являются программы: Autodesk Revit, СИТИС: Солярис, BASE.

Проводя аналогию между инвестиционно-строительными проектами, реализуемыми в условиях сложившейся городской застройки на территории Российской Федерации и в зарубежных странах, можно сделать вывод, что в процессе проектирования зданий на территории Российской Федерации в недостаточной степени уделяется внимание физическим явлениям, связанным с использованием солнечного излучения.

Следует отметить, что создание архитектурной концепции здания происходит на предпроектной стадии реализации инвестиционно-строительного проекта, когда формируются основные технико-экономические показатели проекта и выполняется анализ осуществимости проекта. Поэтому успешная реализация проекта во многом зависит от профессионального опыта и квалификации архитектора, способности архитектора мыслить нестандартно и в полной мере использовать не только личные знания и опыт, но также знания в смежных областях профессиональной деятельности.

Российским архитекторам рекомендуется изучить опыт реализации зарубежных проектов с использованием солнечной энергии и траектории движения солнечных лучей, а современные технологии проектирования и компьютерного моделирования зданий будут только способствовать развитию данного направления деятельности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касьянов В.Ф. Реконструкция жилой застройки городов: учеб. пособие. М.: Ассоциации строительных вузов, 2005. 224 с.
2. Грициенко Д.Г. Разработка методики реконструкции городской застройки с учётом проблем инсоляции: дис.... канд. тех. наук. М., 2016. С. 6–10.
3. Маклакова Т.Г. Архитектурно-конструктивное проектирование зданий. Т.1. Жилые здания: учебник для вузов. М.: Архитектура-С, 2010. 328 с.
4. Куприянов В.Н. Климатология и физика архитектурной среды: Монография. М.: АСВ, 2016. 194 с.
5. NBBJ / Contact. URL: <http://www.nbbj.com/contact> (дата обращения: 15.05.2019).
6. Architectural Firm NBBJ Conceptualizes Skyscrapers That Wouldn't Cast Shadows. URL: <https://www.hexapolis.com/2015/03/16/architectural-firm-nbbj-conceptualizes-skyscrapers-that-wouldnt-cast-shadows> (дата обращения: 15.05.2019).
7. Completing the Square. URL:

<http://www.nbbj.com/work/rainier-square> (дата обращения: 22.05.2019).

8. Ateliers Jean Nouvel. One central park. URL: <http://www.jeannouvel.com/en/projects/one-central-park> (дата обращения: 22.05.2019).

9. Лицкевич В.К. Архитектурная физика: учеб. для вузов. М.: Архитектура-С, 2007. 448 с.

10. Берлинские Галереи Лафайет в Берлине. URL: <https://weatlas.com/landmarks/730> (дата обращения: 22.05.2019).

11. Al Bahar Towers. URL: <https://en.wikiarquitectura.com/building/Al-Bahar-Towers> (дата обращения: 23.05.2019).

12. Соловьёв А.К. Физика среды. Учебник. М.: АСВ, 2011. 352 с.

13. Успенская А.М. Значение стадии «Архитектурная концепция» в проектной

деятельности // Материалы международной научно-практической конференции: Наука, образование и экспериментальное проектирование. Сборник статей. М.: МАРХИ, 2014. С. 281–283.

14. Слукин В.М., Смирнов Л.Н. Обеспечение нормативных условий естественного освещения жилых зданий в уплотнённой городской застройке // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. 2011. № 4. С. 61–63.

15. Баронин С.А., Меньшаков Д.И. Девелопмент проектов реконструкции и развития городских территорий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. №5-2 (38). С. 276–280.

#### Информация об авторах

**Серебрякова Марина Владимировна**, магистрант кафедры организации строительства и управления в строительстве. E-mail: smv2312@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Поступила в июне 2019 г.

© Серебрякова М.В., 2019

**\*Serebryakova M.V.**

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)  
Russia, 129337, Moscow, Yaroslavl highway, 26*

*\*E-mail: smv2312@mail.ru*

## FOREIGN EXPERIENCE OF DESIGN OF BUILDINGS SUBJECT TO THE REQUIREMENTS OF INSOLATION AND SUN PROTECTION

**Abstract.** The article identifies the problems of development of large cities in Russia and foreign countries associated with the shortage of land in the territories of large cities for the implementation of new investment and construction projects. In this connection, modern architects and urban planners face complex challenges associated with the placement of new real estate in the existing urban development on limited land plots. New buildings must meet the requirements of insolation, and the areas adjacent to new and existing buildings must also be provided with the necessary solar radiation. The article analyzes the foreign experience in the implementation of investment and construction projects of buildings of various functional purposes, taking into account the requirements of insolation and sun protection, the analysis of space-planning solutions of buildings, the most interesting from the point of view of insolation design. The description of modern techniques and innovative solutions implemented by foreign architects in the process of designing insolation of buildings is given. Recommendations on the use of software of Russian and foreign manufacturers are given. The attention of Russian architects is focused on the need to simulate insolation at the initial stage of the investment and construction project. The role of the architect in the creation of the architectural concept of the building and its impact on the subsequent stages of development of the investment and construction project.

**Keywords:** foreign experience, investment and construction project, insolation, building shading, design.

### REFERENCES

1. Kas'yanov V.F. Reconstruction of residential buildings of cities: textbook [Rekonstrukciya zhiloy zastroyki gorodov: uchebnoe posobie]. M.: Association of construction universities, 2005. 224 p. (rus)
2. Gricienko D.G. Development of methods of reconstruction of urban development, taking into

account the problems of insolation: dis. Cand. tech. sciences. M., 2016. Pp. 6–10. (rus)

3. Maklakova T.G. Architectural and structural design of buildings. T.I. Residential buildings: textbook for universities [Arhitekturno-konstruktivnoe proektirovanie zdaniy. T.I. Zhilye zdaniya: uchebnik dlya vuzov]. M.: Architecture-C, 2010. 328 p. (rus)

4. Kupriyanov V.N. Climatology and physics of architectural environment: Monograph [Klimatologiya i fizika arhitekturnoj sredy: Monografiya]. M.: ASV, 2016. 194 p. (rus)
5. NBBJ / Contact. URL: <http://www.nbbj.com/contact> (date accessed: 15.05.2019).
6. Architectural Firm NBBJ Conceptualizes Skyscrapers That Wouldn't Cast Shadows. URL: <https://www.hexapolis.com/2015/03/16/architectural-firm-nbbj-conceptualizes-skyscrapers-that-wouldnt-cast-shadows> (date accessed: 15.05.2019).
7. Completing the Square. URL: <http://www.nbbj.com/work/rainier-square> (date accessed: 22.05.2019).
8. Ateliers Jean Nouvel. One central park. URL: <http://www.jeannouvel.com/en/projects/one-central-park> (date accessed: 22.05.2019).
9. Lickevich V.K. Architectural physics: textbook for universities [Arhitekturnaya fizika: uchenik dlya vuzov]. M.: Architecture-C, 2007. 448 p. (rus)
10. Berlin Lafayette Galleries in Berlin. URL: <https://weatlas.com/landmarks/730> (date accessed: 22.05.2019).
11. Al Bahar Towers. URL: <https://en.wikiarquitectura.com/building/Al-Bahar-Towers> (date accessed: 23.05.2019).
12. Solov'yov A.K. Physics of the environment. Textbook [Fizika sredy. Uchebnik]. M.: ASV, 2011. 352 p. (rus)
13. Uspenskaya A.M. The importance of the stage "Architectural concept" in the project activities [Znachenie stadii «Arhitekturnaya koncepciya» v proektnoj deyatel'nosti]. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: Nauka, obrazovanie i eksperimental'noe proektirovanie. Sbornik statej. M: MARHI, 2014. Pp. 281–283. (rus)
14. Slukin V.M., Smirnov L.N. Providing normative conditions of natural lighting in residential buildings in dense urban areas [Obespechenie normativnyh uslovij estestvennogo osveshcheniya zhilyh zdaniy v uplotnyonnoj gorodskoj zastrojke]. Akademicheskij vestnik URALNIIPROEKT RAASN. 2011. No. 4. Pp. 61–63. (rus)
15. Baronin S.A., Menshakov D.I. Development of projects of reconstruction and development of urban areas [Development proektov rekonstrukcii i razvitiya gorodskih territorij]. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2011. No. 5-2 (38). Pp. 276–280. (rus)

#### *Information about the authors*

**Serebryakova, Marina V.** Master student. E-mail: smv2312@mail.ru. Moscow State University of Civil Engineering National Research University. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

---

*Received in June 2019*

#### **Для цитирования:**

Серебрякова М.В. Зарубежный опыт проектирования зданий с учётом требований инсоляции и солнцезащиты // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 63–71. DOI: 10.34031/article\_5da4538a5391f9.46809256

#### **For citation:**

Serebryakova M.V. Foreign experience of design of buildings subject to the requirements of insolation and sun protection. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 9. Pp. 63–71. DOI: 10.34031/article\_5da4538a5391f9.46809256



DOI: 10.34031/article\_5da45bff2b98c1.59941739

**\*Горожанкин В.К.***Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46**\*E-mail: vk.goro@yandex.ru*

## СЦЕНАРИИ И ПОСТ-ПРОЕКТНЫЕ ПРОГРАММЫ АРХИТЕКТУРЫ

**Аннотация.** Отношения предпроектных исследований и проектного конструирования продиктованы утилитарными задачами моделирования ситуаций, в которых осуществляется возведение и эксплуатация построек. Функциональное и технологическое моделирование объекта не затрагивает художественного содержания постройки, которое подлежит выражению в архитектурной форме. Функциональную типологию дополняют сценарии зрелища архитектуры и художественные программы архитектурного формообразования, аккумулирующие опыт удачного проектирования. Программа развивается из концепции, направляющей проектное мышление и поиск предыдущих решений, преобразуется в сценариях зрелищ, затем художественные артефакты удачных воплощений сюжета критика осознаёт, как средства стиля или язык направления.

**Ключевые слова:** сценарий, сцена, художественная программа, артефакт, сюжет.

**Идея пост-проекта.** Как иногда бывает, идея пост-проекта случайно встретила в статье Евгении Репиной и запомнилась методом иконолического дискурса – рассуждением, развёрнутом в последовательности рисунков, которые интерпретируют образ или преобразуют в ритмический сценарий составные графемы природного явления, увиденные на фотографии. Такой сценарий, демонстрирующий восприятие игры объекта, или такая сценограмма – графическая модель сцены, на которой разыгрывается спектакль

«ролевого притворства», – оказываются возможными для повторного воспроизведения в проектируемой ситуации [9]. Проектная установка и способность проектного конструирования часто переносятся из одной области искусства в другую, например, «пост-изобразительный» анализ картинного пространства доктор Ремизова Е.И. переносит в сферу композиционной подготовки архитектора для развития воображения обучаемого и расширения средств проектного конструирования в архитектуре (рис. 1) [8].

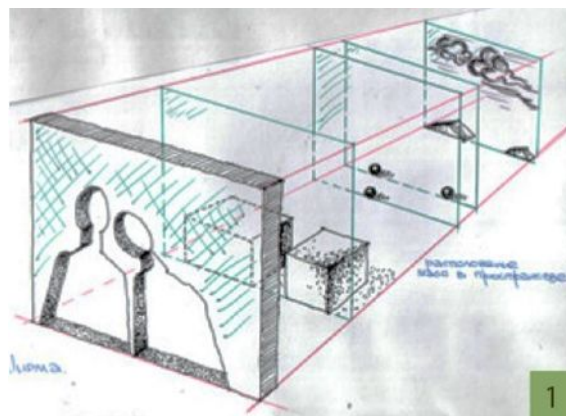
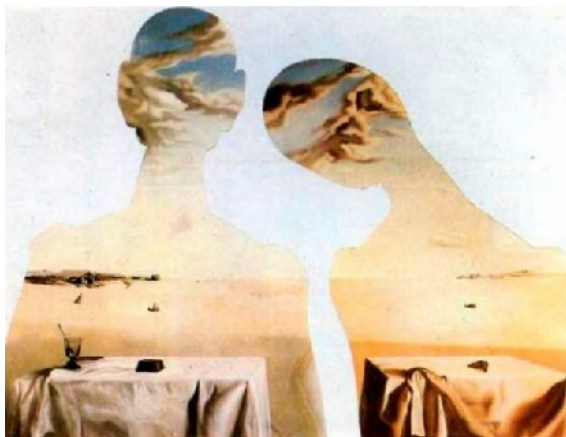


Рис. 1. Модель сцены картинного пространства в картине С. Дали «Пара с облаками в головах»

**Развитие художественных средств по принципу аналогии видов искусств.** Действенным каналом развития методов художественного конструирования является отыскание аналогий художественного моделирования и сравнение средств, аналогичных в его видах. Одна из древних аналогий обнаружена в сравнении моделей космической архитектоники и музыкальной гармонии «небесных сфер» в античной эстетике Платона, Пифагора, Аристотеля, а также других

философов средневекового мира и нового времени (рис. 2). Затем, аналогия была продолжена философами романтизма, в частности Ф.В.Й. Шеллингом, от которого сохранилась метафора «архитектуры как застывшей музыки» [13]. Очевидно, что оживление застывшего формообразования происходит в процедурах пропорционального соразмерения, осуществимых с помощью наугольника или циркуля (рис. 3).





Рис. 2. Гармония небесных сфер в модели мира по Иогану Кеплеру, 1596

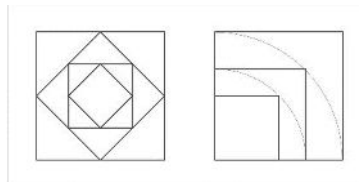


Рис. 3. Сценарий вписанно-описанных квадратов или удвоения площади – «вавилон» (вверху) и «динамичная пропорция» прямоугольников с иррациональными отношениями сторон (внизу)



Рис. 4. Система триангулирования Г. Сторналокко

В связи с графемами рис. 2–4 уместен вопрос о функциях этой графики в проектировании при их очевидном пост-проектном происхождении. Процедуры пропорционирования используют приёмы переноса размеров с помощью циркуля и параллельных/ перпендикулярных линий регулирования (обычно, диагоналей прямоугольников –

рис. 4). Геометрическое конструирование ортогональной проекции несёт методический статус и не выходит за границы проектных процедур. Эту графику иногда называют (будет точно, если добавить уточнение «иконическим») шаблоном пропорционирования [1, 11, 12].

|                              |                | (будущее время) перспектива             |                                          |
|------------------------------|----------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
|                              |                | $\rightarrow O_b$                       | $\rightarrow D_b$                        |
| (настоящее время) концептива | $\uparrow O_n$ | $O_n \rightarrow O_b$<br>планирование   | $O_n \rightarrow D_b$<br>сценирование    |
|                              | $\uparrow D_n$ | $D_n \rightarrow O_b$<br>проектирование | $D_n \rightarrow D_b$<br>прогнозирование |

Рис. 5. Типология организационных форм деятельности целеполагания (построена на дистанции объект/деятельность настоящего и будущего времени)

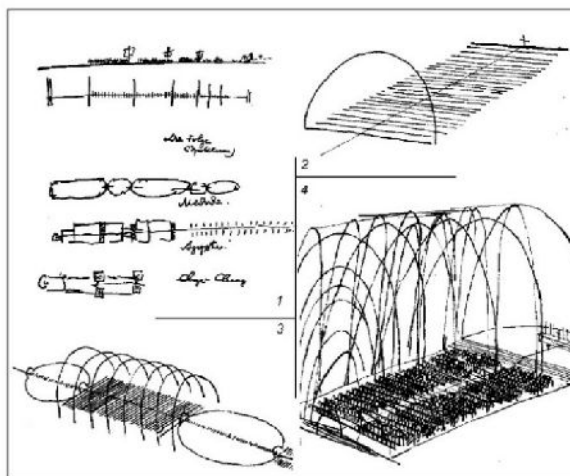


Рис. 6. Рудольф Шварц. Эскизы выражают идею движения и переносят пространственную структуру крестового хода в модель католической церкви (1930)

**Сценарии проектных подделок и симулякров.** В противоположность графическим канонам рис. 2–4, рис.1 несёт «мнимое» содержание, выраженное в подделке «возможной» сценической декорации на тему произведения – модель интерпретирует реальность того, что увидел зритель на картине С. Дали. Знание о проектируемой обстановке, рассчитанной на сценарий эмоционального воздействия, которая переносит современную семантику обстановки, приобретенную ей в прошлом опыте, в проектируемые будущие

«сценические» конструкции, тем самым организуя постановочное действие и его сценическое восприятие – такова суть целеполагающей практики «сценирования» (рис. 5) [2, 5]. История «средового проектирования» обнаруживает большое число сценарных прецедентов – от «типовых спектаклей» и им соответствующих схем организации сцены – «сценических подделок» (рис. 6), до «уникальных сцен» созданных проек-

тировщиком «сценических симулякров», - обстановки, которая имитирует эмоциональное переживание (рис. 7) [3].

Рудольф Шварц анализирует религиозную процессию (крестовый ход), в которой он выделяет значащие пустоты (означенные символами Креста) и тело последователей, разделённое интервалами времени (рис. 6 п. 1,3). Затем он переносит найденную процессуально-функциональную структуру христианского движения на морфологию храма, выделяя в нём символическую, алтарную часть к которой устремлены взгляды и мысли верующих (рис.6 п. 2). Обращаясь к архитектурной традиции, Р. Шварц видит возможность выражения символической устремлённости прихожан в сжатии аркад и уплотнения пустот, – семантика, найденная в перспективном портале входа в готический собор (рис. 6 п. 4). Храм, изображающий ритуальное шествие и передающий прихожанам импульс движения к символическому алтарю, - сцена, постижимая интеллектом, прецедент зрелищной подделки христианского движения и театрализация веры.

Сцены московского кафе «Апрель» позволяют посетителям стать зрителями спектакля конфликтного противостояния живой природы и человека, ассимилирующего природный материал для своих нужд (рис.7). Интерьер обеденных залов насыщен декорациями и муляжами некогда «живых» деревьев: леса, превращённые в полосы обоев или очищенные от ветвей неживые стволы, столы и скамьи из неокантованных досок призваны контрастировать с живой зеленью салата на столе и постерами цветения на стенах. Эти и другие сцены не рассказывают о каком-либо моральном сюжете, но создают пространства для переживания актантных конфликтов, видимых в столкновении не персонифицированных противодействующих сил. Подобный драматический тип в архитектуре встречается, например, в схемах тектоники, где пластика и рельеф поверхности изображают работу материала при распределении нагрузки в конструкции.



Рис. 7. Горожанкин А.В., Горожанкина М.А., Рынтов Ю.Н. Кафе «Апрель» представляет пространство сценических симулякров с аллюзиями весеннего перерождения природы. Москва, 2007

**Эпический сценарий мемориала.** Вероятно Страутманис И.А. был основным сценаристом первых мемориалов, созданных к 20-летию

тию победы в Хатыни, Дальве, Саласпилсе и других северо-западных территориях СССР. Этот опыт был описан им в книге [10].



Метод генерализации реальных событий (фабулы) в легенде (сюжете) и её пространственное оформление в сценах для созерцания (действия) и раздумья (переживания) – использовали в последующем проектировании мемориалов архитектор Белопольский Я. и скульптор Вучетич Е. На пост-проектной сценограмме (рис. 8) представлены созданные проектировщиками слои символической морфологии: «Путь» и «калитка», «деревья жизни», «колокол памяти» в

«сгоревшей избе», крыша сожжённого сарая; «кладбище земель» и «стена памяти погибших деревень», «непокорённый человек». Эти слои символик продолжают жить и дополнять деталями и легендами от посетителей мемориала в рассказах экскурсоводов. В этом метафорическом ландшафте современный зритель «проходит» трагический путь жителей деревень Белоруссии.



Бетонный знак съезда с дороги в сторону мемориала кодирует композиционные принципы



Расположение улиц, тропинок, колодцев повторяет планировку деревень



Сцена: «Деревья жизни»



Персонаж С. Селиханова «непокорённый человек»



Типовая сцена: Сгоревшая усадьба с колоколом памяти



Действующее лицо: темный гранит – монументальное изваяние крыши сгоревшего сарая на месте казни жителей



Кладбище земель сожжённых деревень



Стена памяти сожжённых деревень

Рис. 8. Сценограмма мемориального комплекса Хатынь

### Программа индустриального стиля.

Мысль о том, что современные люди в спортивных костюмах, едущие по улицам на велосипедах, возвращаются в квартиры, обставленные в стилях прошлых веков, расстраивала венского архитектора Отто Вагнера [7]. Написанная им книга дала архитектуре имя «современная»; она призывала к «рождению» нового стиля, но не к «возрождению» исторического прошлого. Новый стиль, писал Вагнер, не может явиться сразу во всей полноте своих деталей, он появляется в виде отдельных модных черт и элементов. Эклектическому интересу к исторической достоверности деталей и национальных черт модерн противопоставил дух стилевого единства, общности и взаимовлияния всех видов искусств, идею синтетического, цельного произведения искусства, созданного художником – универсалом, соединившим в одном лице архитектора, графика, живописца,

проектировщика бытовых вещей и, часто, теоретика. Программные установки Вагнера на поиск новых форм, соответствующих духу времени, пережили стиль «модерн» и стали фундаментом архитектурного модернизма [6].

В просторном белом интерьере церкви Святого Леопольда очевидна непреодоленность эклектической установки на многословие артефактов и авторских манер – от гламурного реализма до линейной графики наивного искусства и неоготической манеры (рис. 8). «Модные черты» ещё не предстали в виде единого индустриального кода, очевиден механический монтаж изобразительных манер, единство которых удерживается темой и сценарием литургии. «Первый искусственный стиль» – модерн – был создан согласно разработанной программе, включающей разные сценарии синтеза художественных средств.

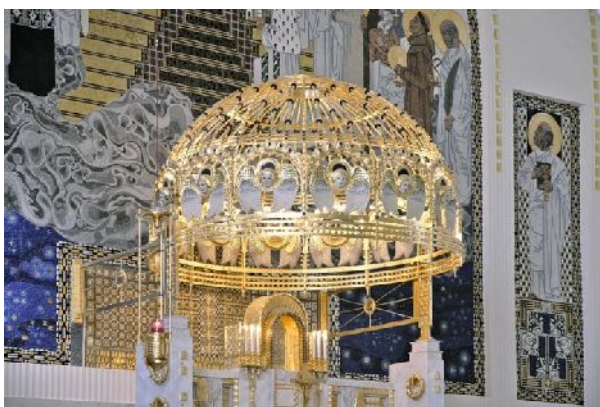


Рис. 9. Вагнер Отто. Церковь Св. Леопольда, Вена, 1907. Мозаики и витражи Коломана Мозера цитируют модные художественные манеры, поддерживая канонические темы



Рис. 9. Декоративная графика доходного дома «Майолика-хауз» в Вене, 1898.



Рис. 10. Орнаментальный фасад жилого комплекса "Музейные резиденции" в Денвере. США, Ковингтон, 2008

**Сценарий зрелищно-выразительной плоскости.** Поставив задачу поиска стиля индустриальной эпохи, О. Вагнер указал на метод переработки исторических форм, который даёт элементы будущего «современного стиля». В одном из доходных домов Вагнера в Вене, – «Майолика-хауз», – скульптурные орнаменты были заменены глазуревой росписью (см. рис. 9) [4]. Уплотнение фасадов он считал современной тенденцией, которая проявит себя в будущем. Много примеров могут подтвердить жизненность прогноза О. Вагнера. Одним из них является жилой комплекс «Музейные резиденции» в Денвере, где автор деконструктивной концепции Д. Либескинд представляет «гиперэкспрессию» в манере венского модерна (см. рис. 10). Постпроектный анализ исследует реальность, представленную в произведении архитектуры: его связь со стилями и концепциями времени создания, связь с современностью, представления о композиции и типе взаимодействия архитектуры с артефактами культуры потребления.

Иконический анализ осуществлённых проектов позволяет заметить прежде невидимые участки и зоны двусмысленности произведения, позволяет рассмотреть зрелищную интригу, высказать программную концепцию или допустить сценарную интерпретацию идеи. Стремясь соединить перспективу и восприятие зрителя, анализ устанавливает связи между художественным вымыслом и реалиями эпохи.

*Информация об авторах*

**Горожанкин Валентин Константинович**, старший преподаватель кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: gorozhankin.vk@bstu.ru; vk.goro@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

*Поступила в июне 2019 г.*

© Горожанкин В.К., 2019

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авксентьев В.А. Архитектурная пропорция. К.: Будівельник, 1986. 96 с.
2. Беляева Е.Л. Архитектурно-пространственная среда города как объект зрительного восприятия. М.: Стройиздат, 1977. 126 с.
3. Бодрийяр Ж. Символический обмен и смерть. М.: Добросвет, КДУ, 2015. 392 с.
4. Великие архитекторы. Т. 52. Вагнер. М.: Директ-Медиа, 2016. 72 с.
5. Глазычев В.Л. Социально-экологическая интерпретация городской среды. М.: Наука, 1984. 180 с.
6. Горюнов В.С., Тубли М.П. Архитектура эпохи модерна. Концепции. Направления. Мастера. СПб.: Стройиздат, 1992. 360 с.
7. Мастера архитектуры об архитектуре. М.: Искусство, 1972. 590 с.
8. Ремизова Е. Художественные методы архитектурной композиции. Харьков, 2016. 85 с.
9. Репина Е. Постпроект // Проект России. 2001. № 21. С. 33–43
10. Страутманис И.А. Информационно - эмоциональный потенциал архитектуры. М.: Стройиздат, 1978. 119 с.
11. Тиц А.А. Архитектура, стандарт, красота. К.: Будівельник, 1972. 129 с.
12. Шевелев И.Ш. Принцип пропорции. М., Стройиздат, 1986. 200 с.
13. Шеллинг Ф.В.Й. Философия искусств. М.: Мысль, 1966. 496 с.

**\*Gorozhankin V.K.**

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov  
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.*

*\*E-mail: vk.goro@yandex.ru*

## SCENARIOS AND POST-DESIGN PROGRAMS OF ARCHITECTURE

**Abstract.** The relations of predesign researches and project designing are dictated by utilitarian problems of modeling of situations in which construction and operation of constructions is carried out. Functional and technological modeling of an object does not affect the art content of construction which is subject to expression in an architectural form. The functional typology is supplemented by the scenarios of a show of architecture and art programs of architectural shaping accumulating experience of successful design. The program develops from the concept directing design thinking and search of the previous decisions will be transformed in scenarios of shows, then realized as art artifacts of the successful embodiments of a plot which is considered by the critics as means of style or language of the direction.

**Keywords:** scenario, scene, art program, artifact, plot.



## REFERENCES

1. Avksentiev V.A. Architectural proportion [Arhitekturnaya proporcija]. K.: Budivelnik, 1986. 96 p. (rus)
2. Belyaeva E.L. The architectural and spatial environment of the city as an object of visual perception [Arhitekturno-prostranstvennaya sreda goroda kak ob"ekt zritel'nogo vospriyatiya]. M.: Stroyizdat, 1977. 126 p. (rus)
3. Baudrillard J. Symbolic exchange and death [Simvolicheskij obmen i smert']. M.: Dobrosvet, KDU, 2015. 392 p. (rus)
4. Wagner Great architects [Velikie arhitektory]. Vol. 52. M.: Direct Media, 2016. 72 p.
5. Glazychev V.L. Socio-ecological interpretation of the urban environment [Social'no-ekologicheskaya interpretaciya gorodskoj sredy]. M.: Nauka, 1984. 180 p. (rus)
6. Goryunov V.S., Tubli M.P. The architecture of the modern era. Concept. Directions. Masters [Arhitektura epohi moderna. Koncepcii. Napravleniya. Mastera]. St. Petersburg: Stroyizdat, 1992. 360 p. (rus)
7. Masters of architecture about architecture [Mastera arhitektury ob arhitekture]. M.: Art, 1972. 590 p. (rus)
8. Remizova E. Art methods of architectural composition [Hudozhestvennye metody arhitekturnoj kompozicii]. Kharkov, 2016. 85 p. (rus)
9. Repina E. Postproject [Postproekt]. Project of Russia, 2001. No. 21. Pp. 33–43 (rus)
10. Strautmanis I.A. Informational - emotional potential of architecture [Informacionno - emocional'nyj potencial arhitektury]. M.: Stroyizdat, 1978. 119 p. (rus)
11. Tits A.A. Architecture, standard, beauty [Arhitektura, standart, krasota]. K.: Budivelnik, 1972. 129 p. (rus)
12. Shevelev I.Sh. The principle of proportion [Princip proporcii]. M., Stroyizdat, 1986. 200 p. (rus)
13. Schelling F.V.J. Philosophy of Arts [Filosofiya iskusstv]. M.: Thought, 1966. 496 p. (rus)

*Information about the authors*

**Gorozhankin, Valentin K.** Senior lecturer. E-mail: gorozhankin.vk@bstu.ru; vk.goro@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received in June 2019*

**Для цитирования:**

Горожанкин В.К. Сценарии и пост-проектные программы архитектуры // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 72–78. DOI: 10.34031/article\_5da45bff2b98c1.59941739

**For citation:**

Gorozhankin V.K. Scenarios and post-design programs of architecture. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 9. Pp. 72–78. DOI: 10.34031/article\_5da45bff2b98c1.59941739



DOI: 10.34031/article\_5da45cbf87b591.41469254

**\*Федоров А.М., Скопинцев А.В.**

Южный Федеральный Университет

Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/45

\*E-mail: akofur@yandex.ru

## СРЕДСТВА ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНО-ХУДОЖЕСТВЕННОЙ ВЫРАЗИТЕЛЬНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ОБЩЕСТВЕННО-ДЕЛОВЫХ ЦЕНТРОВ

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности организации выразительных архитектурно-художественных решений внешнего облика и интерьерных пространств деловых центров. Предлагаются различные подходы к эстетическому формированию деловой среды, исходя из специфики градостроительного размещения, класса и функционально-типологической классификации зданий деловых центров. Представлен ряд композиционных средств построения архитектурного облика для трех типов высотных зданий общественно-деловых центров: многофункциональных, специализированных и универсальных. Данные средства включают: а) прием детализации формы на уровне объема здания, архитектурных деталей, фактуры; б) приемы сочетания «архитектурных тем» различных функционально-планировочных, объемных и инженерно-технических компонентов делового центра, включая их последовательное развитие, комбинаторику, позитивный контраст, сознательное акцентирование и интеграцию с контекстом; в) приемы выявления высотной композиции делового здания на основе его вертикального зонирования. Разработан арсенал средств и приемов проектирования эстетически привлекательной внутренней среды и комфортных интерьерных пространств деловых и офисных зданий. Данные приемы основаны на активизации деловой среды за счет включения внутренних общественных и коллективных пространств, за счет выявления и акцентирования зон коммуникаций и технических устройств, сценарного моделирования офисно-деловых и коммуникативных пространств, нетрадиционного трассирования коммуникационных потоков. Применение разработанных методических средств позволит повысить потребительские и архитектурно-художественные качества зданий общественно-деловых центров, а также обеспечить их комфортность, коммерческую эффективность и эстетические характеристики деловой среды.

**Ключевые слова:** деловой центр, офисные здания, деловая среда, архитектурно-художественные решения, средства, приемы.

Архитектурная организация интерьерных пространств и художественная выразительность внешнего облика общественно-деловых, офисных и бизнес-центров является одним из ключей к формированию привлекательной и репрезентативной деловой среды крупных городов [1]. В то же время, несмотря на развитый арсенал средств пластической детализации современной архитектуры, большинство офисно-деловых зданий и комплексов носит достаточно сдержанный и прагматичный характер, ограничиваясь минималистичным внешним объемом, с модульным наполнением офисными пространствами. Либо в угоду рыночной ориентации деловой и архитектурно-строительной деятельности создается мнимый «имидж-образ» объекта недвижимости [2], привлекающий потенциальных покупателей и пользователей экстравагантным объемным решением, и зачастую достаточно оторванный от контекста и внутреннего функционально-планировочного решения самого офисного здания.

Интерьерные решения офисно-деловых пространств, сдаваемых в аренду, в основном ограничиваются модульной структурой плана, формируемой системой офисных перегородок, либо свободным размещением офисного оборудова-

ния в модульной сетке колонн каркаса [3, 4]. Приоритетным показателем эффективности деловой среды здесь выступает не столько дизайн офисно-делового пространства, сколько количество мест офисных работников и занимаемая площадь. В то же время, архитектурно-художественное решение деловых пространств должно быть ориентировано на создание ощущения сопричастности культуре компании, обеспечивать самоидентификацию фирмы, визуальное информирование, привлечение клиентов, создание эстетичной корпоративной среды, инициирующей работу [5, 6].

Качество формируемых образных, объемно-пространственных решений, узнаваемость фасадов и интерьеров делового и бизнес-центра будут во многом определяться его «классом» [7]. Наиболее престижные и дорогостоящие здания «А» класса, как правило, имеют самобытный архитектурно-художественный облик, диктуемый выигрышным месторасположением в историческом центре или административно-деловой зоне города, и нередко выступают своеобразными «визитными карточками» города; деловые здания «В» класса, находящиеся в менее престижных районах с фоновой застройкой и с ограниченным

количеством предлагаемых общественно-деловых функций должны носить скорее контекстуальный характер, поддерживая и развивая архитектурное окружение; в случае с «С» классом, который включает приспособленные под офисно-деловые функции исторические здания и реконструированные помещения, образ самого административно-делового здания уходит на второй план, уступая место изначальному статусу исторического объекта в городской среде.

Поскольку участки под застройку деловых центров, как правило, находятся на «въездах» в город, либо в его центральной части, большинство подобных средовых объектов являются высотными. Высотные здания с общественно-деловой функцией включают три типа: многофункциональные, специализированные, универсальные [8, 9]. Учитывая данное обстоятельство, внешний архитектурно-художественный облик высотных зданий может формироваться несколькими подходами.

Первый подход учитывает особенность высотных универсальных зданий, которые проектируются так, чтобы в последующем в процессе эксплуатации была возможность многочисленных перепланировок, в том числе с целью изменения функционального назначения помещений. В этом случае внутренняя планировка объекта не оказывает решающего значения для морфологии объема, что позволяет варьировать стилистику его образного решения и пластику фасада с включением трех аспектов детализации архитектурной формы: объем здания; архитектурные детали, фактура. Примерами многочисленных интерпретаций этих слагаемых выступают высотные объемы делового центра Москва-Сити: «Башня Эволюция», «Балчуг Плаза», «Башня Федерация» и др.

Второй подход связан с формированием облика высотных многофункциональных и специализированных зданий, которые включают в свой состав разнохарактерные функционально-планировочные компоненты. Характерное архитектурно-пластическое решение высотное специализированное здание приобретает в соответствии с «образом функции», становясь преимущественно: «жилым», «административным», «офисным» и т.п., в зависимости от того какой функционально-планировочный компонент занимает большую площадь по сравнению с другими.

В случае эквивалентного распределения площадей между несколькими функционально-планировочными элементами целесообразно формировать образ здания, построенный на использовании названия, которое будет состоять из двух слов, описывающих функцию, например, офисно-гостиничное здание; торгово-выставочное, офисно-банковское здание, конгресс-отель и

др. Собираемый образ делового здания (комплекса) в этом случае может строиться на следующих приемах сопоставления и взаимодействии двух пластических и функциональных основ: а) прием «последовательного развития» подразумевает тождественное взаимодействие двух и более композиционных тем в образе делового центра, которые развивают и дополняют друг друга в общей пластической «полифонии» комплекса; б) прием «комбинаторики», предусматривает «равновесное» чередование черт и пластических акцентов разных функциональных основ, без преимущества и очевидного доминирования одного из них; в) прием «позитивного контраста» позволяет формировать общую композицию комплекса на противопоставлении и «противоборстве» двух пластических «тональностей».

Третий подход в поиске индивидуальности архитектурного образа делового центра учитывает особенность включения в его состав различных функционально планировочных, объемных и инженерно-технических компонентов, которые становятся неожиданным и своеобразным «катализатором» его композиционного формообразования.

Функционально-планировочные и объемные компоненты делового здания можно условно разделить на: а) основные (офисные, общественные, жилые, производственные, банковские и др.); б) вспомогательные (торгово-сервисные: супермаркеты, магазины, рестораны, кафе, автостоянки; культурно-развлекательные; физкультурно-оздоровительные) и в) эксплуатационно-технические (диспетчерские, помещения служб эксплуатации, лестнично-лифтовые группы, эскалаторы, блоки инженерных коммуникаций и др.)

Учитывая данную классификацию, возможно применение следующих приемов архитектурно-художественной организации облика деловых центров и комплексов:

- прием сознательного встраивания или выделения элементов «основного производственного», «общественного» или «технического ядра» из объема офисного здания (делового комплекса) с целью создания выразительной композиции, отвечающей эстетическим потребностям потенциального пользователя деловой и бизнес-среды;

- сознательное акцентирование (объемное, декоративно-пластическое, цветовое) технических зон и коммуникаций делового центра - как образная трактовка и имиджевая «кодировка» его внешнего облика.

Третьим приемом выступает использование специфики контекста (перепадов рельефа, эмоционального фона исторической застройки и др.) и визуальная «интеграция» комплекса зданий, объемов и функционально планировочных бло-

ков делового центра с данным контекстом (природным ландшафтом, застройкой исторического центра, плотной жилой структурой).

Четвертый прием формообразования предполагает выстраивание вертикальной композиции здания делового центра с учетом его функционального зонирования. Вертикальные функциональные зоны выделяют по этажам высотной части и стилобата высотного здания. Их целесообразно располагать в следующей последовательности: а) стилобатная часть: общественные, в т.ч. зальные пространства, вспомогательные и эксплуатационно-технические помещения; б) высотная часть - помещения основного функционального назначения: нижние этажи – офисы, средние этажи – жилище для временного проживания, верхние этажи – жилище для постоянного проживания; также в верхней части высотного здания рекомендуется размещать: атриумы, зимние сады, холлы, спортивные залы, бассейны. Декоративно-пластическое и цветное зонирование вертикальной композиции делового центра может придать его объему индивидуальную выразительность. Если деловой центр представлен в виде нескольких сблокированных двух и более секций, объемов (возможно разной этажности, высотных и не высотных), композиция всего комплекса может строиться на распределении между ними акцентно-доминантных отношений и возможности использования в формообразовании функционального назначения блоков и сложной конфигурации их планировочных решений.

Другим самостоятельным направлением формирования привлекательной и репрезентативной деловой среды офисных и бизнес-центров является архитектурно-дизайнерская организация в них внутренних общественных и коллективных пространств. Образованию «коллективных» зон в объектах делового строительства способствует ряд факторов:

а) укрупняются параметры офисных структур, которые соединяются в «перетекающие» объемные комбинации и пространственные коммуникации с необходимым насыщением их общественными функциями;

б) возрастают требования собственников и пользователей деловых и бизнес-центров к оснащению общественных пространств – как своеобразной «визитной карточки» здания (комплекса);

в) модернизируется инженерно-техническое, выставочное, рекреационное, торговое оборудование деловой среды, формирующее самостоятельные очаги информационного обмена и общественной активности;

г) становится популярной концепция совместных «пользовательских» пространств офисных работников – как своеобразного «домашнего клуба».

Требование комплексной общественно-деловой и бизнес-среды, где необходимым компонентом выступает «общественное ядро», сосредотачивающее разного рода общественные, предпринимательские, коммерческие и эмоционально-художественные ценности и интересы, делает актуальным выявление архитектурно-дизайнерских средств и приемов формирования такой «коллективной среды».

Изучение теоретических источников и практики современного проектирования объектов деловой среды крупных городов позволило выявить следующие формы «коллективных зон» в общественно-деловых центрах и комплексах:

1) зоны коммуникаций – пронизывающие деловую, офисную, зрелищно-выставочную, торговую и рекреационную структуру бизнес-центров, ее тела и объемы (инженерные сети, наклонные, горизонтальные и вертикальные пространственные коммуникации);

2) пространства «общего пользования» – места бытового общения и рекреационные зоны, озелененные пространства, атриумы, холлы, зимние сады, блоки повседневного обслуживания, спортивно-оздоровительные зоны, зоны общения и развлечения (клубные помещения, игровые зоны);

3) технические, хозяйственные и парковочные зоны;

4) сервисная зона (прачечные, химчистка, кафе, бары, отделения банка).

Учитывая данную классификацию, возможно применение следующих приемов архитектурно-пространственной организации общественных зон в среде деловых центров и комплексов:

- композиционно-образное акцентирование стилизованного «общественного стилобата» делового центра для организации открытых общественных пространств – рекреационных зон, спортивных площадок, клубных помещений, зрелищных зальных пространств и др.;

- сценарное моделирование и функционально-художественная организация внутренних общественных пространств делового центра по интерьерной оси: «входная зона (вестибюль) – холл первого этажа – лестнично-лифтовой блок – межофисные рекреационные зоны», создающей своеобразные тематические зоны и «визуальный сценарий» внутриофисного движения и общения;

- нетрадиционное трассирование коммуникационных потоков и создание перетекающих коллективных пространств, «деформирующих» привычные объемные схемы основного офисно-делового здания, с включением внешних лифтов, открытых коммуникаций-переходов, «обитаемых мостов», эксплуатируемых крыш высотных зданий со смотровыми площадками и др.

Таким образом, применение обозначенных приемов позволит повысить потребительские и архитектурно-художественные качества объектов общественно-деловых и бизнес-центров, определяющие комфортность всех элементов деловой среды и коммерческую оправданность строительства.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гельфонд А.Л. Деловой центр как новый тип общественного здания. Монография // Н. Новгород: Изд-во ННГАСУ. 2012. 130 с.
2. Есаулов Г.В. Образ или имидж? О специфике изучения архитектуры новейшего времени. В кн.: Эстетика архитектуры и дизайна: Материалы Всероссийской научно-практической конференции (4-6 октября 2010 г.) // Сб. статей. М.: Архитектура-С. 2010. С. 267.
3. Актуальные офисные проекты [Электронный ресурс]. // Источник: Недвижимость и цены. Элитная недвижимость Санкт-Петербурга. 26.09.2006. Режим доступа: <http://vipflat.ru/news/66633/> (дата обращения: 02.03.2019)
4. Вартапетова Н.Е. Архитектурно-планировочные принципы организации офисных объектов: диссертация кандидата архитектуры: 05.23.21 // Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности. Москва. 2010. 168 с.
5. Муратов А. Станет ли офис лучше? // Проект Россия. 2006. № 4 (42). С. 48–50.
6. Каясов А.А. Перспективы развития деловых центров в российских регионах // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2011. №4. С. 16–20.
7. Каясов А.А. Архитектурно-планировочные принципы формирования регионального делового центра в структуре крупнейшего постсоветского нестоличного города (на примере города Самары) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Том. 14. № 2 (3). 2012. С. 822–826.
8. Борисова В.Г. Бизнес-центр как многофункциональное общественное здание // Успехи современного естествознания. 2004. № 12. С. 110–110. Режим доступа: <http://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=13854> (дата обращения: 26.06.2019)
9. Боженко И.А. Тенденции развития полифункциональных общественных центров в мегаполисах // Стройкомплекс Среднего Урала. Екатеринбург. 2008. № 7–8 (120). С. 28–33.

#### Информация об авторах

**Федоров Алексей Михайлович**, магистрант кафедры архитектурного и средового проектирования. E-mail: [akofur@aaanet.ru](mailto:akofur@aaanet.ru). Южный Федеральный Университет. Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/45.

**Скопинцев Анатолий Вениаминович**, кандидат архитектурных наук, профессор кафедры архитектурного и средового проектирования. E-mail: [scoparh@yandex.ru](mailto:scoparh@yandex.ru). Южный Федеральный Университет. Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/45.

Поступила в апреле 2019 г.

© Федоров Ф.М., Скопинцев А.В., 2019

**\*Fedorov A.M., Skopintsev A.V.**

South Federal University

Russia, 344006, Rostov on Don, Bolshaya Sadovaya st., 105/45

E-mail: [akofur@aaanet.ru](mailto:akofur@aaanet.ru)

### MEANS OF FORMING ARCHITECTURAL AND ARTISTIC EXPRESSION OF MODERN PUBLIC-BUSINESS CENTERS

**Abstract.** The article describes the features of the organization of expressive architectural and artistic decisions of the exterior and interior spaces of business centers. Various approaches to the aesthetic formation of the business environment are proposed, based on the specifics of the town-planning location, class, and functional-typological classification of buildings of business centers. A number of composite tools for constructing the architectural appearance for three types of high-rise buildings of social and business centers are presented: multifunctional, specialized and universal. These means include: a) receiving form detail at the level of the building volume, architectural details, texture; b) the methods of combining the “architectural themes” of various functional planning, volumetric, and engineering technical components of the business center, including their consistent development, combinatorics, positive contrast, conscious emphasis and integration with the context; c) methods of identifying the high-altitude composition of a business building based on its vertical zoning. An arsenal of tools and techniques for designing an aesthetically appealing

*internal environment and comfortable interior spaces of business and office buildings has been developed. These techniques are based on enhancing the business environment by including internal public and collective spaces, by identifying and emphasizing communication areas and technical devices, scenario modeling of office-business and communication spaces, non-traditional tracing of communication flows. The application of the developed methodological tools will improve consumer and architectural and artistic qualities of buildings of public business centers, as well as ensure their comfort, commercial efficiency and aesthetic characteristics of the business environment.*

**Keywords:** *business center, office buildings, business environment, architectural and artistic solutions, facilities, methods.*

## REFERENCES

1. Gelfond A.L. Business center as a new type of public building [Delovoy tsentr kak novy tip obshchestvennogo zdania]. N. Novgorod: Publishing house NNGASU. 2012. 130 p. (rus)
2. Esaulov G.V. Image or appearance? On the specifics of studying the architecture of modern times. [Obraz ili imidzh? O specifike izucheniya arhitektury novejshego vremeni] In: The Aesthetics of Architecture and Design: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference (October 4-6, 2010). Collected articles. Moscow: Architecture-C. 2010. 267 p. (rus)
3. Current office projects. Source: Real Estate and Prices. Luxury Real Estate in St. Petersburg. 26.09.2006. Access mode: [\(http://vipflat.ru/news/66633/\(application date: 02.03.2019\)\)](http://vipflat.ru/news/66633/(application date: 02.03.2019)) (rus)
4. Vartapetova N.E. Architectural and planning principles of office buildings organization: diss. Cand. architecture: 05.23.21 [Arkhitekturno-planirovochnye printsipi organizatsii ofitsnykh ob'ektov: dissertatsiya kandidata arhitektury: 05.23.21]. Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity. Moscow. 2010. 168 p. (rus)
5. Muratov A. Will the office become better? [Stanet li ofis luchshe]. Project Russia. 2006. No. 4 (42). Pp. 48–50. (rus)
6. Kayasov A.A. Prospects for the development of business centers in the Russian regions [Perspektivy razvitiya delovykh tsentrov v Rossiyskikh regionakh]. Bulletin of the State Statistical Service of the State Statistical Service of Ukraine. Urban planning and architecture. 2011. No. 4. Pp. 16–20. (rus)
7. Kayasov A.A. Architectural and planning principles for the formation of a regional business center in the structure of the largest post-Soviet non-capital city (on the example of the city of Samara) [Arkhitekturno-planirovochnye printsipi formirovaniya regionalnogo delovogo tsentra v strukture krupneishogo postsovetского nestolichnogo goroda (na primere goroda Samary)]. News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Vol. 14. No. 2 (3). 2012. Pp. 822–826. (rus)
8. Borisova V.G. Business center as a multifunctional public building [Biznes-tsentr kak mnogofunktsionalnoye obshchestvennoye zdaniye]. Successes of Modern Natural Science. 2004. No. 12. Pp. 110–110. URL: <http://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=13854> (appeal date: 06.26.2019). (rus)
9. Bozhenko I.A. Trends in the development of multifunctional public centers in megalopolises [Tendentsii razvitiya polifunktsionalnykh obshchestvennykh tsentrov v megapolisakh]. Stroykompleks of the Middle Urals. Yekaterinburg. 2008. № 7–8 (120). Pp. 28–33. (rus)

## Information about the authors

**Fedorov, Alexei M.** Master student. E-mail: [akofur@aanet.ru](mailto:akofur@aanet.ru). South Federal University. Russia, 344006, Rostov on Don, Bolshaya Sadovaya st., 105/45.

**Skopintsev, Anatoliy V.** PhD, Professor. E-mail: [scoparh@yandex.ru](mailto:scoparh@yandex.ru). South Federal University. Russia, 344006, Rostov on Don, Bolshaya Sadovaya st., 105/45.

*Received in April 2019*

## Для цитирования:

Федоров А.М., Скопинцев А.В. Средства формирования архитектурно-художественной выразительности современных общественно-деловых центров // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 79–83. DOI: 10.34031/article\_5da45cbf87b591.41469254

## For citation:

Fedorov A.M., Skopintsev A.V. Means of forming architectural and artistic expression of modern public-business centers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 9. Pp. 79–83. DOI: 10.34031/article\_5da45cbf87b591.41469254

DOI: 10.34031/article\_5da45e34ccd777.01848919

\*Абасс Х.С.

Южный Федеральный Университет. Академия архитектуры и искусств

Россия, 344000, Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 105/42

\*E-mail: arch.hebaabbas@hotmail.com

## ПРЕДПОСЫЛКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЕВРОПЕЙСКИХ ТЕНДЕНЦИЙ В АРХИТЕКТУРЕ ДАМАСКА ПЕРИОДА ФРАНЦУЗСКОГО МАНДАТА

**Аннотация.** Статья посвящена изучению основных условий распространения европейских тенденций в архитектуре Дамаска во времена Французского Мандата, которые повлияли на традиционную архитектуру и методы проектирования в городе Дамаске в этот период. В статье также рассмотрены функционально-планировочные, архитектурно-художественные и конструктивно-технические особенности жилых и общественных зданий, которые были построены в соответствии с французскими инженерными стандартами в течение Мандатного периода.

Особое внимание уделяется административным аспектам организации архитектурно-строительных мероприятий и изменениям законодательства в период действия Французского Мандата.

Основные мероприятия рассматриваются в области архитектуры и строительства, осуществляемые французскими властями периода Мандата, существует серьезное культурное воздействие Франции на мандатные страны, сначала четко определены в области архитектуры. Наиболее заметные градостроительные мероприятия, связанные с изменениями в исторической градостроительной системе, отражены в традициях европейских принципов градостроительства. Новые архитектурные формы появляются благодаря сочетанию местных традиций и французских архитектурных тенденций.

Целью данной статьи является выявление основных предпосылок и архитектурных особенностей Европы, которые повлияли на традиционную архитектуру Дамаска во время французского мандата.

**Ключевые слова:** политики вестернизации, политические факторы, экономические факторы, социальные факторы, административные аспекты, архитектура Дамаска периода Французского Мандата.

**Введение.** В начале двадцатого века синтез архитектуры разных стран становится растущей тенденцией среди сирийских и европейских архитекторов. Так что во время Мандата кульминация политики вестернизации архитектуры конца девятнадцатого века выявила некоторые противоречия. В то же время западные и другие конструкции в западном стиле становятся неисчерпаемым источником идеологического и художественного вдохновения, а Запад – теоретическим руководством и источником необходимых технических знаний.

Европейские архитекторы и инженеры, работающие в Дамаске, представляли средства, которые превратили вестернизацию в движение «радикализации». Таким образом, на рубеже первой половины двадцатого века архитектурно-строительная практика Дамаска была разделена на две основные части: западная и местная тенденции. У каждого есть свои пионеры, свой стиль и своя интеллектуальная основа [1].

**Методология.** Основой данной работы стали проведенные автором натурные и архивные исследования произведений архитектуры Дамаска в периоде Французского Мандата. При проведении исследования использовался метод

сравнительного анализа произведений архитектуры Дамаска и в периоде Французского Мандата.

**Степень разработанности темы.** История архитектуры Дамаска от момента образования в 12 веке до н.э. до 19 века н.э. рассмотрена в трудах целого ряда исследователей, как в Сирии, так и за ее пределами. Среди них следует отметить: С. Абдулас, М. Аль-Азхари, Н. Аль-Мунаджид, А.Аль-Бахнаси, К.М. Базили, С. Валтир, А. Наdif, К. Шихаби, М.Зейн Аль Бадин, Г. Хальбуни. Однако архитектура Дамаска периода Французского Мандата изучена недостаточно. Это важный период в истории сирийской архитектуры, когда отмечается зарождение новых тенденций на стыке традиционной и европейской архитектуры, нуждается в детальном рассмотрении и осмыслении.

**Основная часть.** Основными предпосылками распространения европейских тенденций в архитектуре Дамаска периода Французского мандата были: изменение законодательства, социально-экономические условия, политические события, административные мероприятия, религиозные и культурные факторы, транспорт и планирование факторы, внутрипрофессиональные факторы, технические и художественные разработки [1].



**Изменение законодательства.** Реформы, проведенные Францией в Сирии, были, по сути, частью двойной заботы о модернизации и рационализации, основанной на западных принципах городского управления, определяемой экономическими интересами. Но во многих отношениях французские реформы только усилили обширное движение регуляторных и административных реформ, которое османы начали с середины девятнадцатого века, известного как танзимат, целью которого было построение системы по западным стандартам, часто по французским.

Французы продолжили процесс административных и законодательных реформ или вносили новые позиции в сирийское законодательство в соответствии с их новыми целями. Реформы велись в пяти направлениях: кадастр и переопределение статуса собственности на землю; статус вакуф, имущества, которым в основном управляют благочестивые фонды; экспроприация; налог на застройку и разрешение на строительство [1].

Что касается владения землей, то эти реформы были направлены на унификацию различных земельных статусов, чтобы гарантировать безопасность собственности, разрешить экономическое развитие. Кроме того, делая возможной ипотеку, а значит, кредит, эта политика позволила рассмотреть инвестиционную политику, основанную на банковских кредитах. Благодаря индивидуализации собственности налоговая база также стала более четкой. Инструментом, служащим этим преобразованиям, стал новый кадастр, вдохновленный первоначально британской системой Закона Торренса, который был внедрен в нескольких французских колониях и известен как земельная книга. Одним из его других последствий было разъяснение понятия общественного достояния, которое также создавало права и, следовательно, доходы для государства (которые включали положения, уже присутствующие в османском законодательстве 1883 года). Реформа вакуф вызывала внимание, так как этот вид собственности обладал значительным экономическим потенциалом, особенно в городе, где по праву вакуф владели и управляли многочисленными объектами недвижимости, жилыми зданиями и различными службами. Но в этой области были ограниченные возможности для маневра французских реформаторов, что позволило им внести лишь минимальные коррективы, и этот вид собственности претерпел мало изменений [1].

Параллельно с этими реформами, в основном относящимися к земельному законодательству, мандатная администрация провела другие законодательные изменения, призванные обеспе-

чить лучший контроль над урбанизацией. Введение разрешения на строительство в 1928 году, постепенно расширяемого и преобразованного в разрешение на строительство в 1930 году, стало существенным нововведением. Этот новый регламент был логическим результатом попыток решения основных проблем городского устройства - реконструкции центра, расширение города, систематизация городского планирования. Кроме того, были отозваны османские положения, касающиеся экспроприации, а затем их объект расширился в 1932 году с учетом общественной пользы по гигиеническим причинам, разрешившей экспроприацию по зонам. В результате этих реформ цели администрации распространились на несколько позиций, основной из которых является городское планирование. Однако эти постепенные изменения трансформировали возможности городского вмешательства. Они также были объединены с распределением функций между различными государственными субъектами для определения новых рамок городского развития [1].

**Политические факторы.** 15 сентября 1919 года англичане и французы, собравшиеся на Версальской конференции, договорились о входе Франции в Сирию, а в 1920 году французы взяли под контроль Сирию и контролировали все государственные объекты. Кроме того, школы и институты были полны учителей для преподавания французского языка, который приобрел статус официального языка. Вместе с этим административные расходы сирийского народа увеличились за счет увеличения налогов. В то же время правительство не было признано, а сирийская конституция не была реализована. Новая административная система была представлена следующими министерствами: Министерство юстиции, Министерство финансов, Министерство образования, Министерство общественных работ и сельского хозяйства, а также Генеральный секретариат, который временно руководит текущей работой в Министерстве внутренних дел [2].

В 1931 году Верховный комиссар издал указ об упразднении национального правительства в Дамаске, назначив своего представителя в сирийском государстве главой нового правительства и предоставив себе полномочия, предоставленные президенту Республики при проведении выборов, что означало обеспечение победы его сторонников в парламенте. (рис.1).

Армия была демобилизована властями мандата и сформировала армию сирийских и несирийских солдат из французских колоний и французского командования.

Самое наглядное влияние на архитектурно-строительную практику Дамаска эти реформы

оказали в первую очередь в плане строительства новых правительственных зданий и министерств, а также приспособления целого ряда монументальных зданий к новой административной функции (Министерство связи и технологий и некоторые правительственные здания) [2].

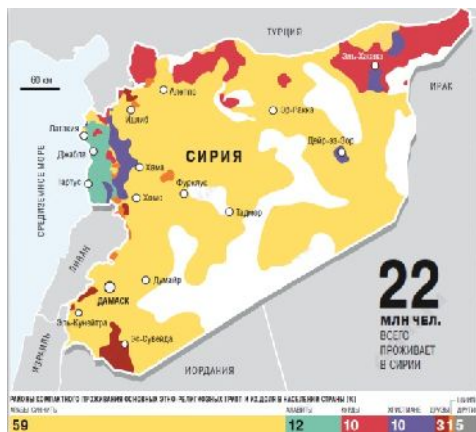


Рис. 1. Этно-религиозная карта Сирии

**Экономические факторы.** С началом Первой мировой войны сирийская промышленность получила сильный удар, связанный с потерей рабочей силы и иностранного рынка, отсутствием покупательной способности среди населения и разрушением ресурсов. Даже шелковая промышленность, которой славился Дамаск, значительно упала. После окончания Первой мировой войны и введения Французского Мандата в отношении Сирии страна была ограничена в узких экономических рамках, закрыты жизненно важные сферы торговли и предпринята попытка компенсации экономических потерь силами сельского хозяйства. Тем не менее, рост населения, высокий уровень жизни в городах и отсутствие новых методов ведения сельского хозяйства подтолкнули людей к промышленной работе, возникли некоторые новые отрасли промышленности. Становление современного производства было связано с распространением машин в 1928 году, чему способствовали власти. Было принято решение оборудовать для промышленного производства освободить от таможенных пошлин, после чего было принято решение ввести высокие таможенные пошлины на иностранные товары, что заставило эти отрасли удовлетворить основные потребности страны.

В течение мандатного периода страна испытывала наибольшую потребность в оживлении экономической ситуации. Экономическая программа правительства направлена на снижение налогов и облегчение экспорта сирийских продуктов на французские рынки без уплаты таможенных пошлин. Экономическая деятельность была ограничена по нескольким причинам – несамостоятельность экономики Сирии, связь которой с французской экономикой в первую очередь

была направлена на удовлетворение интересов Франции, отсутствие в Сирии торгового порта и др. Торговый обмен осуществлялся через порт Бейрута. Все офисы агентств и коммерческих компаний собрались там. Банк Сирии и Ливана монополизировал выпуск сирийской валюты. Валюта была выпущена на имя Банка Сирии и Ливана на французском и арабском языках. Правительство Мандата строило дороги на окраинах городов и расширяло железнодорожные линии не только из соображений развития торговли, но и по военным причинам. Одновременно правительство расширяло военные здания, не обращая внимания на расширение таможенной деятельности, что давало возможность идти в ногу с соседними странами [2].

Администрация Мандата стремилась обеспечить требования страны унифицировать городские проекты, нацеленные на смягчение экономического кризиса. Разрушение экономической жизни сильно повлияло на местную архитектуру с точки зрения затрат, выделяемых для реализации зданий, сооружений и городских проектов. Отмечаются перемены в пространственной организации города, которые выявили новые экономические тенденции. Так, в городе и окрестностях появились локальные рынки, предназначенные для местных религиозных и этнических меньшинств, в том числе для курдов вдоль дороги и для христиан в Баб Тоуме [2] (рис. 2).

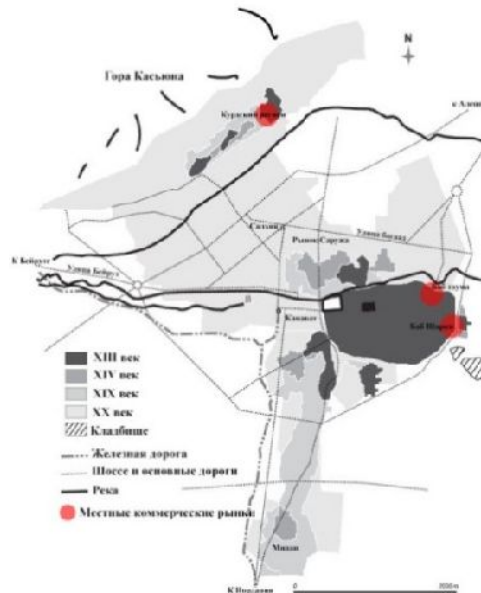


Рис. 2. Места для размещения местных коммерческих рынков. Источник: Из архива Французского Центра Ближнего Востока в Дамаске (IFPO) (Под редакцией исследователя)

**Социальные факторы.** Изменения в социальных аспектах:

- Проявления средневекового общественного уклада продолжал преобладать в жизни дамасских народов вплоть до начала двадцатого

столетия. После двух мировых войн оно претерпело большие успехи, и возможно, важные переменные, которые имели место в положении женщин в сирийском обществе, и коренные изменения, которые произошли в их образе жизни и образе жизни, оказали самое глубокое влияние на изменение модели дома в Дамаске в соответствии с этим естественным развитием [3].

- Изменение социальной структуры семьи жителей Дамаска и ее отражение в архитектуре жилого дома. Архитектурно-планировочное решение сирийского дома сложилось в прошлом с целью объединить все ветви и поколения одной семьи под одной крышей. Семья изменилась и имела тенденцию к изоляционизму. Дом все больше соответствовал потребностям молодежи и их представлениям о семье.

- Культурное и социальное положение людей изменилось, и выросло число интеллектуалов

и выпускников университетов, которые учились в западных странах и их влияние на распространение западных интеллектуальных и культурных тенденций.

- Диаспоры европейцев, компактно проживавших в Дамаске, были не многочисленны, но очень влиятельны из-за их богатства и сплоченности в дополнение к их социальному и культурному влиянию. Сразу же начинается формирование зон компактного проживания французского населения в западном стиле в соответствии с западными обычаями и традициями жителей этих районов. Это большие окна и зеленые насаждения между зданиями.

- Тенденция к подражанию Западу.

- Высокая плотность населения из-за естественного прироста населения.

- Появление особых зон компактного проживания [3] (рис. 3–4).

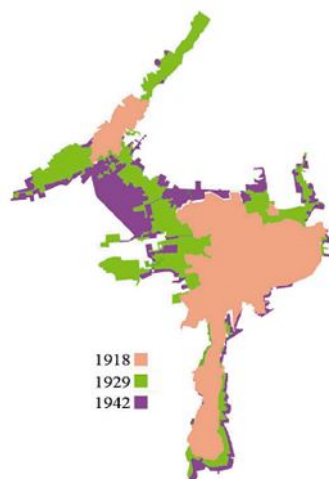


Рис. 3. Расширение Дамаска между 1918–1942 гг.

(Подготовлено исследователем)

**Административные аспекты.** С введением Французского Мандата изменилась система административного устройства Сирии. Государственные учреждения и институты были реформированы в соответствии с европейской моделью. Были внедрены такие институты, как таким как муниципалитет, который расширил свои полномочия постепенно. Эти новые учреждения первоначально размещали в существующих зданиях Дамаска, адаптированных для новой функции. Затем административные здания были расширены в начале Французского Мандата в 1920 году, чтобы занять большую часть османских зданий, которые стали их собственностью после окончания османской эпохи. Преимущественно в начале Французского Мандата в 1920 году, для размещения новых административных функций были задействованы некоторые османские здания, которые стали их собственностью после окончания османской эпохи [4].

Две организации, созданные в 1921 году,

### Площадь в гектарах

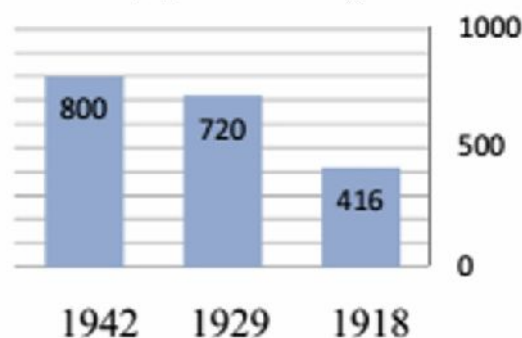


Рис. 4. Развитие области Дамаска между 1918–1942 гг. (Подготовлено исследователем)

должны были сыграть заметную роль в вопросах городского планирования: *Земельный кадастр и Департамент общественных работ*. Первый, под руководством инженера Камиля Дуррафурда, управляющего кадастром Сирии и Ливана, обеспечил регистрацию объектов недвижимости во вновь созданном кадастре. С разделом по топографии Совет разработал, в частности, перечисленные планы исследований по городскому планированию и расширению.

**Департамент общественных работ**, созданный под руководством Управления Верховного комиссара, также призван играть жизненно важную роль в вопросах городского планирования через несколько своих отделений. Управление автомобильных дорог и мостов отвечало за разработку правил дорожного движения и работу на дорогах. Он был по определению вовлечен в городское планирование. Отдел общественных работ также занимался вопросами гигиены, трам-

ваев и электричества. Он должен был сотрудничать с отделом древностей и убедиться в его согласии. Муниципальный технический офис, основанный в середине 30-х годов в Министерстве внутренних дел, также отвечал за расширение муниципалитетов страны [4].

**Религиозные и культурные факторы.** Повлиявшие на динамику изменений традиционного жилого дома, были следующими: строится много новых мечетей, правительственных зданий, дворцов, школ, бань, больниц, клубов, даже кинотеатров и других зданий. Строительство и планировка культовых сооружений напрямую связана с религиозными законами, в соответствии направления частей света, помещение для молитв всегда ориентировано на юг, в направлении Мекки, священного города всех мусульман. Михраб (место для молитв) расположено всегда в южной части помещения (рис. 5). Культовая и дворцовая архитектура Сирии в составе Османской империи приобрела черты турецкого зодчества. Наиболее ответственные постройки возводились по проектам турецких (османских) архитекторов (например, архитектор Сенан, построивший культовый и благотворительный комплекс - такие Сулеймание в Дамаске). Фасады зданий облицованы контрастными рядами черного и белого (или желтоватого) камня в стиле аль-абляк. Интерьеры дворцов и богатых жилых домов становятся все более нарядными. Фасады зданий османского периода облицованы также контрастными рядами цветного камня и расписаны в стиле аль-ажеми. Ислам был против настенной живописи, запрещалось изображение человека, использовался геометрический орнамент [4].

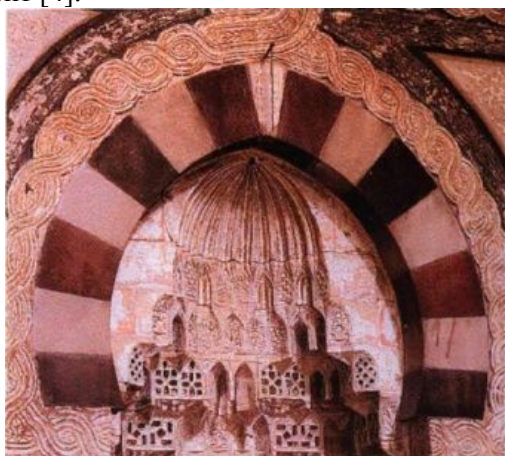


Рис. 5. «Михраб» место для молитв в доме Чирази

В конце XIX в. этот архитектурный язык меняется, богатые торговцы хотели перенести величие Европы в Дамаск, хотели изменить уклад своей жизни, своеобразный протест правящему классу, а в свою очередь, этим хотели удивить посетителей. Меняется значение входной

зоны здания - она становится более помпезной, богато украшается. Не было ни одного сантиметра свободного на стенах дамасских домов, вся плоскость стены покрывалась фресковой живописью, которую производили поверх цветной каменной кладки, покрытой слоем штукатурки. Тематами таких настенных панно были: растительный орнамент, обрамляющий картины с природными и архитектурными пейзажами. В художественном оформлении зданий происходила своего рода борьба противоречий, своеобразная «эkleктика с барочными формами». В жилых постройках этого периода появляются новые помещения: столовые комнаты и библиотеки [4].

#### **Факторы транспорта и планирования.**

Развитие транспорта и появление автомобиля привело к необходимости расширения улиц и более регулярному планированию города и увеличению возможности размещения жилья в других, более удаленных районах.

Некоторые дороги были открыты из-за особых потребностей, в первую очередь военных. Расширение города привело к необходимости больших широких улиц, и период Французского Мандата требовал создавать дороги по военным причинам.

Перегруженность Дамаска населением, расширение территории города и необходимость объединения Дамаска с его пригородами привели к увеличению общественного транспорта. Так, трамвай впервые появился в 1905 году. Линии общественного транспорта стали еще одним элементом городского каркаса, с особыми требованиями.

В 1936 году мандатные органы поручили Французскому управлению архитектуры и градостроительства в сотрудничестве с архитектором Мишелем Эхосаром организовать план расширения для города Дамаск [5].

**Внутрипрофессиональные факторы.** Первым условием формирования новой архитектуры Дамаска стало становление собственной архитектурной школы, становление профессии «архитектор», «инженер» (изменение статуса архитектора в обществе).

Отмечается также связь с французской архитектурной школой: обучение во Франции (Европе), работа французских архитекторов, работа сирийских мастеров в качестве помощников у французских архитекторов, распространение европейской специальной литературы, представители Сирии на съездах зодчих, развитие теории архитектуры.

В период Французского Мандата отмечается также изменение структуры заказчика. Важным становится расширение круга европейцев среди заказчиков, а также мандатной администрации



как заказчика административных и ряда общественных зданий.

Оказало влияние на профессиональную деятельность принятия ряда законов, связанных с архитектурной деятельностью (градостроительный кодекс и т.д.).

Влияние европейской архитектурно-строительной практики сказалось на распространении новых технологических возможностей строительства (новые конструкции, строительные материалы) [5].

**Технические и художественные разработки.** Разработка материалов, используемых в строительстве, и появление бетона, который изменил традиционные архитектурные формы, создал условия распространения эстетики простых, больших и гладких поверхностей.

Развитие строительных материалов и освоение новых конструктивных систем способствовало росту этажности зданий и требовало новых для Дамаска композиционных решений. Кроме того, это способствовало распространению таких технических приспособлений, как лифт, который преимущественно на раннем этапе распространен в правительственных зданиях. Не малую роль сыграло развитие системы водопровода и водоотведения – доставка воды на верхние этажи зданий. Для снабжения города водой создавались специальные водохранилища [5]. Новые технологии, выразившиеся в архитектуре зданий, связаны с внедрением строительных материалов, отличных от традиционных. Законодательно определялся образ новой застройки Дамаска. Были приняты два муниципальных подзаконных акта – запрет на строительство из самана, кирпича-сырца, из дерева и глины; регламент о планировании земельного участка и наличия дополнительных пристроек к основному зданию.

В стилистике сирийских зданий 1910–1950 годов проявил себя международный стиль, арт-деко, которые соединившись с местной традицией создали "сирийский стиль". В этой стилистической новинке традиционное

строительство из дерева и глиняного кирпича-сырца утратило свое место, не соответствуя взгляду архитекторов на новые престижные постройки столицы. Камень широко использовался. В течение 1920-х годов широко распространился камень, а также железобетон, который был лучше всего приспособлен к техническим и эстетическим требованиям новых конструкций и художественных образов. Открытие и расширение цементного завода в Чакке в Ливане и Думаре в Сирии с конца 1920-х до конца 1930-х годов, вероятно, имели решающие последствия [5].

Подготовка новых поколений специалистов из числа коренных народов является одной из заявленных целей Мандата. И все же их влияние на модернизацию сирийских городов является решающим в области градостроительства, и в меньшей степени в области архитектуры зданий. Это менее заметно в частном строительстве, чем в государственном секторе.

Многие европейские архитекторы работали в Дамаске. Их привлекала финансовая выгода, возможности экспериментирования в архитектурных проектах с привлечением научно-технических, археологических или художественных возможностей, а также стремление лучше узнать особенности культуры Востока [6]. Их участие в проектной деятельности восточных стран может быть разделена на четыре основных сектора. Первое – это работа, связанная с проектированием зданий высших учебных заведений. Второе – это конкурсы архитектурного дизайнерского проектного решения уникальных крупных общественных зданий. Третье – работа по заказу крупных частных компаний, которые участвовали в модернизации страны: железнодорожная компания Дамаск-Хауран, Генеральный совет железных дорог и общественных работ, Компания гидравлических работ и предприятия общего профиля и др. Наконец, четвертый сектор – это рынок частного строительства, часто в интересах правящего класса и богатых представителей сирийского общества (рис. 6).

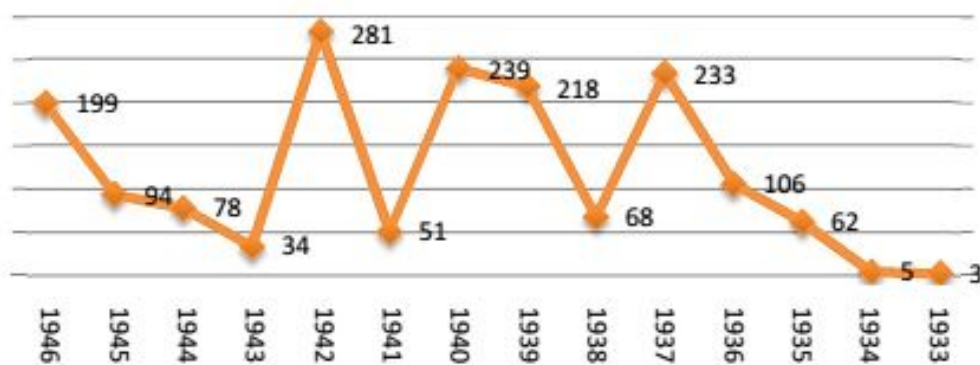


Рис. 6. Рост объемов строительства

Диаграмма, показывающая разницу в количестве разрешений на строительство в течение французского мандата (Подготовлена исследователем)

**Выводы.** В заключение можно отметить, что с середины девятнадцатого века архитектура Дамаска изменилась из-за влияния Стамбула, когда наряду с традиционными формами проявляются новые тенденции в области проектирования городского пространства и формирования архитектурных образов.

Расширение города продолжалось после введения Французского Мандата. Появились новые районы, сопровождаемые миграциями, ростом населения и развитием транспорта, систем водоснабжения и совершенствованием строительных технологий, систем и строительных материалов [7]. Новые районы, ставшие продуктом расширения города, находились под влиянием европейских моделей с широкими улицами, многоэтажными зданиями и открытыми пространствами. Новые технологические аспекты оказали отчасти влияние и на стилистику и архитектурно-художественный образ зданий.

Французский Мандат стал новым политическим этапом, который принес с собой множество изменений, которые привело к появлению новой архитектуры, включающей тенденции европейской и местной архитектуры.

*Поступила в августе 2019 г.*

© Абасс Х.С., 2019

*Информация об авторах*

**Абасс Хиба Саад**, аспирант кафедры теории и истории архитектуры, реставрации и реконструкции историко-архитектурного наследия. E-mail: arch.hebbaabbas@hotmail.com. Южный федеральный университет. Россия, 344000, Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 105/42.

**\*Abass H.S**

*Southern Federal University. Academy of Architecture and Arts  
Russia, Bolshaya Sadovayast., 105/42, Rostov-on-Don*

*\*E-mail: arch.hebaabbas@hotmail.com*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kakhali S. Damascus House between Ancient and Modern, Damascus Historical and Archaeological Studies // Directorate General of Antiquities and Museums. Damascus, 1980. 25 p.
2. Bianchi A.M. The Expansion of Damascus in the Twentieth Century // Journal of Arab Heritage. Damascus. 1995. 218 p.
3. Shehabi Q. Damascus History and photos. Al-Nouri Foundation for Printing and Publishing. Damascus, 1990. 150 p.
4. Khair S. Damascus City. M.: Ministry of Culture. Damascus, 1969. 75 p.
5. Rihaoui Ar. Damascus City Heritage and Historical Sites. Damascus, 1969. 102 p.
6. Pascual J. Damascus mid-nineteenth century and its structure and functions. Directorate General of Antiquities and Museums. Damascus, 1980. 35–47 p.
7. Zine El A.M. Development and revival of urban fabric of traditional city centers. Heritage Foundation. Riyadh, Saudi Arabia, 2004. 17 p.

## ACKGROUND OF THE DISTRIBUTION OF EUROPEAN TRENDS IN ARCHITECTURE OF DAMASK DURING THE FRENCH MANDATE

**Abstract.** The article is devoted to the influence of European architectural traditions and design methods on traditional architecture in the Mediterranean countries during the French Mandate and the study of the functional, architectural and artistic features of residential and public buildings, built in accordance with the criteria of Damask architecture in the French Mandate period. Particular attention is paid to the administrative aspects of the organization of architectural and construction activities and changes in legislation during the French Mandate. The main activities in the field of architecture and construction, carried out by the French mandate authorities, from the repair of roads, the creation of schools and public health institutes to the construction of relevant public buildings, are considered. Together with the administrative and managerial changes, there is a serious cultural influence of France on the countries of Mandate, first of all clearly identified in the field of architecture. The most clearly manifested activities in the field of urban development associated with changes in the planning system of historical cities on the basis of imitation of the European principles of urban planning. New architectural forms emerge due to the synthesis of local traditions and trends of French architecture. The purpose of this article is to identify the European influence and architectural features of Damask during the French Mandate period.

**Keywords:** policy of westernization, political factors, economical factors, social factors, administrative aspects, architecture of Damask during the French Mandate.



## REFERENCES

1. Kakhali S. Damascus House between Ancient and Modern, Damascus Historical and Archaeological Studies. Directorate General of Antiquities and Museums. Damascus, 1980. 25 p.
2. Bianchi A.M. The Expansion of Damascus in the Twentieth Century. Journal of Arab Heritage. Damascus. 1995. 218 p.
3. Shehabi Q. Damascus History and photos. M.: Al-Nouri Foundation for Printing and Publishing. Damascus, 1990. 150 p.
4. Khair S. Damascus City. Ministry of Culture. Damascus, 1969. 75 p.
5. Rihaoui Ar. Damascus City Heritage and Historical Sites. Damascus, 1969. 102 p.
6. Pascual Jean. Damascus mid-nineteenth century and its structure and functions. Directorate General of Antiquities and Museums. Damascus, 1980. 35–47 p.
7. Zine El A.M. Development and revival of urban fabric of traditional city centers. Heritage Foundation. Riyadh, Saudi Arabia, 2004. 17 p.

*Information about the authors*

**Abass, Hiba S.** Postgraduate student. E-mail: olga.koalchenko@mail.ru. Southern Federal University. Russia, 34406, Rostov-on-Don, str. Bolshaya Sadovaya, 105/42.

---

*Received in August 2019*

**Для цитирования:**

Абасс Х.С. Предпосылки распространения европейских тенденций в архитектуре Дамаска периода французского мандата // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №9. С. 84–91. DOI: 10.34031/article\_5da45e34ccd777.01848919

**For citation:**

Abass H.S. Ackground of the distribution of European trends in architecture of damask during the french mandate. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukho., 2019. No. 9. Pp. 84–91. DOI: 10.34031/article\_5da45e34ccd777.01848919

# ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/article\_5da45f0ea7bd13.91970783

<sup>1,\*</sup>Куделин Д.В., <sup>2</sup>Несиоловская Т.Н., <sup>2</sup>Ветошкин А.Б.<sup>1</sup>ООО «Научно-технический центр «Интайр»

Россия, 150003, Ярославль, ул. Советская, д. 81

<sup>2</sup>Ярославский государственный технический университет

Россия, 150023, Ярославль, Московский пр-т, д. 88

\*E-mail: kvmbaikal@yandex.ru

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ИСПЫТАНИЯ НА СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЗИНОВЫХ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ АМОРФНЫХ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ

**Аннотация.** Важнейшей задачей резиновой промышленности является непрерывное повышение качества, надежности и долговечности изделий, в том числе резиновых мембран, которые нашли широкое применение в автомобильной, авиационной, станкостроительной, химической и других отраслях промышленности. В процессе эксплуатации мембраны подвергаются сложным деформациям, вследствие чего возникает большое количество зон потенциальных разрушений различного характера, которые могут приводить к выходу изделия из строя. В тоже время, стандартные методы испытаний, используемые при разработке рецептур мембран, в большинстве случаев предполагают испытание материала в условиях простого одноосного растяжения и не учитывают структурные изменения в материале при нагружении. В данной работе проведено исследование структурных изменений в мембранах при нагружении в сложнонапряженном состоянии, которое реализовывалось путем индентирования резиновой мембраны сферическим индентором. Структурные изменения оценивались методом гидростатического взвешивания. Установлено, что в сложнонапряженном состоянии резины на основе кристаллизующегося каучука СКИ-3 значительно уступают по прочностным характеристикам вулканизатам на основе аморфного каучука СКМС-30АРК как в ненаполненном, так и наполненном состоянии, что обусловлено подавлением ориентационных процессов в резинах на основе каучука СКИ-3 при индентировании.

**Ключевые слова:** резиновые мембраны, сложнонапряженное состояние, индентирование, аморфные каучуки, кристаллизующиеся каучуки.

**Введение.** Свойства резиновых изделий, в том числе резиновых мембран [1, 5], во многом определяются структурными изменениями, протекающими в процессе их эксплуатации. Стоит отметить, что в реальных условиях работы мембран эластомерная составляющая, воспринимающая внешние нагрузки, находится в условиях сложнонапряженного состояния [2–4]. В тоже время, стандартные методы испытаний, используемые при разработке рецептур мембран, в большинстве случаев предполагают испытание материала в условиях простого одноосного растяжения и не учитывают структурные изменения в материале при нагружении. В этой связи актуальным представляется исследование структурных изменений в резиновых мембранах при нагружении в сложном напряженно-деформированном состоянии.

Специфика свойств мембран обуславливает широкий спектр применяемых для их изготовления каучуков, поэтому в качестве объектов исследования были выбраны резины на основе кристаллизующегося каучука СКИ-3 и аморфного каучука СКМС-30АРК, широко используемых

в промышленности РТИ [6]. Исследовались как не наполненные вулканизаты, так и резины, содержащие 40 мас.ч. технического углерода N339.

**Методика.** Сложнонапряженное состояние резиновой мембраны реализовывалось путем её индентирования стальным полированным шарообразным индентором с помощью реверсивной приставки к разрывной испытательной машине [7]. Анализ напряженно-деформированного состояния проводился с применением метода конечных элементов [8, 9]. Структурные изменения в материале оценивали методом гидростатического взвешивания, который заключается в расчете плотности растянутых до заданной деформации образцов резин после их взвешивания на торсионных весах в воздушной среде и в этиловом спирте [10]. В случае с образцами-мембранами образцы вырубались из их центральной части. Плотность резин оценивалась после выдержки 60÷70 мин, то есть оценивались те структурные изменения, которые сохранились в материале после снятия нагрузки.

**Основная часть.** В случае одноосного растяжения (рис. 1) для обеих резин при небольших

значениях относительного удлинения (~ до 50 %) отмечается рост плотности, связанный, по-видимому, с ориентацией исходной надмолекулярной структуры материала. При дальнейшем деформировании наблюдается снижение плотности, что, вероятно, обусловлено разрушением исходной сетки физических связей в местах максимальной концентрации напряжений. Дальнейший рост

плотности под действием нагружения вызван начавшимся процессом ориентации и образованием новой ориентированной структуры. Далее, в предразрывной стадии, в материале образуются микродефекты (микротрещины, вакуоли и т.д.), приводящие к его разрушению, что сопровождается снижением плотности.

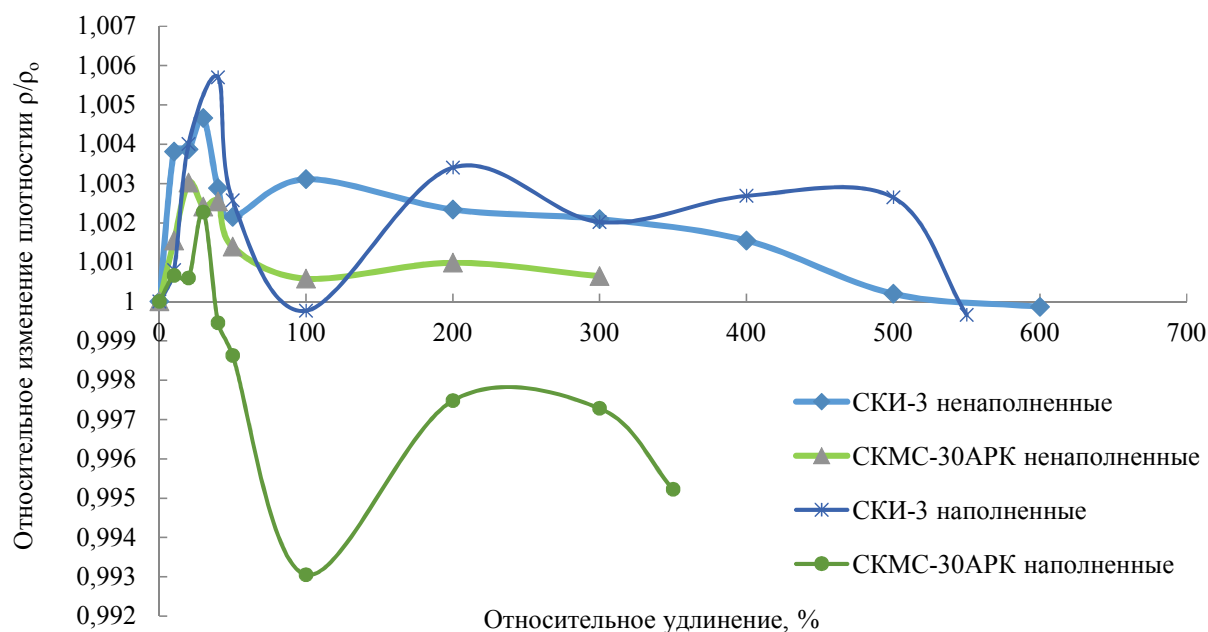


Рис. 1. Относительное изменение плотности при одноосном растяжении

Можно отметить, что в резинах на основе каучука СКИ-3 как в ненаполненном, так и в наполненном состоянии, относительное изменение плотности на всех стадиях деформирования оказывается больше, чем в резинах на основе

СКМС-30АРК. То есть, каучук СКИ-3 при одноосном растяжении в гораздо большей степени способен к ориентационному упрочнению, что и обуславливает более высокие прочности резин на его основе (табл. 1).

Таблица 1

**Влияние типа каучука на условную прочность резин при одноосном растяжении**

| Показатель                     | Ненаполненные резины |            | Наполненные резины |            |
|--------------------------------|----------------------|------------|--------------------|------------|
|                                | СКИ-3                | СКМС-30АРК | СКИ-3              | СКМС-30АРК |
| Условная прочность $f_p$ , МПа | 19,8                 | 2,61       | 22,3               | 21,9       |

В условиях сложноподвижного состояния картина меняется коренным образом (рис. 2). Для ненаполненных резин уже при деформациях ~ 10 ÷ 20 % происходит резкое снижение плотности, которое прекращается только при удлинениях ~ 100 ÷ 200 %. Тенденция к росту плотности появляется только в предразрывной стадии, но и в этом случае плотность материала остается значительно ниже исходной, что говорит о том, что в условиях сложноподвижного состояния ориентационные процессы в материале серьезно затруднены, следствием чего является падение прочности резин относительно того уровня, который наблюдался при одноосном растяжении. Это

ярко выражено для резин на основе каучука СКИ-3 (значения коэффициента «С» в табл. 2).

Наполнение резин активным техническим углеродом вызывает резкое увеличение концентрации узлов физической сетки в системе за счет связей «каучук - технический углерод», что приводит к существенному росту прочности исходных надмолекулярных структур вулканизата. Этим объясняется наличие участка роста плотности наполненных резин при небольших (10÷20 %) деформациях в условиях сложноподвижного состояния.

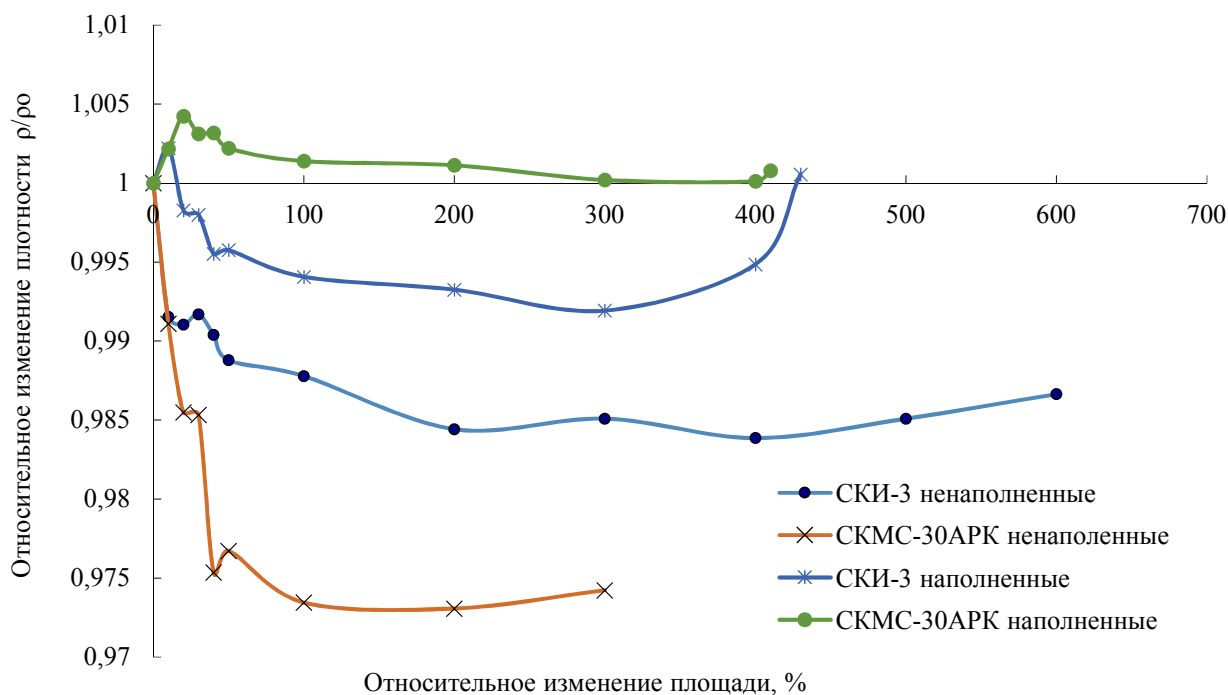


Рис. 2. Относительное изменение плотности в сложнапряженном состоянии

Последующее же снижение плотности, в данном случае, оказывается менее выраженным, по сравнению с ненаполненными резинами. Кривая для резин на основе каучука СИИ-3 лежит значительно ниже кривой для резин на основе каучука СКМС-30АРК. В предразрывной стадии деформирования для вулканизатов СИИ-3 наблюдается рост плотности, слабо выраженный у резин на основе СКМС-30АРК.

Физико-механические свойства резин связаны, в основном, с взаимным влиянием двух факторов: во-первых, с образованием в материале уплотненных ориентированных структур, в результате чего плотность должна возрастать, во-вторых, с разрушением надмолекулярных образований и с образованием дефектов (вакуолей, микротрещин), что должно приводить к снижению плотности. Сравнение характера зависимостей, полученных при одноосном нагружении и сложнапряженном состоянии, позволяет сделать ряд выводов. При одноосном растяжении образование в материале дефектов начинается, в основном, после того, как макромолекулярные цепи сориентировались вдоль направления действия силы [5]. При этом во всех случаях наблюдается снижение плотности резин в предразрывной стадии деформирования (при деформациях ~ 70 ÷ 90 % от разрывной). При индентировании мембран рост плотности материала на конечных стадиях испытания, особенно у резин на основе каучука СИИ-3, обусловлен процессом образования ориентированных структур, наиболее интенсивно протекающим в предразрывной стадии. В

сложнапряженном состоянии процессы ориентации протекают иначе, чем при одноосном нагружении. В конечном итоге это приводит к снижению прочности вулканизатов СИИ-3. При этом у резин на основе аморфного, не имеющего способности к ориентационной кристаллизации и ориентационному упрочнению, каучука СКМС-30АРК снижения прочности не отмечается.

При индентировании мембраны реализуется неоднородное напряженно-деформированное состояние, поэтому определить абсолютные значения физико-механических показателей на основании только экспериментальных данных не представляется возможным. Поэтому было проведено моделирование процесса нагружения резиновой мембраны сферическим индентором методом конечных элементов с целью выявления наиболее опасных сечений, а также анализа прочностных свойств исследуемых резин [11, 12, 14, 15].

Детально математический аппарат анализа описан в работах [8, 9, 13]. Для того чтобы сопоставить результаты конечно-элементного расчета с прочностью при одноосном растяжении использовалась функция следующего вида (1):

$$F(S_1, S_2) = a * S_1 + (1 - a) S_2 = C \quad (1)$$

где  $a$  и  $C$  — экспериментально определяемые коэффициенты:

$a = \frac{S_2}{(f_p + S_2 - S_1)}$  — характеризует относительный вклад первого инварианта (нормальных напряже-

ний) в прочность, соответственно (1-а) характеризует стойкость к касательным напряжениям;  $S_1 = P_1 + P_2 + P_3$ ;  $S_2 = P_1P_2 + P_2P_3 + P_1P_3$  – значения первого и второго инвариант тензора напряжений;  $P_i$  – значения главных напряжений;  $C = f_p * a$  – характеризует абсолютную прочность материала;  $f_p$  – условная прочность при одноосном растяжении, МПа.

Расчет показал, что максимальные напряжения концентрируются в области потери контакта индентора с мембраной и располагаются по окружности, центр которой совпадает с осью перемещения индентора (рис. 3). Это позволяет сделать предположение о том, что ориентация макромолекул в предразрывной стадии происходит в окружном направлении, а разрушение материала происходит за счет «расщепления» этих структур.

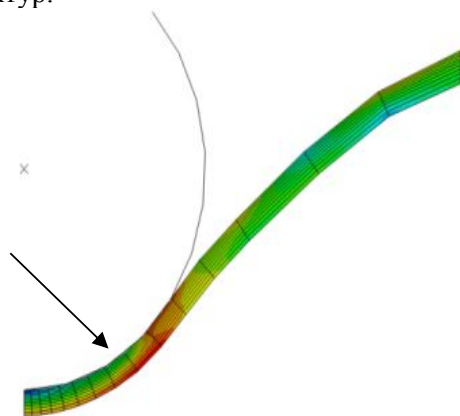
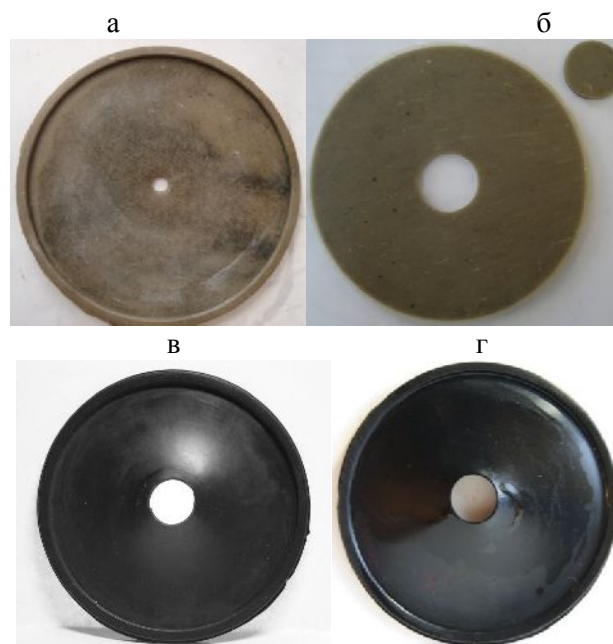


Рис. 3. Осесимметричная модель нагружения резиновой мембраны индентором (стрелкой показана область концентрации напряжений)

Об этом же говорит характер разрушения образцов (рис. 4).

Он оказался одинаков у всех типов эластомеров и представляет отверстие в зоне контакта индентора с мембраной. В ненаполненном состоянии диаметр отверстия зависит от типа каучука. У образцов на основе каучука СКИ-3 диаметр образующегося отверстия заметно меньше, чем у образцов, изготовленных на основе каучука СКМС-30АРК. Экспериментально показано, что максимальные значения перемещения индентора имеют ненаполненные вулканизаты именно этого каучука (табл. 2). Это вызывает смещение области максимальных напряжений ближе к центру мембраны и, соответственно, уменьшение размера области разрушения. Различий в характере разрушения наполненных резин не выявлено.



Тип каучука: а, в – СКИ-3; б, г – СКМС-30АРК  
Рис. 4. Характер разрушения ненаполненных (а, б) и наполненных (в, г) мембран

Таблица 2

**Влияние типа каучука на НДС и физико-механические свойства резин в сложноподвижном состоянии**

| Показатель                                                          | Ненаполненные резины |            | Наполненные резины |            |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------|------------|--------------------|------------|
|                                                                     | СКИ-3                | СКМС-30АРК | СКИ-3              | СКМС-30АРК |
| $a$                                                                 | 0,069                | 2,023      | 0,571              | 1,057      |
| $1-a$                                                               | 0,931                | -1,023     | 0,429              | -0,057     |
| $C$                                                                 | 1,364                | 5,280      | 12,731             | 23,144     |
| Перемещение индентора при разрыве, мм                               | 210                  | 100        | 140                | 125        |
| Относительное изменение площади поверхности мембраны при разрыве, % | 600                  | 300        | 430                | 410        |

Анализ параметров «С» и «1-а» функции (1) показал, что в сложноподвижном состоянии минимальными прочностными характери-

ками обладают резины на основе кристаллизующегося каучука СКИ-3, что подтверждается значениями коэффициента «С» (чем меньше значе-

ние данного коэффициента, тем меньше прочность материала). Связано это с тем, что резины на его основе в сложнапряженном состоянии обладают низкой стойкостью к касательным напряжениям, что показывают значения параметра «1-а» (чем больше значение коэффициента, тем ниже стойкость к касательным напряжениям). Эта зависимость качественно сохраняется и при введении наполнителя, но на более высоком количественном уровне.

**Выводы.** Подводя итог вышеизложенному можно заключить, что в сложном напряженно-деформированном состоянии механизм формирования свойств резин при одноосном растяжении и сложнапряженном состоянии имеет ряд существенных различий, о чем свидетельствуют результаты анализа структуры резин посредством метода гидростатического взвешивания по относительному изменению плотности и расчета методом конечных элементов. В сложнапряженном состоянии резины на основе кристаллизующегося каучука СКИ-3 не имеют явно выраженного преимущества перед резинами на основе аморфного каучука СКМС-30АРК. Полученные результаты открывают новые пути совершенствования рецептур для мембран, условия эксплуатации которых предполагают работу в сложном напряженно-деформированном состоянии.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 21905-76. Мембраны резиновые. Термины и определения. М.: Изд-во Комитета стандартов, мер, измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1976. 10 с.
2. Зуев Ю.С. Разрушение эластомеров в условиях характерных для эксплуатации. М.: Химия, 1980. 288 с.
3. Guo Q. Polymer Morphology: Principles, Characterization, and Processing John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, Canada, 2016. 472 p.
4. Технология резины: Рецептуростроение и испытания. Под ред. Дика Дж. С.; Пер. с англ. Под ред. Шершнева В.А. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 620 с.
5. Резниченко С.В., Морозов Ю.Л. Большой справочник резинщика. Том 2. Резины и резинотехнические изделия. М.: ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ», 2012. 648 с.
6. Резниченко С.В., Морозов Ю.Л. (ред.) Большой справочник резинщика. Том 1. Каучуки и ингредиенты М.: Техинформ, 2012. 744 с.
7. Несиоловская Т.Н., Куделин Д.В. Комплексный подход к проектированию тонкостенных резиновых изделий // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 2 С. 229–233.
8. Куделин Д.В., Несиоловская Т.Н. Анализ НДС плоской резиновой мембраны в сложнапряженном состоянии // Математика и математическое образование. Теория и практика: Межвузовский сб. научных трудов. Выпуск 13. Ярославль: Изд. ЯГТУ, 2018. С. 183–190.
9. Куделин Д.В., Несиоловская Т.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния резиновой мембраны при продавливании шарообразным индентором // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 3. Под общ. ред. А. А. Большакова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. С. 140-144.
10. ГОСТ 15139-69 Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы). М.: Издательство стандартов, 1981.
11. Гольберг И.И. Механическое поведение полимерных материалов (математическое описание). М.: Химия, 1970. 189 с.
12. Axel J. R. Day, Miller K.A. “Equibiaxial Stretching of Elastomeric Sheets, An Analytical Verification of Experimental Technique” ABAQUS 2000 User’s Conference Proceedings, Newport, Rhode Island, May 30-June 2, 2000. Pp. 205–220.
13. Yeoh O.H. Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber // Rubber Chemistry and Technology. 1993. Vol. 66. Pp. 754–771.
14. Kaliske M. On the Finite Element Implementation of Rubber-like Materials at Finite Strains // Engineering Computations. 1997. Vol. 14. No. 2. Pp. 216–232.
15. Gokhale Nitin S., Deshpande Sanjay S., Bedekar Sanjeev V. Practical Finite Element Analysis. Finite To Infinite. 2008. 446 p.

## Информация об авторах

**Куделин Дмитрий Вячеславович**, соискатель, ведущий специалист. E-mail: kvmbaikal@yandex.ru. ООО «Научно-технический центр «Интайр». Россия, 150003, Ярославль, ул. Советская, д. 81.

**Несиоловская Татьяна Николаевна**, доктор технических наук, профессор, декан инженерно-экономического факультета. E-mail: nesiolovskaya@ystu.ru. Ярославский государственный технический университет. Россия, 150023, Ярославль, Московский пр-т, д. 88.

**Ветошкин Андрей Борисович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Химическая технология биологически активных веществ и полимерных композитов». E-mail: vetoshkinab@ystu.ru. Ярославский государственный технический университет. Россия, 150023, Ярославль, Московский пр-т, д. 88.



Поступила в июне 2019 г.

© Куделин Д.В., Несиоловская Т.Н., Ветошкин А.Б., 2019

<sup>1,\*</sup>Kudelin D.V., <sup>2</sup>Nesiolovskaya T.N., <sup>2</sup>Vetoshkin A.B.

<sup>1</sup>R&D "Center "Intire" LLC

Russia, 150003, Yaroslavl, st. Sovetskaya, 81

<sup>2</sup>Yaroslavsky State Technical University

Russia, 150023, Yaroslavl, Moskovsky av., 88

\*E-mail: kvmbaikal@yandex.ru

## AN INFLUENCE OF TEST CONDITIONS ON STRUCTURAL CHANGES OF RUBBER MEMBRANES BASED ON AMORPHOUS AND CRYSTALLINE POLYMERS

**Abstract.** The most important task of the rubber industry is the continuous improvement of the quality, reliability and durability of products, including rubber membranes, which are widely used in the automotive, aviation, machine tool, chemical and other industries. Membranes in most cases are operated in difficult loading conditions, which leads to a variety of zones and the nature of potential damage that occurs during their operation. At the same time, when developing a new rubber compounds for membranes, most often the standard methods for determining the mechanical characteristics of rubbers are used, most of which involve testing the material under simple uniaxial tension-compression and do not take into account structural changes in the material during loading. In this work, a study of structural changes in the membranes under loading in a complex stressed state, which was realized by indenting the rubber membrane with a spherical indenter, was conducted. Structural changes were evaluated by hydrostatic weighing. It has been established that in the complex stressed state of rubber based on crystallizing IR rubber, there is no distinct advantage over rubber based on amorphous SBR rubber. Indentation suppresses orientation processes in rubbers based on IR crystallizing rubber, which leads to a significant decrease in their strength properties.

**Keywords:** rubber membranes, complex stress state, indentation, amorphous rubbers, crystallizing rubbers.

### REFERENCES

1. GOST 21907-76. Rubber membranes. Terms and definitions [GOST 21905-76. Membrany rezinovie. Termini i opredeleniya]. Moscow, State committee of standards, measures, measuring instruments of the council of ministers of the USSR, 1976. 10 p. (rus)
2. Zuev Y.S. Destruction of elastomers in conditions typical for exploitation [Razrushenie elastomerov v usloviyah harakternih dlia expluatacii]. Moscow: Chemistry, 1980, 288 p. (rus)
3. Guo Q. Polymer Morphology: Principles, Characterization, and Processing John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, Canada, 2016. 472 p.
4. Rubber technology. Compounding and testing for performance [Tehnologia rezini: Recepturostroenie i ispitaniya]. Edited by J.S. Dick. St. Petersburg, Scientific background and technology, 2010, 620 p. (rus)
5. Reznichenko S.V., Morozov U.L. Great handbook of an engineer. Vol. 2. Rubbers and rubber products [Bolshoy spravochnik rezinshika. Tom 2. Rezini i rezinotekhnicheskie izdelia]. Moscow. Techninform MAI, 2012. 648 p. (rus)
6. Reznichenko S.V., Morozov U.L. Great handbook of an engineer. Vol. 1. Rubbers and ingredients [Bolshoy spravochnik rezinshika. Tom 1. Kauchuki i ingredienty]. M.: Techninform, 2012, 744 p. (rus)
7. Nesiolovskaya T.N., Kudelin D.V. An integrated approach to the design of thin-walled rubber products [Kompleksnij podhod k proektirovaniu tonkostennih rezinovyh izdelij]. Scientific and Technical Bulletin of the Volga region. 2012. No. 2. Pp. 229–233. (rus)
8. Kudelin D.V., Nesiolovskaya T.N. Analysis of the stress-strain state of a flat rubber membrane in a complex stress state [Analiz NDS ploskoj rezinovoj membrani v slozhonapriagennom sostojanii]. Mathematics and Mathematical Education. Theory and practice: Interuniversity collection of scientific papers. Issue 13, Yaroslavl: YSTU, 2018. Pp. 183–190. (rus)
9. Kudelin D.V., Nesiolovskaya T.N. Modeling of the stress-strain state of a rubber membrane when pushed by a spherical indenter [Modelirovanie napriagennodeformirovannogo sostojania rezinovoj membrani pri prodavlivanii sharoobraznim indentorom]. Mathematical methods in engineering and technology: a collection of works of the international scientific conference: V.3. St Petersburg: Technical University, 2018. Pp. 140–144. (rus)
10. GOST 15139-69 Plastics Methods for determining the density (bulk density) [GOST 15139-69 Plastmassi. Metodi opredeleniya plotnosti (objomnoj massi)]. Moscow: Standards Publishing, 1981. (rus)

11. Golberg I.I. Mechanical behavior of polymeric materials (the mathematical description) [Механическое поведение полимерных материалов (математическое описание)]. М.: Chemistry, 1970. 189 p. (rus)

12. Axel J.R. Day, Miller K.A. "Equibiaxial Stretching of Elastomeric Sheets, An Analytical Verification of Experimental Technique" ABAQUS 2000 User's Conference Proceedings, Newport, Rhode Island, May 30-June 2, 2000. pp. 205-220.

13. Yeoh O.H. Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber. Rubber Chemistry and Technology. 1993. Vol. 66. Pp. 754-771.

14. Kaliske M. On the Finite Element Implementation of Rubber-like Materials at Finite Strains. Engineering Computations, 1997. Vol. 14. No. 2. Pp. 216-232.

15. Gokhale Nitin S., Deshpande Sanjay S., Bedekar Sanjeev V. Practical Finite Element Analysis. Finite To Infinite, 2008. 446 p.

*Information about the authors*

**Kudelin, Dmitriy V.** Postgraduate student, leading specialist. E-mail: kvmbaikal@yandex.ru. R&D Center "Intire" LLC. Russia, 150003, Yaroslavl, st. Sovetskaya, 81.

**Nesiolovskaya, Tatiana N.** DSc, Professor. E-mail: nesiolovskayatn@ystu.ru. Yaroslavl State Technological University. Russia, 150023, Yaroslavl, Moskovsky av., 88.

**Vetoshkin, Andrey B.** PhD, Assistant professor. E-mail: vetoshkinab@ystu.ru. Yaroslavl State Technological University. Russia, 150023, Yaroslavl, Moskovsky av., 88.

---

*Received in July 2019*

**Для цитирования:**

Куделин Д.В., Несиоловская Т.Н., Ветошкин А.Б. Влияние условий испытания на структурные изменения резиновых мембран на основе аморфных и кристаллических полимеров // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 92–98. DOI: 10.34031/article\_5da45f0ea7bd13.91970783

**For citation:**

Kudelin D.V., Nesiolovskaya T.N., Vetoshkin A.B. An influence of test conditions on structural changes of rubber membranes based on amorphous and crystalline polymers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 9. Pp. 92–98. DOI: 10.34031/article\_5da45f0ea7bd13.91970783

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/article\_5da45fa42a6a42.84240607

\*Голдобина В.Г.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

\*E-mail: goldobina.valentina@gmail.com

## ТОЧНОСТЬ ЗЕНКЕРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ПОСЛЕ СВЕРЛЕНИЯ

**Аннотация.** На предприятиях строительных материалов используется различное крупногабаритное технологическое оборудование, которое в процессе эксплуатации подвергается различным видам ремонта, требующих применения соответствующей техники и технологии. Применяемые для помола сырья мельницы имеют фланцевые соединения, которые крепятся прецизионными и крепежными болтами, обеспечивающие герметичность соединения. Прецизионные болты фланцевых соединений воспринимают всю нагрузку оборудования, поэтому к отверстиям под них во фланцах предъявляются повышенные требования по качеству. Обработка прецизионных отверстий должна выполняться по технологии, обеспечивающей требования к ним. В настоящей статье представлено исследование обработки отверстий зенкерованием, обеспечивающим точность отверстий после сверления по форме и пространственному отклонению. Приводятся результаты экспериментов, связанных с обработкой отверстий с использованием переносных устройств с выдвижным шпинделем и подвижной сверлильной головкой. Изложены отклонения отверстий, которые получены после сверления на переносных устройствах, и установлена зависимость отклонений от различных факторов, выражающаяся в разбивке и уводе оси отверстия. Установлено влияние технологической наследственности после сверления на точность отверстия при зенкеровании. Приведенные зависимости дают возможность спрогнозировать точность обработки отверстий с использованием переносных устройств после сверления и после зенкерования, установить фактическую глубину резания на зенкерование с учетом жесткости технологической системы и независимых переменных.

**Ключевые слова:** отверстия, фланцевые соединения, крупногабаритное оборудование, сверление, зенкерование, точность отверстий, технологическая наследственность.

**Введение.** В крупногабаритном оборудовании за срок эксплуатации производят ремонты, связанные с заменой изношенных и поломанных узлов и деталей на новые. Сборные конструкции технологического крупногабаритного оборудования имеют значительную часть болтовых соединений. Ответственные фланцевые соединения помольного оборудования скрепляются крепежными и прецизионными болтами, под которые обрабатываются соответствующие отверстия. К прецизионным отверстиям предъявляются повышенные требования по обеспечению точности по форме и пространственным отклонениям. В технических условиях на прецизионные соединения устанавливается допуск на цилиндричность отверстия в пределах допуска на диаметр и перпендикулярность отверстия относительно торцовых поверхностей фланца [1]. Во фланцевых соединениях доля, приходящаяся на прецизионные болты, от общего количества болтов составляет, в зависимости от узла оборудования, одну треть или одну вторую части, а то и все болты должны быть прецизионными. Это свя-

зано с тем, что на прецизионные болты приходится вся нагрузка, воспринимаемая узлом при работе оборудования, и именно они работают на срез [2, 3]. Обработка прецизионных отверстий во фланцевых соединениях крупногабаритного оборудования по месту монтажа заменяющего узла при ремонте на цементных заводах, выполняется с использованием переносных устройств или переносных станков [4, 5]. Переносные сверлильные станки, в отличие от переносных устройств, имеют узел крепления, с помощью которого станок устанавливается на объект и крепится [6].

В настоящей работе рассматривается точность обработки отверстий в сплошном металле сверлением и его влияние на технологическую наследственность для зенкерования. В работе использовались данные экспериментов, которые проводились на переносных устройствах различных типов, уступающие по жесткости стационарным станкам, с изменением независимых переменных, оказывающих влияние на целевую величину – точность отверстия [1]. Проведено ряд ра-

бот по обработке отверстий в стальных заготовках с механическими свойствами, соответствующими конструкционной стали, из которой изготавливаются фланцы помольного оборудования, с применением переносных устройств, которые используют для обработки отверстий при монтаже и ремонте крупногабаритного оборудования.

**Методология.** Основным видом механической обработки отверстий в сплошном металле является сверление спиральными сверлами, которыми можно обеспечить точность диаметра отверстия по 12–13 квалитету, что характерно при традиционной технологии обработки на стационарных станках [7].

По результатам экспериментальных данных, при сверлении на переносных устройствах отверстий в сплошном металле спиральными сверлами, установлено, что имеет место обеспечение точности по диаметру отверстий ближе к 14-му квалитету, наличие разбивки с увеличением диаметра отверстия по отношению к диаметру сверла и отклонение по форме отверстия от круглости и цилиндричности (рис. 1). В поперечных сечениях отверстия по его длине отмечалось отклонение от круглости в виде овальности или огранки (рис. 1). В продольном сечении отверстия по его длине отклонение от цилиндричности

было в виде конусности при сверлении на переносном устройстве с выдвижным шпинделем сверлильной головки, и в виде корсетности при сверлении на переносном устройстве с подвижной сверлильной головкой [1].

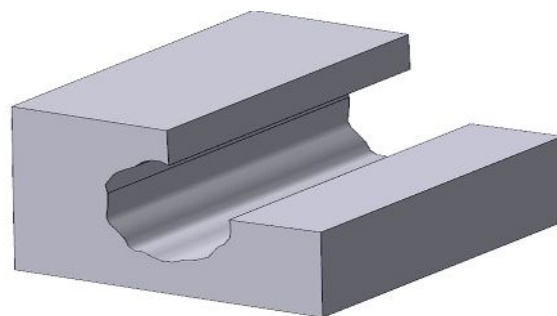


Рис. 1. Отклонения формы отверстия

На обоих устройствах наибольшая разбивка происходила на входном торце отверстия, т.е. при входе сверла в металл заготовки.

Кроме отмеченных отклонений имело место увод сверла (рис. 2, а), что явилось причиной появления отклонения от перпендикулярности отверстия относительно торца. Установлено, что величины приведенных отклонений тем больше, чем больше глубина сверления, связанная непосредственно с толщиной заготовок.

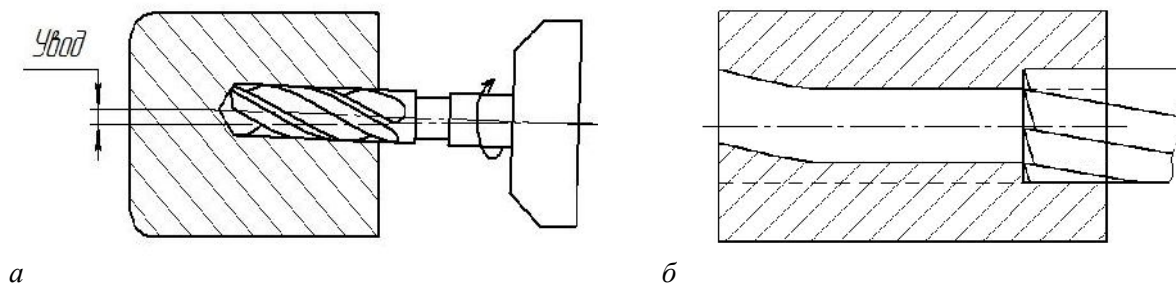


Рис. 2. Схемы обработки отверстий: а – увод сверла; б – зенкерование отверстия после сверления

Полученные при сверлении отклонения допустимы для крепежных болтов во фланцевых соединениях помольного оборудования. Диаметры таких болтов на 2 мм меньше диаметров отверстий под них. Прецизионные болты должны плотно входить в отверстия фланцев и прилегать торцами своих головок к торцам отверстий, что обеспечивается затяжкой этих болтов. При наличии неперпендикулярности отверстий головка болта либо не прилегает к торцу отверстия, либо болт изгибается под соответствующей затяжкой, что вызывает напряжение в болте. И то, и другое отрицательно влияет на фланцевое соединение при работе оборудования, что может привести к нежелательным последствиям.

Все приведенные отклонения от требуемой точности к прецизионным отверстиям указывают на необходимость после сверления применения более точных способов механической обработки. Во фланцевых соединениях обработка точных отверстий с применением переносных устройств по месту монтажа возможна с использованием зенкерования или растачивания с последующим развертыванием. Для устранения отклонений, которые возникают при сверлении, наиболее рационально использование *зенкерования*. В процессе зенкерования устраняются недостатки, возникающие после сверления (рис. 2, б) [8]. Этот способ обработки отверстий обеспечивает более высокое качество и производительность в сравнении с растачиванием. В то же время технологическая

наследственность при зенкеровании по величине меньше, т.к. зенкер имеет более высокую жесткость, чем расточной резец.

Из выше изложенного следует, что необходимо установить технологическую наследственность влияния сверления на форму отверстия в продольном сечении при зенкеровании.

**Основная часть.** Технологическая наследственность после сверления (рис. 3) может быть оценена через погрешность, возникающую при зенкеровании.

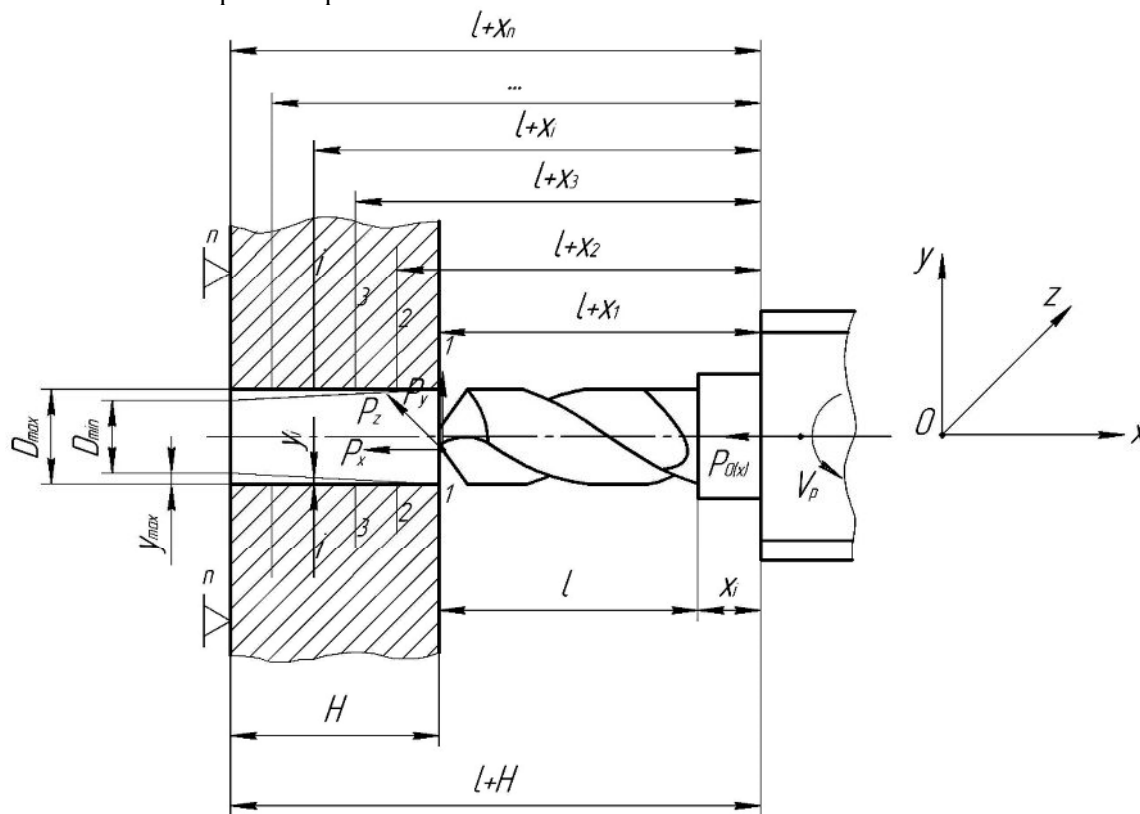


Рис. 3. Схема обработки при сверлении

Погрешность при зенкеровании можно определить по следующей формуле [1]:

$$y_z = C \cdot t^x \cdot \left( \frac{l_1^3}{3 \cdot E_1 \cdot J_1} + \frac{l_2^3}{3 \cdot E_2 \cdot J_2} \right), \quad (1)$$

где  $C$  – коэффициент, который вычисляется по формуле:

$$C = 10 \cdot C_p \cdot S^y \cdot K_p = 670 \cdot S^{0,65} \cdot K_p;$$

где  $K_p$  – поправочный коэффициент, учитывающий обрабатываемый материал,  $K_p = \left( \frac{\sigma_a}{750} \right)^{0,75}$ ,

$\sigma_a$  – прочность обрабатываемого материала, МПа;  $l_1$  – вылет режущего инструмента, мм;  $l_2$  – вылет шпинделя, мм;  $t$  – фактическая глубина резания, мм;  $x$  – показатель степени;  $E_1$  – модуль упругости режущего инструмента (зенкера), МПа;  $E_2$  – модуль упругости шпинделя, МПа;  $J_1$  – момент инерции режущего инструмента (зенкера), мм<sup>4</sup>;  $J_2$  – момент инерции шпинделя, мм<sup>4</sup>.

Номинальная глубина резания  $t_n$  для зенкерования:

$$t_n = (d_z - d_c) / 2,$$

где  $d_z$  – фактический диаметр зенкера, мм;  $d_c$  – фактический диаметр сверла, мм.

В результате разбивки диаметр отверстия после сверления имеет больше размер, чем диаметр сверла. Соответственно глубина резания изменяется на величину разбивки  $y_p$  по длине отверстия и будет отличаться от номинальной глубины резания. Если отсутствует увод сверла, то фактическую глубину резания в рассматриваемых поперечных сечениях отверстия можно определить по формуле:

$$t_i = [(d_z - d_c) / 2] - y_{pi}. \quad (2)$$

Величина разбивки  $y_{pi}$  зависит от многих факторов и переносных устройств, с помощью которых проводится обработка отверстий.

Для переносных устройств с подвижной сверлильной головкой разбивку в поперечных сечениях после сверления  $y_{pi} = y(x)$  можно определить по формуле [9]:

$$y(x) = \frac{1}{E_u \cdot J_u} \cdot \left[ \frac{P_0 \cdot d \cdot l_1 (l + l_1) \cdot (l_1 - l)}{12 \cdot l} - \frac{P l_1 (l + l_1) \cdot (2l - l_1)}{3} - \frac{P_1 \cdot l_0 \cdot x (2l_1 - x) \cdot (2l - l_1)}{12 \cdot l} \right] +$$

$$+ \frac{P_1 \cdot l_0}{4 \cdot E \cdot J} \cdot \left[ \frac{(l_0 + x)^3 \cdot (2l \cdot l_1 + l_1 x - x^2) - 2l_0^2 \cdot l \cdot l_1^2}{3l \cdot l_1^2} - \frac{x(2l_1 - x) \cdot (l_0 + x)^2}{l_1 (l + l_1)} \right], \quad (3)$$

где  $P_0$  – осевое усилие;  $P_1$  – вес подвижной сверлильной головки;  $d$  – диаметр режущего инструмента (сверла);  $l$  – длина вылета режущего инструмента до шпинделя;  $l_1$  – расстояние между опорами направляющих;  $x$  – переменная величина перемещения равная длине обработки, то есть толщине заготовки  $H$ , мм, изменяется от  $H$  к  $0$  (рис. 3). Ее можно представить как:  $x = l_1 - l_0$ .

Соответственно  $l_0$  также является величиной переменной и при  $x \rightarrow 0$   $l_0 \rightarrow l_1$ .

$$y(x) = \left( \frac{P_0 \cdot d \cdot l^2 (2l - x)}{4E_u \cdot J_u (l + x)} + \frac{P_0 \cdot d (l + x)^2}{4E \cdot J} \right) - \left( \frac{Pl(l + x)^2}{E \cdot J} + \frac{2P \cdot l^3}{3E_u \cdot J_u} \right), \quad (4)$$

где  $d$  – диаметр инструмента, мм;  $P_0$  – осевое усилие;

$$P = \Delta P_y; \Delta P_y \approx 0,0185(1 - f) \cdot P_0$$

$l$  – длина вылета режущего инструмента до шпинделя, мм;  $x$  – переменная величина перемещения равная длине обработки, то есть толщине заготовки  $H$ , мм, изменяется от  $0$  к  $H$  (рис. 3).  $E$  – модуль упругости шпинделя, МПа;  $E_u$  – модуль упругости режущего инструмента (сверла), МПа;  $J$  – момент инерции шпинделя, мм<sup>4</sup>;  $J_u$  – момент инерции режущего инструмента (сверла), мм<sup>4</sup>.

Изменение величины разбивки по длине сверления, соответственно изменяет глубину резания, которая отражается в силе резания. Переменная сила резания влияет на изменение погрешности обработки при зенкеровании. Подставляя соответствующие входные параметры в формулы (3) и (4) по длине сверления, длине сверла, силе резания и другие, можно вычислить величину разбивки в каждом рассматриваемом поперечном сечении по длине отверстия. Полученные значения разбивки подставляются в формулу (2) для определения фактической глубины резания в тех же сечениях, в которых вычислялась разбивка.

Если в процессе сверления имеет место и разбивка отверстия, и увод сверла, то фактическую глубину резания в рассматриваемых поперечных сечениях отверстия можно определить по формуле:

$$t_i = [(d_z - d_c)/2] + y_0 - y_{pi}, \quad (5)$$

$E_u$  – модуль упругости режущего инструмента (сверла), МПа;  $E$  – модуль упругости направляющих переносного устройства, по которым перемещается сверлильная головка, МПа;  $J_u$  – момент инерции режущего инструмента (сверла), мм<sup>4</sup>;  $J$  – момент инерции направляющих, мм<sup>4</sup>.

Для переносных устройств с *выдвижным шпинделем* сверлильной головки разбивка в поперечных сечениях  $y_{pi} = y(x)$  определяется по формуле [10]:

где  $y_{pi}$  – разбивка отверстия после сверления в  $i$  поперечных сечениях, которая вычисляется по формулам (3) или (4), в зависимости от используемого переносного устройства;  $y_0$  – увод оси отверстия после сверления.

Величину увода оси отверстия после сверления (рис. 4) для переносных устройств с выдвижным шпинделем можно вычислить по формуле [1]:

$$y_0 = P_0 \cdot \left( \frac{l_1^3}{3 \cdot E_u \cdot J_u} + \frac{l_2^3}{3 \cdot E \cdot J} \right), \quad (6)$$

где  $l_1$  – вылет режущего инструмента, мм;  $l_2$  – вылет шпинделя,  $l_2 = l_0 + x$ , мм, где  $l_0$  – постоянная величина вылета шпинделя;  $x$  – переменная величина вылета шпинделя, которая зависит от длины обработки, т.е.  $x \rightarrow H$ .

Значения  $E$ ,  $E_u$ ,  $J$ ,  $J_u$  те же, что в формуле (4).

Для переносных устройств с подвижной сверлильной головкой, жестких переносных станков и без выдвижных шпинделей величина увода оси отверстия  $y_0$  может быть определена по формуле [1]:

$$y_0 = \frac{P_0 \cdot l_1^3}{3 \cdot E_u \cdot J_u}, \quad (7)$$

где значения  $l_1$ ,  $E_u$  и  $J_u$  те же, что в формуле (6).

При использовании в переносных станках направляющих втулок для инструмента вылет режущего инструмента  $l$  в формулах (3) и (4) и  $l_1$  в формулах (6) и (7) заменяется на длину, равную расстоянию от выходного торца втулки до поверхности заготовки, –  $l_3$  (рис. 4).



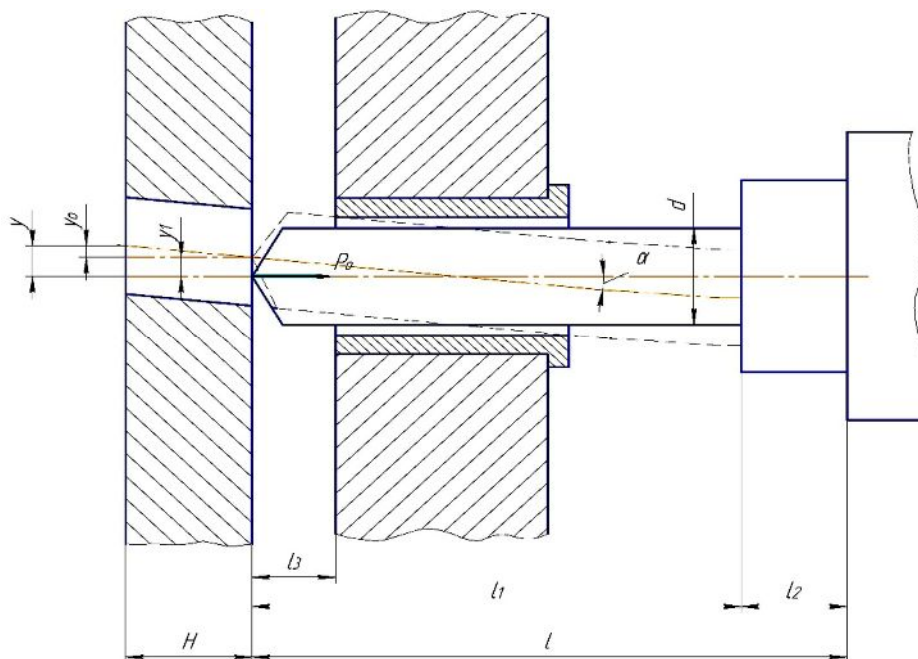


Рис. 4. Схема увода оси отверстия

Для установления технологической наследственности влияния сверления на точность и форму отверстия в продольном сечении при зенкеровании, рассчитывается погрешность  $y_i$  от переменной глубины резания  $t_i$  в нескольких поперечных сечениях по длине отверстия, количество которых принимается в зависимости от длины (глубины) отверстия. Расстояние между сечениями желательно принимать с равномерным шагом. Вычисление глубины резания  $t_i$  в принятых  $i$  поперечных сечениях производится по формуле (2) или (5).

Полученные значения глубины резания подставляются в формулу (1) и рассчитывается погрешность  $y_i$  в каждом сечении. Величина вылета шпинделя  $l_2$  в формуле (1) принимается равной переменной величине перемещения  $x_i$ , которая изменяется от 0 к  $H$  (рис. 3).

Диаметры отверстия после зенкерования  $D_{zi}$  по его длине в каждом поперечном сечении, зависящие от погрешности зенкерования в тех же сечениях, можно определить по формуле:

$$D_{zi} = d_z + 2 \cdot y_{zi}, \quad (8)$$

где  $d_z$  – фактический диаметр зенкера, мм;  $y_{zi}$  – погрешность зенкерования по длине отверстия в каждом поперечном сечении, вычисленная по формуле (1), мм.

Для установления максимальной погрешности  $y_{\max}$  формы отверстия после зенкерования ее величина определяется, как разность максимального и минимального диаметров отверстия, из следующего выражения:

$$y_{\max} = (D_{z \max} - D_{z \min}) / 2.$$

Проверкой обеспечения точности обработки отверстий после зенкерования является, соблюдение условия:

$$\Delta_z = D_{z \max} - D_{z \min} \leq TD_z, \quad (9)$$

где  $\Delta_z$  – погрешность диаметр отверстия после зенкерования;  $TD_z$  – допуск цилиндричности отверстия, мм.

Из изложенной зависимости влияния сверления на точность отверстий для последующей обработки необходимо установить достаточность глубины резания для зенкерования по следующему условию:

$$t_{\max} = (D_{z \max} - d_c) / 2 \leq t_n.$$

Если это условие не соблюдается, т.е.  $t_{\max} > t_n$ , то следует принять диаметр сверла меньшего размера, вычислив его из следующего выражения:

$$d_c = D_{z \max} - 2 \cdot t_{\max}.$$

Если вычисленное значение диаметра не соответствует стандартному, то принимается ближайший меньший диаметр сверла.

Значения диаметров зенкера  $d_{z \max}$  и  $d_{z \min}$  можно определить по формулам:

$$d_{z \max} = D_{ome} + TD_{ome} - y_{\max}; \quad (10)$$

$$d_{z \min} = D_{ome} + TD_{ome} - y_{\max} - Td_z, \quad (11)$$

где  $D_{ome}$  – номинальный диаметр зенкеруемого отверстия;  $TD_{ome}$  – допуск на диаметр зенкеруемого отверстия;  $y_{\max}$  – максимальная величина разбивки;  $Td_z$  – поле допуска на изготовление

зенкера, задается в зависимости от точности обрабатываемого отверстия.

Номинальный диаметр зенкера принимается по максимальному расчетному значению диаметра, т.е.  $d_z = d_{z \max}$ , вычисленный по формуле (10).

**Выводы.** Приведенная зависимость точности зенкерования от технологической наследственности после сверления позволяет:

- оценить влияние отклонений отверстий от цилиндричности после сверления на форму отверстий после зенкерования;

- спрогнозировать точность обработки отверстий с использованием переносных устройств на стадии проектирования технологии обработки прецизионных отверстий во фланцах крупногабаритного оборудования;

- выполнить расчеты по установлению фактической глубины резания на зенкерование с учетом жесткости технологической системы и независимых переменных, оказывающих влияние на точность отверстия;

- назначить режущие инструменты (сверло, зенкер) с нужными размерами – диаметром и длиной рабочей части, и требуемой точностью.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голдобина В.Г. Точность обработки отверстий во фланцах крупногабаритного оборудования при использовании переносных установок: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. 106 с.

2. Банит Ф.Г., Несвижский О.А. Механическое оборудование цементных заводов. М.: Машиностроение, 1975. 318 с.

3. Дроздов Н.Е. Эксплуатация, ремонт и испытание оборудования предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. М.: Высш. школа, 1979. 312 с.

4. Воробьев Л.Н. Технология машиностроения и ремонта машин. М.: Высш. школа, 1981. 344 с.

5. Голдобина В.Г. Разработка технологии и оборудования механической обработки прецизионных отверстий фланцевых соединений крупногабаритного оборудования: диссертация канд. техн. наук. Белгород, 2005. С. 80–93.

6. Голдобина В.Г. Обработка отверстий с использованием переносного станка // Научное обозрение. 2015. №20. С. 129–133.

7. <https://poznayka.org/s98086t1.html> Сверление отверстий.

8. [www.stroitelstvo-new.ru/zhestyanye-raboty/zenkerovanie.shtml](http://www.stroitelstvo-new.ru/zhestyanye-raboty/zenkerovanie.shtml) Зенкерование отверстий.

9. Голдобина В.Г. Точность обработки отверстий с использованием переносных устройств // Журнал «Известия Самарского научного центра Российской академии наук». Том 12, № 1(2). Самара, 2010. С. 326–329.

10. Голдобина В.Г. Влияние жесткости технологической системы на точность и форму обрабатываемых отверстий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. №3. С. 93–96.

Информация об авторах

**Голдобина Валентина Григорьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: [goldobina.valentina@gmail.com](mailto:goldobina.valentina@gmail.com). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в июле 2019 г.

© Голдобина В.Г., 2019

**\*Goldobina V.G.**

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

*Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.*

*\*E-mail: [goldobina.valentina@gmail.com](mailto:goldobina.valentina@gmail.com)*

## ACCURACY OPENING OF HOLES AFTER DRILLING

**Abstract.** At enterprises of building materials, various large-scale technological equipment is used, which in the process of operation is subjected to various types of repair, requiring the use of appropriate equipment and technology. Mills used for grinding raw materials have flanged connections that are attached with precision and fastening bolts to ensure the tightness of the connection. The precision bolts of the flange connections perceive the entire load of the equipment; therefore, high quality requirements are imposed on the holes for them in the flanges. Precision holes must be machined according to technology that meets their requirements. This article presents a study of hole machining by countersinking, ensuring the accuracy of holes after drilling in shape and spatial deviation. The results of experiments related to the machining of holes using portable devices with a sliding spindle and a movable drilling head are given. The deviations of the holes, which are

obtained after drilling on portable devices, are set out, and the dependence of the deviations on various factors, which is expressed in breaking down and leading away the hole axis, is established. The influence of technological heredity after drilling on the accuracy of the hole when countersinking is established. The dependences give the opportunity to predict the accuracy of holes machining using portable devices after drilling and after core drilling, to establish the actual depth of cut for core drilling taking into account the rigidity of the technological system and independent variables.

**Keywords:** holes, flange joints, large-size equipment, drilling, sinking, hole accuracy, technological heredity.

## REFERENCES

1. Goldobina V.G. Accuracy of processing holes in the flanges of large-sized equipment when using portable units [Tochnost obrabotki otverstii vo flansah krupnogabaritnogo oborudovanij pri ispolzovanii perenosnih ustanovok]. Belgorod: BSTU. 2018, 106 p. (rus)
2. Banit F.G., Nesvizh O.A. Mechanical equipment of cement plants [Mehanicheskoe oborudovanie sementnih zavodov]. M.: Mashinostroenie. 1975, 318 p. (rus)
3. Drozdov N.Ye. Operation, repair and testing of equipment of enterprises of building materials, products and structures [Ikspluatsij, remont i ispitanie oborudovanij predprijtii stroitel'nykh materialov, izdelii i konstruksii]. M.: Higher. School. 1979, 312 p. (rus)
4. Vorobiev L.N. Engineering technology and machine repair [Tehnologij mashinostroenij i remont mashin]. M.: Higher. School. 1981, 344 p. (rus)
5. Goldobina, V.G. Development of technology and equipment for mechanical processing of precision openings of flange joints of large-sized equipment [Razrabotka tehnologii i oborudovanij mehanicheskoy obrabotki presizionnykh otverstii flansevykh soedinenij krupnogabaritnogo oborudovanij]: dissertation Cand. tech. sciences. Belgorod, 2005. Pp. 80–93. (rus)
6. Goldobina V.G. Processing holes using a portable machine [Obrabotka otverstii s ispolzovaniem perenosnogo stanka]. Scientific Review Journal. 2015. No. 20. Pp. 129–133. (rus)
7. <https://poznayka.org/s98086t1.html> Drilling holes.
8. [www.stroitelstvo-new.ru/zhestyanye-raboty/zenkerovalie.shtml](http://www.stroitelstvo-new.ru/zhestyanye-raboty/zenkerovalie.shtml) Reaming holes.
9. Goldobina V.G. Accuracy of hole machining using portable devices [Tochnost obrabotki otverstii s ispolzovaniem perenosnykh ustroystv]. News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences". 2010. Vol. 12. No. 1 (2). Pp. 326–329. (rus)
10. Goldobina V.G. Influence of the rigidity of the technological system on the accuracy and shape of the holes to be machined [Vlijenie jestkosti tehnologicheskoi sistemi na tochnost i formu obrabativayemykh otverstii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2010. No. 3. Pp. 93–96. (rus)

## Information about the authors

**Goldobina, Valentina G.** PhD, Assistant professor. E-mail: goldobina.valentina@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

*Received in July 2019*

## Для цитирования:

Голдобина В.Г. Точность зенкерования отверстий после сверления // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 99–105. DOI: 10.34031/article\_5da45fa42a6a42.84240607

## For citation:

Goldobina V.G. Accuracy opening of holes after drilling. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 9. Pp. 99–105. DOI: 10.34031/article\_5da45fa42a6a42.84240607

DOI: 10.34031/article\_5da46203295c88.35872410

**Афонин А.Н., \*Мартынов Е.М., Макаров А.В.**

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова

(филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

Россия, 309516, Белгородская обл., Старый Оскол, мкр. Макаренко, 42

\*E-mail: e.m.martynov@mail.ru

## СХЕМЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ РЕЗЬБ

**Аннотация.** В горных и металлургических машинах часто используются тяжело нагруженные резьбовые соединения. Эффективным способом повышения усталостной прочности резьб является обработка их пластическим деформированием, однако традиционное накатывание со статическим нагружением деформирующего инструмента часто не обеспечивает требуемых для тяжело нагруженных резьб степени и глубины упрочнения. Предложен способ статико-импульсной обработки (СИО) для увеличения износостойкости тяжело нагруженных резьбовых соединений. Обоснована важность выбора рациональной схемы деформирования винтовой канавки при статико-импульсной обработке. Рассмотрены возможные схемы деформирования тяжело нагруженных резьб динамическим (ударным) воздействием инструмента, в том числе крупногабаритных. Выбор наиболее рациональной схемы деформирования способствует обеспечению необходимой глубины упрочнения и требуемой степени упрочнения в процессе статико-импульсной обработки резьб. Приведена классификация схем деформирования в осевом и радиальном сечениях заготовки. Описаны полнопрофильная, плоская, угловая, возвратная, сплошная и выборочная схемы деформирования. Даны рекомендации по выбору рациональной схемы деформирования. Приведены результаты, полученные при моделировании статико-импульсной обработки резьб, поля эквивалентных деформаций и распределения критерия разрушения Кокрофта-Лейтмена. Анализ результатов моделирования показал, что при обработке резьб область экономической целесообразности применения статико-импульсной обработки шире, чем накатывания статическим нагружением инструмента.

**Ключевые слова:** резьба, упрочнение, статико-импульсная обработка, накатывание, режущо-деформирующая обработка, моделирование, метод конечных элементов, критерия разрушения Кокрофта-Лейтмена.

В горных и металлургических машинах имеется большое количество тяжело нагруженных резьбовых соединений, подвергающихся усталостному нагружению. Наиболее эффективным способом для повышения усталостной прочности резьб является обработка их пластическим деформированием – накатыванием [1, 2–5]. Однако, традиционное накатывание со статическим нагружением деформирующего инструмента часто не обеспечивает требуемых для тяжело нагруженных резьб степени и глубины упрочнения. Значительную глубину и степень упрочнения возможно получить методом применения динамических (ударных) методов поверхностного пластического деформирования статико-импульсной обработки (СИО) [6, 7, 8].

Статико-импульсная обработка происходит при условии сочетания постоянного статического воздействия и периодического динамического деформирующего инструмента на обрабатываемую поверхность. Возникающее при этом динамическое (ударное) воздействие создает большие напряжения в пятне контакта заготовки и инструмента, затрачивая при этом небольшие мощности. Статический поджим при этом помо-

гает передавать ударные импульсы в обрабатываемую поверхность наиболее эффективно. При статико-импульсной обработке возможно использование, в качестве генерации ударных импульсов, электрических, пневматических и гидравлических генераторов ударных импульсов.

Нагружение инструмента ударной системой, которая состоит из волновода и бойка, обеспечивает формирование импульсов заданной формы, что позволяет добиться обеспечения оптимальных условий для протекания процесса пластической деформации. При статико-импульсной обработке возможно достижение глубины упрочнения до 10 мм и более при степени упрочнения до 100 % и более [8].

Крупные тяжело нагруженные резьбы в большинстве случаев не могут быть получены накатыванием по целому. В связи с этим для их формообразования применяется комбинированная режущо-деформирующая обработка, при которой часть материала из впадины резьбы удаляется обработкой резанием, а оставшаяся часть выдавливается СИО в выступ [9–11, 13].

При определении размеров предварительно нарезанной канавки необходимо рассчитывать не

только припуск под накатывание, но и определять геометрическую форму канавки и витков инструмента, определяющие схему перемещения металла из выступа во впадину, то есть схему деформирования.

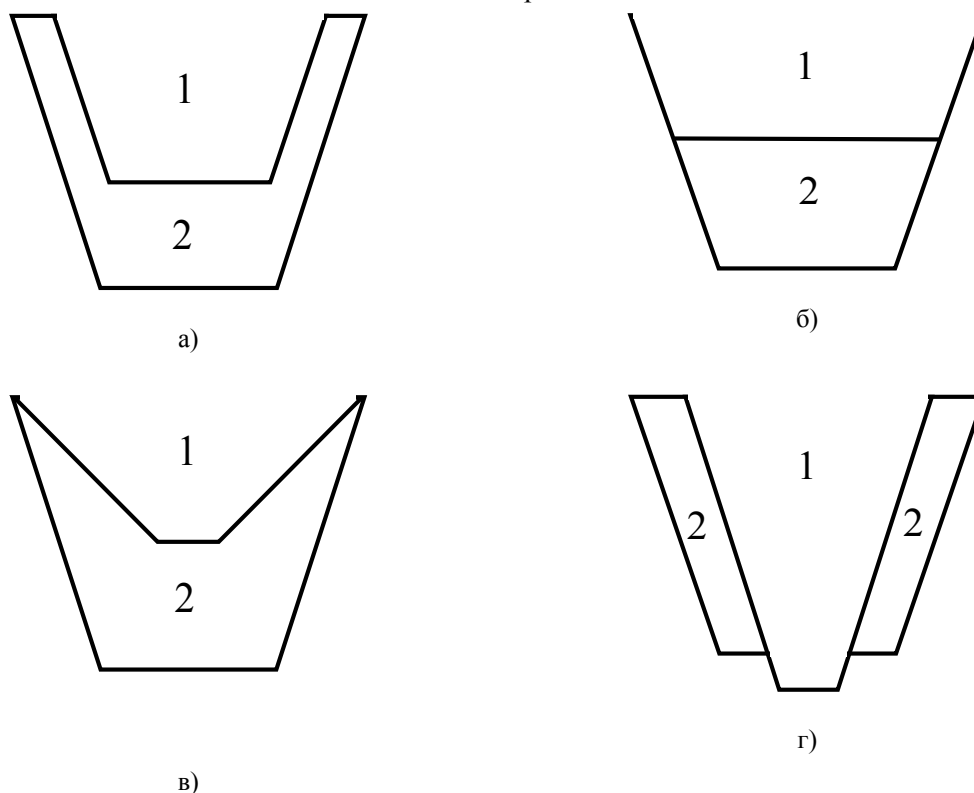


Рис. 1. Основные схемы деформирования при упрочнении СИО резьб в осевом сечении заготовки:  
1 – нарезанная канавка; 2 – припуск под СИО

Полнопрофильная схема деформирования (рис. 1, а) является наиболее распространенной. Она реализуется при СИО резьбы по предварительно нарезанной канавке, форма которой полностью совпадает с формой канавки готовой резьбы, а глубина меньше, чем высота профиля готовой резьбы. Основным преимуществом полнопрофильной схемы является возможность использования для ее реализации стандартного резьбонарезного и резьбонакатного инструмента, например, резьбонарезных гребенок и резьбонакатных роликов.

Послойная схема (рис. 1, б) реализуется при статико-импульсной обработке резьбы по канавке, вырезанной на всю ширину впадины на глубину, меньше высоты профиля в готовой резьбе. Использование послойной схемы приводит к возникновению под вершинами витков деформирующего инструмента застойных зон. В связи с этим, ее целесообразно использовать только при изготовлении резьб небольшого шага (не более 2 мм).

Угловая схема деформирования (рис. 1, в) реализуется при СИО резьбы по канавке, угол

Основных схемы деформирования в осевом сечении заготовки при статико-импульсном упрочнении резьб в зависимости от формы предварительно нарезанной винтовой канавки на примере трапециoidalного профиля приведены на рис. 1.

профиля которой больше или меньше угла профиля готовой резьбы. Угловая схема обеспечивает большую глубину упрочнения, по сравнению с полнопрофильной [7], однако требует для своей реализации резьбообразующего инструмента нестандартной конструкции.

Возвратная схема деформирования (рис. 1, г) реализуется при СИО резьбы по канавке, нарезанной на глубину, большую, чем высота профиля готовой резьбы. Подобная схема обеспечивает минимальные силы деформирования и величину деформации по сравнению с другими. В связи с этим она является предпочтительной при режущо-деформирующей обработке резьб с наиболее крупным шагом.

Существующие схемы деформирования при упрочнении СИО резьб в радиальном сечении заготовки в зависимости от формы предварительно нарезанной винтовой канавки приведены на рис. 2. В настоящее время практическое применение нашла лишь сплошная схема (рис. 2, а). При реализации данной схемы резьбонакатной инструмент вытесняет из впадины одинаковый на всем протяжении деформирования объем металла.

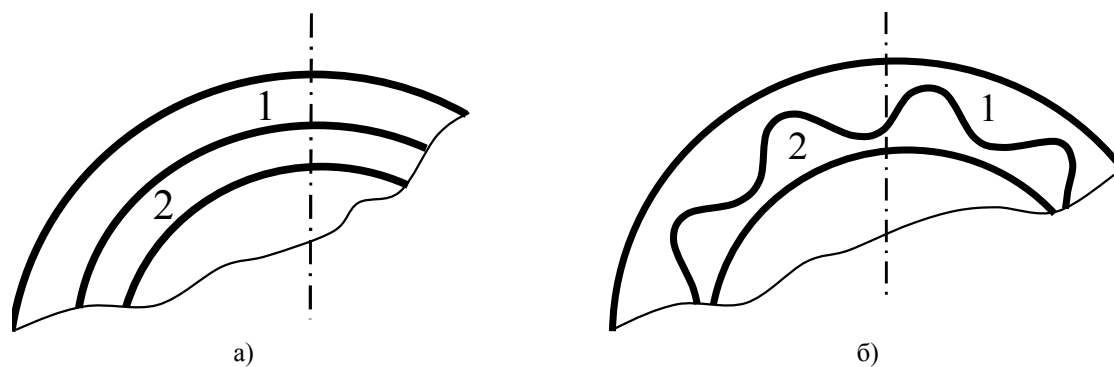


Рис. 2. Схемы деформирования при упрочнении СИО резьб в радиальном сечении заготовки:  
1 – нарезанная канавка; 2 – припуск под СИО

Довольно перспективной является, пока что не применяемая в промышленности схема (рис. 2, б). Реализовав эту схему появляется возможность вырезать объемы металла из впадины неравномерно по окружности.

Классификация схем деформирования во время упрочнения статико-импульсной обработкой резьб соответствует классификации схем деформирования накатывания резьб. Обобщив представленные схемы деформирования, их можно представить в виде, показанном на рис. 3.

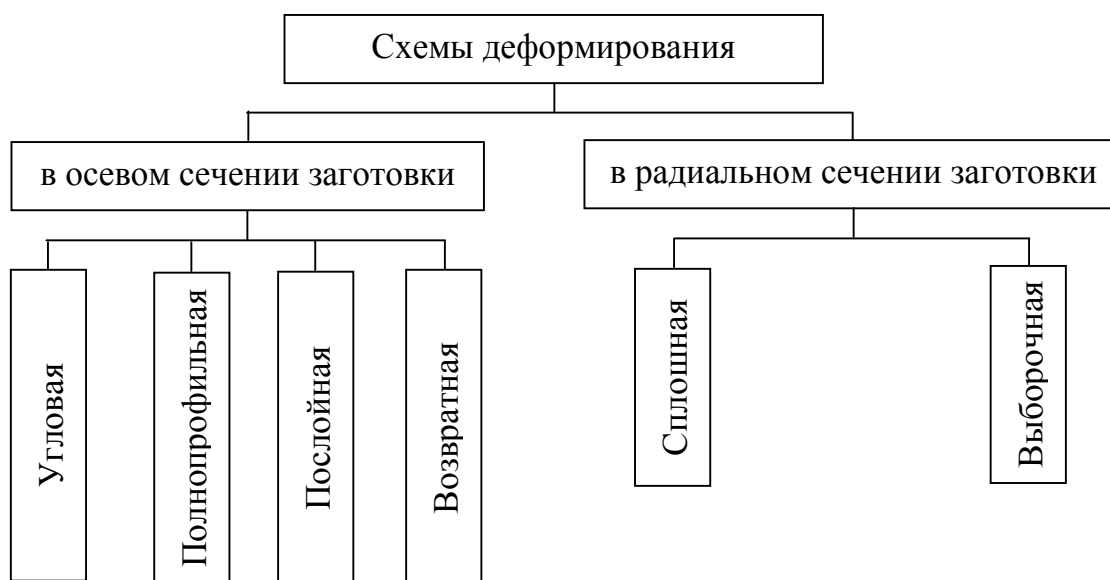


Рис. 3. Классификация существующих схем деформирования при упрочнении СИО резьб

Практическая реализация данных схем деформирования при упрочнении СИО наружных резьб возможна с помощью различных методов резьбоформообразования. Предварительное нарезание винтовой канавки в единичном и мелкосерийном производстве целесообразно производить резцами. Этот вид резьбонарезания отличается высокой универсальностью. Резьбовым резцам может быть легко придана необходимая для реализации требуемой схемы деформирования форма на универсальном заточном оборудовании. В крупносерийном и массовом производстве для предварительного нарезания винтовых канавок целесообразно использовать резьбонарезные головки.

Необходимая глубина нарезанной резьбовой канавки зависит от степени деформации, от сил,

возникающих при деформировании. В случае превышения данных параметров, возникает вероятность разрушения накатываемой резьбы. Поэтому для точного определения необходимой глубины прорезанной резьбовой канавки исследуем деформации и поля напряжений, возникающих при статико-импульсной обработке. Данные методы возможно будет провести лишь с помощью современных численных методов, таких как метод конечных элементов (МКЭ) [12].

Пример результатов, полученных при моделировании СИО резьб полей эквивалентных деформаций и распределения критерия разрушения Кокрофта-Лейтема приведен на рис. 4. При СИО величина критерия разрушения материала заготовки не должна превышать допустимого значения (для углеродистых сталей 0,65).



Анализ результатов моделирования показал, что при обработке резьб область экономической целесообразности применения СИО шире, чем

накатывания статическим нагружением инструмента (рис. 5).

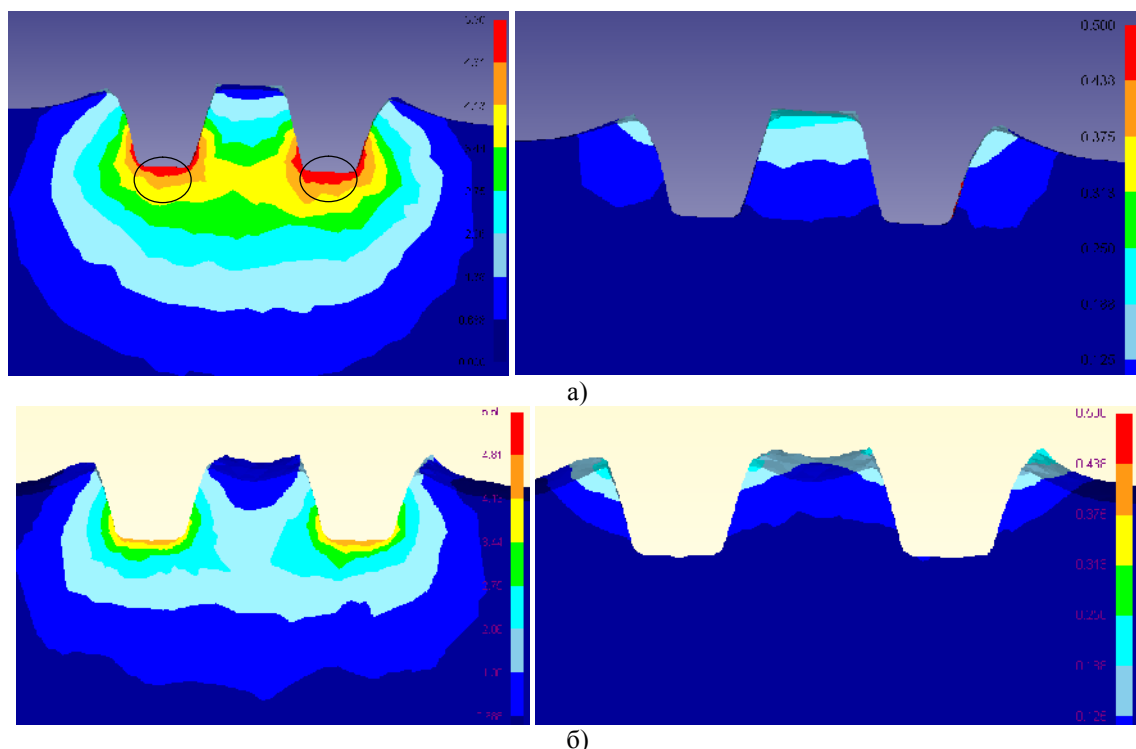


Рис. 4. Распределение эквивалентных деформаций и нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лейтема при СИО резьбы Tr40×6 по целому (а) и по канавке глубиной 0,5 мм (б) формообразования и упрочнения наружных резьб пластическим деформированием

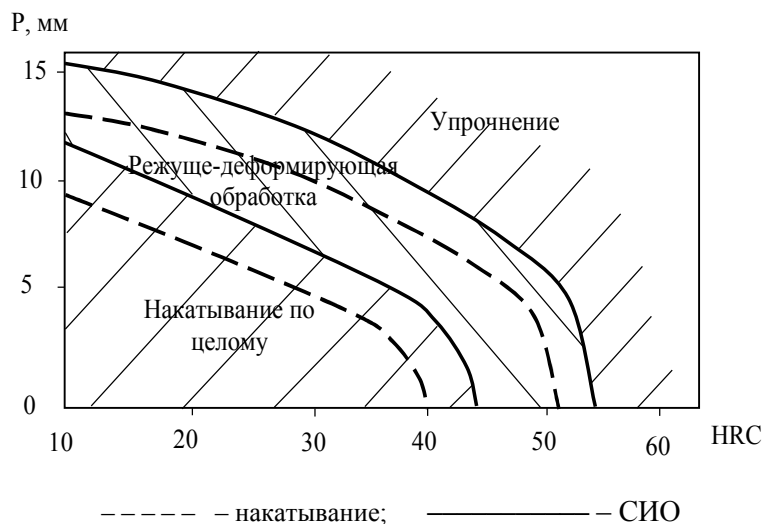


Рис. 5. Области экономической целесообразности применения способов поверхностного

Выбор наиболее рациональной схемы деформирования способствует обеспечению необходимой глубины упрочнения и требуемой степени упрочнения в процессе статико-импульсной обработки резьб. За счёт этого мы наблюдаем значительное повышение эксплуатационных характеристик ответственных тяжело нагруженных резьбовых деталей, в том числе и крупногабаритных. Усовершенствовав схему деформирования

даст возможность повышения значительной стойкости деформирующего инструмента на 150–200 % за счёт снижения сил деформирования.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Киричек А.В., Баринев С.В., Соловьев Д.Л. Разработка параметров для описания гетеро-

генно-упрочненной структуры // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 1/285. С. 63–66.

2. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Библиотека технолога // М.: Машиностроение. 2004. 288 с.

3. Лапин В.В., Писаревский М.И., Самсонов В.В., Сизов Ю.И. Накатывание резьб, червяков, шлицев и зубьев. Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение. 1986. 228 с.

4. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение. 1987. 328 с.

5. Песин М.В. Повышение надежности резьбовых соединений нефтегазовых изделий // Технология машиностроения. 2011. № 9. С. 49–50.

6. Киричек А.В., Афонин А.Н. Исследование напряженно деформированного состояния резьбонакатного инструмента и заготовки методом конечных элементов // СТИН. 2007. №7. С. 21–25.

7. Киричек А.В., Афонин А.Н. Резьбонакатывание. Библиотека технолога. М.: Машиностроение. 2009. 312 с.

8. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Создание гетерогенной структуры материала статико-импульсной обработкой // СТИН. 2007. №12. С. 28–31.

9. Суслов А.Г., Безъязычный В.Ф., Панфилов Ю.В. Инженерия поверхности деталей. М.: Машиностроение. 2008. 320 с.

10. Таурит Г.Э., Пуховский Е.С., Добрянский С.С. Прогрессивные процессы резьбоформирования. Киев: Техніка. 1975. 240 с.

11. Суслов А.Г. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение. 2014. 444 с.

12. Афонин А.Н., Ларин А.И., Макаров А.В. Гетерогенное упрочнение деталей горно-металлургических машин поверхностным пластическим деформированием // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 11. С. 823–827.

13. Киричек А.В. Эффективные технологии дорнования, протягивания и деформирующе-режущей обработки: коллективная монография. М.: Издательский дом «Спектр». 2011. 328 с.

#### Информация об авторах

**Афонин Андрей Николаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры. E-mail: afonin@bsu.edu.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». Россия, 309516, г. Старый Оскол, мкр. Макаренко, 42.

**Мартынов Евгений Михайлович**, аспирант кафедры. E-mail: e.m.martynov@mail.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». Россия, 309516, г. Старый Оскол, мкр. Макаренко, 42.

**Макаров Алексей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент. E-mail: makarov.av@mail.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». Россия, 309516, г. Старый Оскол, мкр. Макаренко, 42.

Поступила в июне 2019 г.

© Афонин А.Н., Мартынов Е.М., Макаров А.В., 2019

**Afonin A.N., \*Martynov E.M., Makarov A.V.**

*Technological institute of Stary Oskol named. A. Ugarov  
(branch of National research technological University "MISIS")  
Russia, 309516, Belgorod region, Stary Oskol, district Makarenko, 42  
\*E-mail: e.m.martynov@mail.ru*

## HETEROGENEOUS HARDENING OF MACHINES PARTS BY SURFACE PLASTIC DEFORMATION

**Abstract.** The main causes of failure of heavily loaded threads are considered. The methods of increasing the efficiency of the equipment due to the method used are proposed. It is found that improving the operational characteristics of the components of mining and metallurgical machinery can be achieved forming heterogeneous-hardened surface layer. Methods of forming heterogeneous structure by surface plastic deformation (SPD) are considered. The importance of identifying the nature of the influence of parameters of heterogeneous hardened layer on the performance of machine parts is indicated. Modeling of process heterogeneous

*hardening of SPD of the finite element method is executed. Recommendations about application of heterogeneous hardening of SPD for hardening the heavy-duty parts are offered. It is found that the use of different methods SPD allows widely vary the degree of depth and the uniformity of the hardening of machine parts. It is found that this increase in life responsible highly loaded parts operating under fatigue loading due to hardening of the heterogeneous surface layer may reach 1.5 times or more.*

**Keywords:** heterogeneous hardening, surface plastic deformation, fatigue strength, simulation, finite elements, mining and metallurgical machinery, quality.

## REFERENCES

1. Kirichek A.V., Barinov S.V., Solov'ev D.L. Development of parameters for the description of a heterogeneous but strengthened structure [Razrabotka parametrov dlya opisaniya geterogenno-uprochnennoj struktury]. Fundamental and applied problems of engineering and technology [Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii]. 2011. № 1/285. Pp. 63–66. (rus)
2. Kirichek A.V., Solov'ev D.L., Lazutkin A.G. Technology and equipment of static-pulse treatment by surface plastic deformation. Technologist library [Tekhnologiya i oborudovanie statiko-impul'snoj obrabotki poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem. Biblioteka tekhnologa]. M.: Mashinostroenie. 2004. 288 p. (rus)
3. Lapin V.V., Pisarevskij M.I., Samsonov V.V., Sizov Yu.I. Rolling threads, worms, splines and teeth [Nakatyvanie rez'b, chervyakov, shlicev i zub'ev]. L.: Mashinostroenie, Leningr. otdelenie. 1986. 228 p. (rus)
4. Odincov L.G. Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation [Uprochnenie i otdelka detalej poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem]. M.: Mashinostroenie. 1987. 328 p. (rus)
5. Pesin M.V. Improving the reliability of threaded connections for oil and gas products [Povyshenie nadezhnosti rez'bovyx soedinenij neftegazovyx izdelij], Mechanical Engineering Technology [Tekhnologiya mashinostroeniya]. 2011. No. 9. Pp. 49–50. (rus)
6. Kirichek A.V., Afonin A.N. Investigation of the stress-strain state of the thread rolling tool and the workpiece by the finite element method [Issledovanie napryazhenno deformirovannogo sostoyaniya rez'bonakatnogo instrumenta i zagotovki metodom konechnykh elementov]. Machines and tools [Stanki i instrumenty']. 2007. No. 7. Pp. 21–25. (rus)
7. Kirichek A.V., Afonin A.N. Library technologist. Thread rolling [Biblioteka tekhnologa. Rez'bonakatyvanie]. M.: Mashinostroenie. 2009. 312 p. (rus)
8. Kirichek A.V., Solov'ev D.L. Creating a heterogeneous structure of the material by static-impulse processing [Sozдание geterogennoj struktury materiala statiko-impul'snoj obrabotkoj]. Machines and tools [Stanki i instrumenty']. 2007. No. 12. Pp. 28–31. (rus)
9. Suslov A.G., Bez'yazychnyj V.F., Panfilov Yu.V. Part Surface Engineering [Inzheneriya poverhnosti detalej]. M.: Mashinostroenie. 2008. 320 p. (rus)
10. Taurit G.E., Puhovskij E.S., Dobryanskij S.S. Progressive threading processes [Progressivnye processy rez'boformirovaniya]. Kiev: Tekhnika. 1975. Pp. 240. (rus)
11. Suslov A.G. Technology and tools for finishing and hardening the processing of parts by surface plastic deformation [Tekhnologiya i instrumenty otlochno-uprochnyayushchej obrabotki detalej po-verhnostnym plasticheskim deformirovaniem]. M.: Mashinostroenie. 2014. 444 p. (rus)
12. Afonin A.N., Larin A.I., Makarov A.V. Heterogeneous hardening of parts of mining and smelting machines by surface plastic deformation [Geterogennoe uprochnenie detalej gorno-metallurgicheskix mashin poverxnostny'm plasticheskim deformirovaniem]. Proceedings of higher educational institutions. Ferrous metallurgy [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Chernaya metallurgiya]. 2015. Vol. 58. No. 11. Pp. 823–827. (rus)
13. Kirichek A.V. Effective technologies for mandible, broaching and deforming-cutting processing [Effektivnye tekhnologii dornovaniya, protyagivaniya i deformiruyushche-rezhushchej obrabotki]: kolektivnaya monografiya. M.: Izdatel'skij dom «Spektr». 2011. 328 p. (rus)

## Information about the authors

**Afonin, Andrey N.** DSc, Professor. E-mail: afonin@bsu.edu.ru. Technological Institute of Stary Oskol named. A. Ugarov (branch of National research technological University "MISIS"). Russia, 309516, Belgorod region, Stary Oskol, district Makarenko, 42.

**Martynov, Evgeny M.** Postgraduate student. E-mail: e.m.martynov@mail.ru Technological Institute of Stary Oskol named. A. Ugarov (branch of National research technological University "MISIS"). Russia, 309516, Belgorod region, Stary Oskol, district Makarenko, 42.

**Makarov, Alexey V.** PhD, Senior lecturer. E-mail: makarov.av@mail.ru. Technological Institute of Sary Oskol named A. Ugarov (branch of National research technological University "MISIS"). Russia, 309516, Belgorod region, Sary Oskol, district Makarenko, 42.

---

*Received in June 2019*

**Для цитирования:**

Афонин А.Н., Мартынов Е.М., Макаров А.В. Схемы деформирования при статико-импульсной обработке тяжело нагруженных резьб // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 106–112. DOI: 10.34031/article\_5da46203295c88.35872410

**For citation:**

Afonin A.N., Martynov E.M., Makarov A.V. Heterogeneous hardening of machines parts by surface plastic deformation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 9. Pp. 106–112. DOI: 10.34031/article\_5da46203295c88.35872410

DOI: 10.34031/article\_5da462c755b439.16983955

<sup>1</sup>Хисамутдинов М.В., <sup>2</sup>Коровин Я.С., <sup>2,\*</sup>Иванов Д.Я.<sup>1</sup>ООО «НИИ МВУС», Таганрог

Россия, 347905, Ростовская область, г. Таганрог, ул. Социалистическая, д. 150-г

<sup>2</sup>Южный федеральный университет, Таганрог

Россия, 347900, Ростовская область, г. Таганрог, ул. Чехова, д. 2, ГСП-284

\*E-mail: donat.ivanov@gmail.com

## РАСШИРЕННЫЙ ИНТЕРФЕЙС ЧЕЛОВЕК-РОБОТ С ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТЬЮ

**Аннотация.** Проблема управления роботами и коалициями роботов является одним из сдерживающих факторов, стоящих на пути внедрения роботов и мультиробототехнических комплексов. Преодоление этой проблемы заключается в повышении уровня автономности роботов, а также совершенствование интерфейсов дистанционного управления роботами. В интерфейсах взаимодействия человека и робота преобладают на данный момент механические органы управления, такие как кнопки, джойстики и сенсорные экраны. Все они требуют от оператора использования движений рук и/или ног. Одним из перспективных направлений развития интерфейсов является использование отслеживания направления и характера взгляда оператора. В статье предложено использование расширенного интерфейса человек-робот с дополненной реальностью, основанное на принципах отслеживания взгляда человека-оператора при анализе видеоданных, поступающих от бортовой видеосистемы робота. Предложена конструкция очков дополненной реальности, отличающейся простотой и доступностью исполнения. В данной конструкции используется типичный смартфон и корпус, который может быть изготовлен с использованием 3D-печати. При этом в конструкции отсутствуют дополнительные источники подсветки глаз оператора, за исключением экрана смартфона. Показан пример реализации программного обеспечения для такого интерфейса.

**Ключевые слова:** отслеживание взгляда, интерфейс человек-робот, дополненная реальность, айтрекинг.

**Введение.** Роботы и коалиции роботов находят все более широкое применение в различных отраслях, переходящих на методологию цифровой экономики. При этом проблема управления роботами и коалициями роботов является одним из сдерживающих факторов, стоящих на пути внедрения роботов и мультиробототехнических комплексов. Можно выделить два основных направления по решению этой проблемы. Первое – повышение автономности роботов за счет применения элементов искусственного интеллекта, мультиагентного и роевого взаимодействия. Второе направление – совершенствование механизмов взаимодействия человека-оператора и управляемого им робота.

В настоящее время элементами управления в интерфейсах человек-робот как правило являются различные комбинации рычагов/джойстиков, кнопок, педалей, сенсорных экранов. То есть человек-оператор использует свои руки (реже ноги) для воздействия на органы управления. Однако использование таких устройств ограничивает объем информации, передаваемый оператором роботу, а также увеличивает время реакции.

Предлагается в качестве органов управления роботом использовать не только тактильный контакт рук и ног оператора с органами управления, но и глаза человека-оператора за счет анализа

направления взгляда оператора, анализа закрытия глаз и времени сосредоточения на отдельном объекте. В качестве основы отображения информации в настоящем проекте предлагается использовать режим совмещения стереоинформации, получаемой с системы стереозрения робота, с дополненной реальностью, что позволит повысить точность позиционирования роботизированной системы и ускорить процесс получения информации от нее.

Современные системы дополненных интерфейсов, использующие отслеживание направления взгляда [1, 2] («Eye gaze tracking», «айтрекинг») основываются на применении сложных систем, состоящих из одной или нескольких камер, систем дополнительной подсветки и компенсации бликов, что приводит к значительной стоимости готовых устройств и тем самым ограничивает области применения.

**Обзор известных подходов.** В настоящее время активно ведутся исследования в области детектирования зрачков человека, определения направления взгляда и областей интереса пользователя по видеопоследовательности, получаемой с цифровой камеры.

Системы, построенные на данном принципе, получают набор изображений с камеры, анализируя полученную последовательность определяют положение и перемещение зрачков пользователя,

и используя данные калибровки определяют направление взгляда или область интереса пользователя. Камера должна быть расположена таким образом, чтобы глаз находился в прямой видимости без перекрытия посторонними объектами. При этом существует два варианта расположения камеры: в очках, или любом другом креплении недалеко от глаз, либо на некотором расстоянии от пользователя. В первом случае может быть достигнута более высокая точность определения положения зрачка из-за того, что камера находится в непосредственной близости от глаз, но при этом требуется специализированное оборудование (очки, миниатюрная камера, проводной или беспроводной канал передачи видео). Во втором случае, область глаз на изображении имеет намного меньший размер что приводит к необходимости использования более затратных в плане вычислений алгоритмов обработки изображений, с другой стороны, существует возможность использования обычных веб-камер, напрямую подключенных к вычислительному устройству для обработки получаемого видеопотока.

В любом случае, использование отдельных камер для решения поставленной задачи намного более удобно для пользователя по сравнению с системами, требующими применения специальных датчиков, которые крепятся на лице пользователя.

С учетом же активного развития алгоритмов и методов компьютерного зрения, системы, использующие цифровые камеры, удешевляются и могут быть использованы в более широком круге задач, в том числе и в задачах построения интеллектуального интерфейса дистанционного управления.

На точность определения центров зрачков, а, следовательно, и области интереса пользователя, влияет два основных фактора: разрешение получаемого изображения, и условия съемки. Для повышения разрешения можно либо использовать более дорогостоящие камеры, либо располагать их ближе к лицу пользователя, при этом оба решения приводят к удорожанию системы в целом.

К условиям съемки следует отнести освещенность снимаемой сцены. При получении видеопоследовательности может использоваться как естественный свет (пассивное решение), так и дополнительная инфракрасная подсветка (активная подсветка) [3, 4]. При работе с естественным светом возникает множество проблем с определением центра зрачка глаза из-за бликов света. На рисунке 1 приведены примеры получаемых изображений при различных направлениях взгляда. Из рисунка видно, что при взгляде вперед блик может занимать значительную часть зрачка, что приведет к смещению детектируемого центра зрачка относительно реального, а, следовательно, к ошибке в оценке области интереса пользователя.

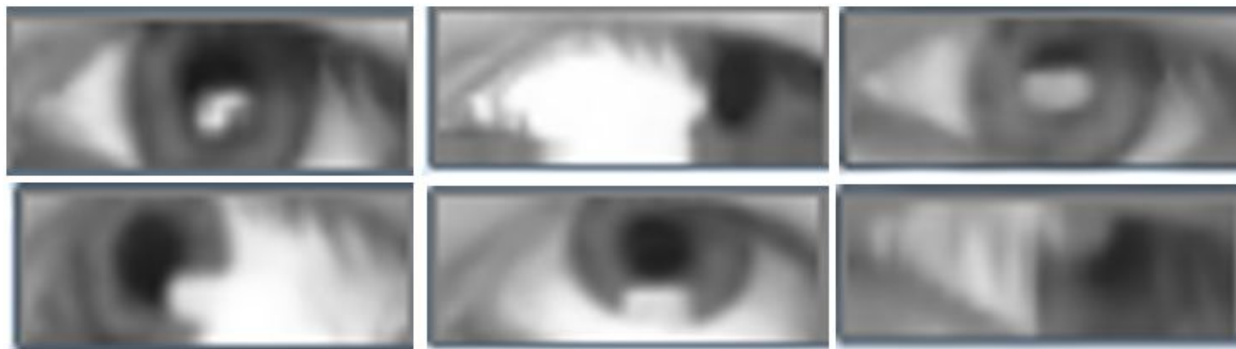


Рис. 1. Блики света в области зрачка при различном направлении взгляда

Избавиться от негативного влияния бликов света на точность определения центра зрачка можно путем использования инфракрасной подсветки [5]. Во многих исследовательских работах и промышленных решениях активно применяют активную подсветку для достижения высокой точности детектирования. Наиболее оптимальным решением является использование инфракрасного источника света с длиной волны около 880 нм, которая невидима для глаза и может быть захвачена промышленными камерами [6]. Но даже с учетом использования инфракрасной подсветки остаются проблемы, которые необхо-

димо решить, например, изменяющаяся в зависимости от положения источника света засветка области зрачка на изображении [3, 7, 8].

Для получения положения зрачка из видеопоследовательности и определения направления взгляда человека было разработано множество методов. Эти методы делятся на две основные группы [9, 10]: appearance-based [9–12] и feature-based [11, 13]. Также существуют model-based решения, предложенные в работах [4, 8].

Appearance-based методы напрямую вычисляют особенности на изображении глаза и используют функцию преобразования полученных особенностей в область просматриваемой сцены.



Такие методы основаны на использовании: многослойных нейронных сетей [14], линейной интерполяции [15], различного рода регрессий: линейной [12], Гаусса [16], случайных деревьев [11], Neighborhood Approximation Forests [17]. Набор обучающих изображений для этих методов получался путем регистрации изображений глаз в момент, когда пользователь смотрит на определенную точку экрана.

Feature-based методы анализируют изображение глаза для выявления определенных характеристик, например, самого темного пикселя, который отвечает за зрачок или радужку. Использование инфракрасной подсветки упрощает этот процесс за счет усиления контраста между радужной оболочкой и зрачком глаза [6]. Большинство методов данной группы используют сегментацию изображений [18, 19]. В процессе обработки изображение приводится к формату градации серого и подвергается пороговой бинаризации для получения бинарного изображения, на котором зрачок представляет собой темную область. Порог определяется экспериментально для конкретных условий съемки. Центр масс темной области на изображении и будет представлять собой центр зрачка [19]. При обработке изображений, имеющих низкое разрешение или низкую контрастность, выполняют нормирование гистограммы яркости, что приводит к улучшению контрастности анализируемого изображения и позволяет подчеркнуть детали изображения. Еще одним представителем данной группы методов является работа [20] в которой для поиска центра зрачка используется векторное поле градиентов на изображении и отношение между градиентами в каждой точке изображения и в предполагаемом центре зрачка. Центр зрачка представляет собой точку пересечения наибольшего количество векторов градиентов.

Model-based алгоритмы выполняют поиск наиболее подходящей модели на изображении. При работе алгоритмов данной группы производится поиск объектов круговой или эллиптической формы, которые наиболее точно описывают форму зрачка при выбранном ракурсе камеры. При нахождении подобного объекта на изображении можно вычислить центр зрачка, который будет находиться в центре данного объекта. Такой подход позволяет достаточно точно выделить зрачок на изображении, и сделать это даже в случаях, когда зрачок частично перекрыт ресницами. Недостатками же такого подхода является высокая вычислительная сложность алгоритма, что не позволяет использовать его в режиме реального времени. Кроме того, model-

based алгоритмы могут находить локальные минимумы, тем самым некорректно находя центр зрачка.

Существуют также гибридные алгоритмы [13], которые совмещают в себе feature- и model-based решения. К этой группе относятся: алгоритм Starburst [13], выполняющий поиск набора точек, описывающий контур зрачка с помощью RANSAC метода [21].

### **Предлагаемый метод организации интеллектуального интерфейса дистанционного управления системой стереозрения робота посредством глаз оператора**

Для организации интеллектуального интерфейса дистанционного управления системой стереозрения робота посредством глаз оператора предлагается использовать очки, состоящие из специального корпуса, с устанавливаемым в него Android смартфоном. Такие очки могут выполнять следующие функции:

- получать видеопоследовательность с фронтальной камеры смартфона для определения координат центра зрачка;
- отображать интересующий пользователя контент, например, видео из галереи устройства;
- определять точку на экране смартфона, в которую смотрит пользователь;
- выполнять подстройку яркости экрана для повышения точности определения центра зрачков, а, следовательно, точности определения областей интереса на экране смартфона;
- записывать получаемые в реальном времени данные во внутреннюю память устройства;
- передавать получаемые данные по беспроводному каналу связи.

Предлагаемое решение имеет ряд преимуществ по отношению к существующим системам оценки областей интереса пользователя. Смартфон выполняет все необходимые подзадачи: захват видео с фронтальной камеры, подстройка яркости внутри корпуса очков, отображение видеопоследовательности или любой другой информации на экране, обработка, хранение и передача данных. Следовательно, отпадает необходимость в использовании набора, состоящего из специальных очков, дополнительных цифровых камер, ноутбука или персонального компьютера для выполнения расчетов. В результате это приводит к снижению стоимости итоговой системы и возможности применения подобных систем при решении широкого спектра задач, так как нет необходимости в применении узкоспециализированного и дорогостоящего оборудования. Даже смартфона начального уровня достаточно для выполнения всех необходимых расчетов в режиме реального времени.

Рассмотрим структуру предлагаемой системы. Система состоит из корпуса, который крепится на голову пользователя, и смартфона, выполняющего роль основного вычислительного устройства. На рисунке 2 показан корпус, с установленным смартфоном. Для установки смарт-

фона в правой части корпуса предусмотрена специальная прорезь, предназначенная для смартфонов стандартной толщины. Поскольку в корпус могут быть установлены телефоны, имеющие диагональ более 4.5 дюймов, на дальней стенке корпуса предусмотрены фиксаторы, удерживающие смартфон.

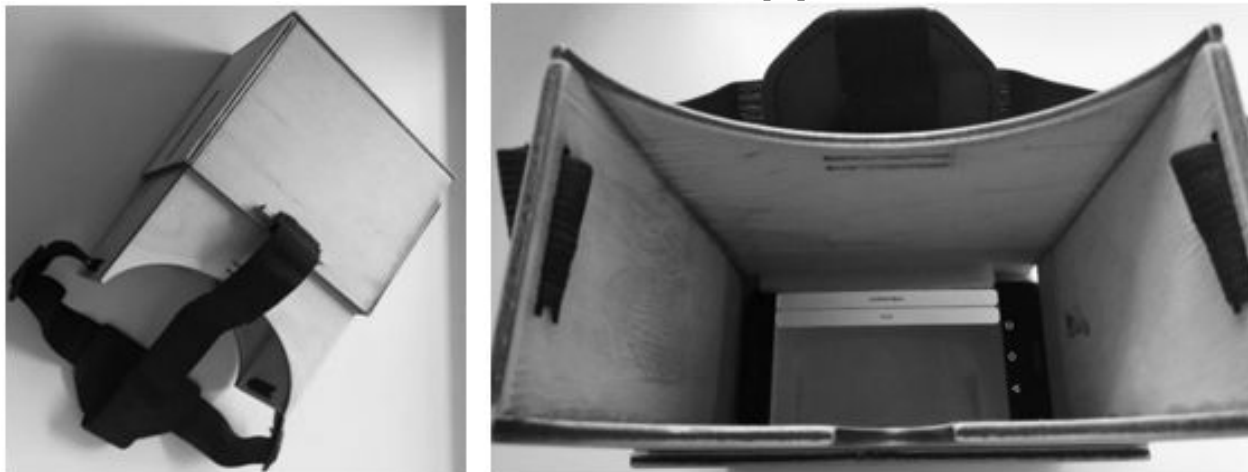


Рис. 2. Конструкция устройства: корпус (слева), корпус с установленным смартфоном (справа)

Корпус имеет раздвижную конструкцию для корректировки расстояния между глазами оператора и экраном смартфона, что сделано для подстройки системы под зрение человека. Варианты

с минимальным и максимальным расстоянием показаны на рисунке 3. Ремень используется для фиксации устройства на голове пользователя.



Рис. 3. Изменение длины корпуса устройства

Корпус устройства может быть напечатан на 3D принтере, что вкупе с использованием смартфона на платформе Android позволит упростить процесс сборки подобных систем и расширить области их применения.

Рассмотрим порядок работы с предложенной системой. На первом этапе на смартфон устанавливается специальное приложение, предназначенное для отображения видеоконтента, отслеживания областей интереса, обработки, хранения и передачи полученных результатов. В этом же приложении производится настройка основных блоков алгоритма обработки изображений (разрешение изображений, получаемых с фронтальной камеры; использование нейронных

сетей для детектирования области глаза на изображении и особых точек вокруг глаза и т.д.).

После установки и настройки приложения, смартфон фиксируется в корпусе и устройство крепится на голове пользователя. Для запуска приложения в таком режиме может использоваться обычный bluetooth джойстик, например, VR Box 2.

При первом запуске пользователю необходимо откалибровать систему, для этого на отдельном экране приложения последовательно отображается набор точек, при взгляде на каждую из них, пользователю необходимо нажать на джойстике кнопку. При нажатии на кнопку система запоминает положение зрачка в момент,

когда пользователь смотрит на отображаемую точку. Сохраненные данные в дальнейшем будут использованы для определения областей интереса на показываемом видео. По завершению калибровки пользователь может приступить к использованию системы.

Разработанное программное обеспечение предлагает выбрать пользователю видео из галереи устройства и начать его показ (рис. 4).



Рис. 4. Выбор видеофайла из галереи устройства

Во время показа видео на экране смартфона отображается маркер, указывающий на область интереса пользователя, и производится запись этой области во внутреннюю память телефона.

Поскольку в корпусе не предполагается дополнительного источника света, то за регулировку уровня освещенности отвечает разработанное приложение. Получая кадр с фронтальной камеры, алгоритм производит оценку средней яр-

кости изображения. В случае показа затемненного видео, света экрана может быть недостаточно для корректного детектирования центра зрачка, а, следовательно и определения области интереса пользователя. В таком случае по краям экрана отображается специальная рамка, задача которой состоит в подстройке яркости внутри корпуса устройства. На рисунке 5 показан пример кадра, с отображенной рамкой для подстройки яркости изображения.

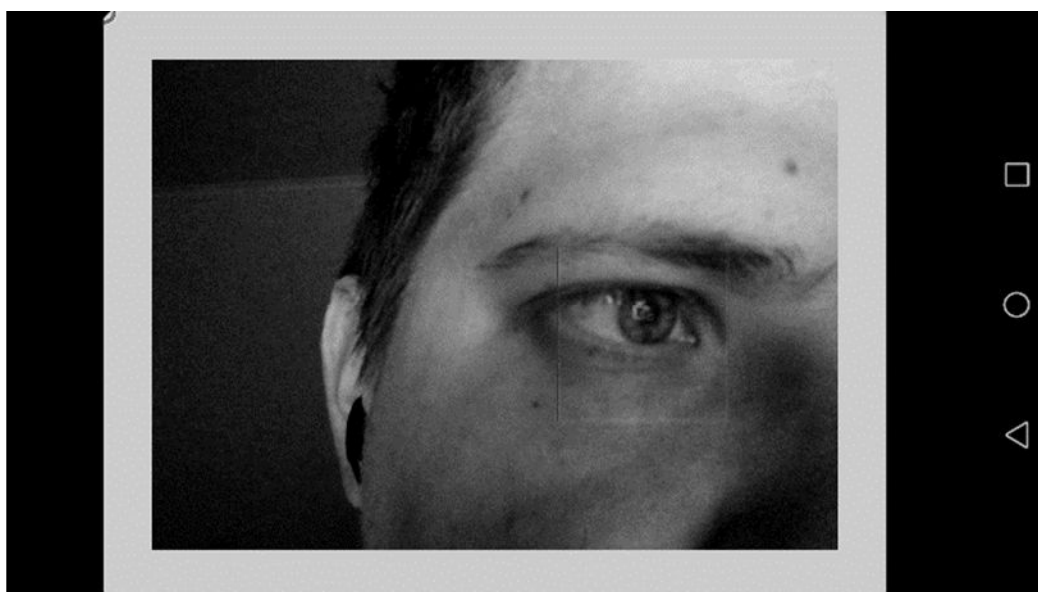


Рис. 5. Отображение рамки для адаптивной подстройки яркости

**Выводы.** В статье предложено использование расширенного интерфейса человек-робот с дополненной реальностью, основанное на принципах отслеживания взгляда человека-оператора при анализе видеоданных, поступающих от бортовой видеосистемы робота. Предложена конструкция очков дополненной реальности, отличающейся простотой и доступностью исполнения. Показан пример реализации программного обеспечения для такого интерфейса.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение расширенного интерфейса человек-робот с дополненной реальностью является перспективным направлением исследований. Дальнейшие направления исследований будут направлены на совершенствование алгоритма отслеживания взгляда оператора.

**Источник финансирования.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект №18-29-03225.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фроимсон М.И. и др. Система определения направления взгляда пользователя в режиме реального времени // Спецтехника и связь. 2013. № 3. С. 32–34.
2. Малин И. Отслеживание направления взгляда в реальном времени без использования специальной видеоаппаратуры // Труды «23-й международной конференция по компьютерной графике и зрению». Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Дальневосточный федеральный университет, 2013. С. 294–297.
3. Hansen D.W., Ji Q. In the eye of the beholder: A survey of models for eyes and gaze // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. IEEE, 2009. Vol. 32. № 3. Pp. 478–500.
4. Lupu R.G., Ungureanu F., Siriteanu V. Eye tracking mouse for human computer interaction // 2013 E-Health and Bioengineering Conference (EHB). 2013. P. 1–4.
5. Zhu Z., Ji Q. Robust real-time eye detection and tracking under variable lighting conditions and various face orientations // Comput. Vis. Image Underst. Elsevier, 2005. Vol. 98. № 1. Pp. 124–154.
6. Morimoto C.H., Mimica M.R.M. Eye gaze tracking techniques for interactive applications // Comput. Vis. image Underst. Elsevier, 2005. Vol. 98. № 1. Pp. 4–24.
7. van der Geest J.N., Frens M.A. Recording eye movements with video-oculography and scleral search coils: a direct comparison of two methods // J. Neurosci. Methods. Elsevier, 2002. Vol. 114. № 2. Pp. 185–195.
8. Ferhat O., Vilariño F. Low cost eye tracking // Comput. Intell. Neurosci. Hindawi Publishing Corp., 2016. Vol. 2016. Pp. 17.
9. Chennamma H.R., Yuan X. A survey on eye-gaze tracking techniques // arXiv Prepr. arXiv1312.6410. 2013. P. 388–393.
10. Lu F. et al. A head pose-free approach for appearance-based gaze estimation // BMVC. 2011. P. 1–11.
11. Wang Y. et al. Appearance-based gaze estimation using deep features and random forest regression // Knowledge-Based Syst. Elsevier. 2016. Vol. 110. P. 293–301.
12. Lu F. et al. Inferring human gaze from appearance via adaptive linear regression // 2011 International Conference on Computer Vision. 2011. Pp. 153–160.
13. Li D., Winfield D., Parkhurst D.J. Starburst: A hybrid algorithm for video-based eye tracking combining feature-based and model-based approaches // 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)-Workshops. 2005. Pp. 79–87.
14. Stiefelhagen R., Yang J., Waibel A. Tracking eyes and monitoring eye gaze // Proc. Workshop on Perceptual User Interfaces. 1997. Pp. 98–100.
15. Sugano Y. et al. Appearance-based gaze estimation with online calibration from mouse operations // IEEE Trans. Human-Machine Syst. IEEE, 2015. Vol. 45. № 6. Pp. 750–760.
16. Williams O., Blake A., Cipolla R. Sparse and Semi-supervised Visual Mapping with the S<sup>3</sup>GP // 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06). 2006. Vol. 1. Pp. 230–237.
17. Lai C.-C. et al. Appearance-based gaze tracking with free head movement // 2014 22nd International Conference on Pattern Recognition. 2014. Pp. 1869–1873.
18. Kim S.I. et al. An algorithm to detect a center of pupil for extraction of point of gaze // The 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 2004. Vol. 1. Pp. 1237–1240.
19. Goni S. et al. Robust algorithm for pupil-glint vector detection in a video-oculography eye-tracking system // Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition. 2004. ICPR 2004. 2004. Vol. 4. Pp. 941–944.
20. Timm F., Barth E. Accurate eye centre localisation by means of gradients. // Visapp. 2011. Vol. 11. Pp. 125–130.
21. Fischler M.A., Bolles R.C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography // Commun. ACM. ACM, 1981. Vol. 24. № 6. Pp. 381–395.

## Информация об авторах

**Хисамутдинов Максим Владимирович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. E-mail: xisamutdinov86@mail.ru. Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных и управляющих систем» (ООО "НИИ МВУС"). Россия, 347905, г. Таганрог, ул. Социалистическая, д. 150-г.

**Коровин Яков Сергеевич**, кандидат технических наук, директор. E-mail: korovin\_yakov@mail.ru. НИИ многопроцессорных вычислительных систем им. академика А.В. Каляева Южного федерального университета, Россия, 347928, г. Таганрог, Ростовская область, ул. Чехова, 2, ГСП-284.

**Иванов Донат Яковлевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. E-mail: donat.ivanov@gmail.com. НИИ многопроцессорных вычислительных систем им. академика А.В. Каляева Южного федерального университета, Россия, 347928, г. Таганрог, Ростовская область, ул. Чехова, 2, ГСП-284.

Поступила в июле 2019 г.

© Хисамутдинов М.В., Коровин Я.С., Иванов Д.Я., 2019

<sup>1</sup>*Khisamutdinov M.V.*, <sup>2</sup>*Korovin I.S.*, <sup>2,\*</sup>*Ivanov D.Ya.*

<sup>1</sup>ООО "НИИ МВУС"

<sup>1</sup>Russia, 347905, Rostov region, Taganrog, Socialisticheskaya str., 150-g.

<sup>2</sup>Southern Federal University, Taganrog

<sup>2</sup>Russia, 347900, Rostov region, Taganrog, Chekhov str., 2, GSP-284

\*E-mail: donat.ivanov@gmail.com

## ADVANCED HUMAN-ROBOT INTERFACE WITH AUGMENTED REALITY

**Abstract.** *The problem of managing robots and robots coalitions is one of the limiting factors that stand in the way of the introduction of robots and multi-robot systems. Overcoming this problem is to increase the level of autonomy of robots, as well as the improvement of remote control interfaces of robots. At the interfaces of human and robot interaction, mechanical controls, such as buttons, joysticks and touch screens, prevail at the moment. All of them require the operator to use hand and / or foot movements. One of the promising areas of interface development is the use of tracking the direction and nature of the operator's gaze. The article proposes the use of an extended human-robot interface with augmented reality, based on the principles of tracking the gaze of a human operator when analyzing video data from the on-board video system of the robot. The design of augmented reality glasses, characterized by simplicity and affordability of performance, is proposed. This design uses a typical smartphone and case, which can be made using 3D printing. At the same time, there are no additional sources of illumination of the operator's eyes, with the exception of the smartphone screen. An example of software implementation for such an interface is shown.*

**Keywords:** *eye gaze detection, human-robot interface, augmented reality.*

## REFERENCES

1. Froimson M.I. et al. System for determining the direction of the user's gaze in real time [Sistema opredeleniya napravleniya vzglyada pol'zovatelya v rezhime real'nogo vremeni]. Spetstekhnika i svyaz'. Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu" Spetstekhnika i svyaz'", 2013. No. 3. Pp. 32–34. (rus)
2. Malin I. Tracking the direction of the gaze in real time without using special video equipment [Otslezhivanie napravleniya vzglyada v real'nom vremeni bez ispol'zovaniya spetsial'noy videoapparatury]. Trudy «23-y mezhdunarodnoy konferentsii po komp'yuternoy grafike i zreniyu». Institut avtomatiki i protsessov upravleniya DVO RAN, Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet, 2013. Pp. 294–297. (rus)
3. Hansen D.W., Ji Q. In the eye of the beholder: A survey of models for eyes and gaze. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. IEEE, 2009. Vol. 32. No. 3. P. 478–500.
4. Lupu R.G., Ungureanu F., Siriteanu V. Eye tracking mouse for human computer interaction. 2013 E-Health and Bioengineering Conference (EHB). 2013. Pp. 1–4.
5. Zhu Z., Ji Q. Robust real-time eye detection and tracking under variable lighting conditions and various face orientations. Comput. Vis. Image Underst. Elsevier. 2005. Vol. 98. No. 1. Pp. 124–154.
6. Morimoto C.H., Mimica M.R.M. Eye gaze tracking techniques for interactive applications. Comput. Vis. image Underst. Elsevier, 2005. Vol. 98. No. 1. Pp. 4–24.
7. van der Geest J.N., Frens M.A. Recording eye movements with video-oculography and scleral search coils: a direct comparison of two methods. J. Neurosci. Methods. Elsevier, 2002. Vol. 114. No. 2. Pp. 185–195.

8. Ferhat O., Vilariño F. Low cost eye tracking. *Comput. Intell. Neurosci.* Hindawi Publishing Corp. 2016. Vol. 2016. Pp. 17.
9. Chennamma H.R., Yuan X. A survey on eye-gaze tracking techniques. *arXiv Prepr. arXiv1312.6410*. 2013. Pp. 388–393.
10. Lu F. et al. A head pose-free approach for appearance-based gaze estimation. *BMVC*. 2011. Pp. 1–11.
11. Wang Y. et al. Appearance-based gaze estimation using deep features and random forest regression. *Knowledge-Based Syst.* Elsevier. 2016. Vol. 110. Pp. 293–301.
12. Lu F. et al. Inferring human gaze from appearance via adaptive linear regression. 2011 International Conference on Computer Vision. 2011. Pp. 153–160.
13. Li D., Winfield D., Parkhurst D.J. Starburst: A hybrid algorithm for video-based eye tracking combining feature-based and model-based approaches. 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)-Workshops. 2005. Pp. 79–87.
14. Stiefelhagen R., Yang J., Waibel A. Tracking eyes and monitoring eye gaze. *Proc. Workshop on Perceptual User Interfaces*. 1997. Pp. 98–100.
15. Sugano Y. et al. Appearance-based gaze estimation with online calibration from mouse operations. *IEEE Trans. Human-Machine Syst.* IEEE, 2015. Vol. 45. No. 6. Pp. 750–760.
16. Williams O., Blake A., Cipolla R. Sparse and Semi-supervised Visual Mapping with the S<sup>3</sup>GP. 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06). 2006. Vol. 1. P. 230–237.
17. Lai C.-C. et al. Appearance-based gaze tracking with free head movement. 2014 22nd International Conference on Pattern Recognition. 2014. Pp. 1869–1873.
18. Kim S.I. et al. An algorithm to detect a center of pupil for extraction of point of gaze. *The 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 2004. Vol. 1. Pp. 1237–1240.
19. Goni S. et al. Robust algorithm for pupil-glint vector detection in a video-oculography eye-tracking system. *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004*. 2004. Vol. 4. Pp. 941–944.
20. Timm F., Barth E. Accurate eye centre localisation by means of gradients. *Visapp*. 2011. Vol. 11. Pp. 125–130.
21. Fischler M.A., Bolles R.C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Commun. ACM. ACM*, 1981. Vol. 24. No. 6. Pp. 381–395.

*Information about the authors*

**Khislamutdinov, Maxim V.** PhD, Senior Researcher. E-mail: xislamutdinov86@mail.ru. OOO "NII MVUS". Russia, 347928, Taganrog, Socialisticheskaya st, 150-g.

**Korovin, Iakov S.** PhD, Director. E-mail: korovin\_yakov@mail.ru. Southern Federal University. Russia, 347928, Taganrog, Chehova st, 2, GSP-284.

**Ivanov, Donat Ya.** PhD, Senior Researcher. E-mail: donat.ivanov@gmail.com. Southern Federal University. Russia, 347928, Taganrog, Chehova st, 2, GSP-284.

---

*Received in July 2019***Для цитирования:**

Хисамутдинов М.В., Коровин Я.С., Иванов Д.Я. Расширенный интерфейс человек-робот с дополненной реальностью // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 113–120. DOI: 10.34031/article\_5da462c755b439.16983955

**For citation:**

Khislamutdinov M.V., Korovin I.S., Ivanov D.Ya. Advanced human-robot interface with augmented reality. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 9. Pp. 113–120. DOI: 10.34031/article\_5da462c755b439.16983955



DOI: 10.34031/article\_5da463e3b2fce8.88813745

**\*Семикопенко И.А., Латышев С.С., Воронов В.П., Беляев Д.А.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

\*E-mail: semickopenko.i@yandex.ru

## КИНЕТИКА РАЗРУШЕНИЯ ЧАСТИЦ МАТЕРИАЛА В ДЕЗИНТЕГРАТОРЕ В РАМКАХ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

**Аннотация.** Дезинтеграторы являются одним из видов оборудования, которое имеет возможность совмещения помола, смешения и активации материалов средней прочности и твердости. Преимуществами дезинтеграторов являются возможность встраивания в существующие технологические схемы и получение продукта помола с заданным гранулометрическим составом, а также простота конструкции. В данной статье дан анализ кинетики разрушения частиц в междурядных пространствах камеры помола дезинтегратора. Представлена схема камеры помола дезинтегратора. Математическое описание ударного разрушения частиц в камере помола рассмотрено в рамках неоднородного Марковского процесса. Представлено уравнение, описывающее изменение статистической величины  $m(t)$  – математического ожидания. Высказано предположение, что интенсивность Марковского процесса ( $\lambda$ ) пропорциональна частоте ( $\omega$ ) вращения роторов, умноженной на функцию времени  $f(t)$ . Данная функциональная зависимость определяется из условия одинакового времени взаимодействия  $\tau_0$  частицы материала в междурядных пространствах камеры помола. Если предположить, что вероятность разрушения частиц материала при взаимодействии с каждым ударным элементом является постоянной величиной, тогда величина математического ожидания  $m(t)$  будет пропорциональна числу частиц  $n(t)$ . Полученное соотношение (11) определяет закон изменения числа частиц при прохождении каждого ряда ударных элементов. В статье выведены формулы для определения изменения числа частиц в каждом междурядном пространстве камеры помола. Полученные соотношения (24) и (25) описывают кинетику измельчения частиц материала в камере помола дезинтегратора в рамках статистического подхода и дают возможность определения взаимосвязи между размером исходных частиц и размером продукта помола.

**Ключевые слова:** дезинтегратор, разрушение, частица, камера помола.

**Введение.** Дезинтеграторы являются одним из основных видов оборудования в промышленности строительных материалов, обеспечивающего совмещение процессов помола и смешения различных компонентов [1].

Математическое описание ударного разрушения частиц материала в камере помола дезинтегратора рассмотрим в рамках неоднородного Марковского процесса [2].

Основываясь на представлении о неоднородном Марковском процессе «рождения», запишем следующее уравнение, описывающее изменение статистической величины  $m(t)$  – математического ожидания [3]:

$$\frac{dm(t)}{dt} = \lambda \cdot m(t), \quad (1)$$

где  $\lambda$  – интенсивность Марковского процесса. При определении зависимости величины  $\lambda$  от времени будем исходить из предположения, что данная величина пропорциональна частоте вращения  $\omega$  роторов дезинтегратора, умноженной на функцию времени  $f(t)$ :

$$\lambda(t) = k \cdot \omega \cdot f(t), \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, который зависит от формы и размера ударных элементов ротора дезинтегратора.

Функциональную зависимость  $f(t)$  можно найти из условия того, что конструктивное расположение ударных элементов роторов дезинтегратора (рисунок 1) способствует тому, что все частицы материала подвергаются ударному взаимодействию в течение времени  $\tau_0$  нахождения в междурядном пространстве (ячейке). На основании сказанного имеем:

$$f(t) = 1 - \frac{t}{\tau_0}. \quad (3)$$

Если предположить, что вероятность разрушения частиц материала при ударном взаимодействии с каждым ударным элементом является постоянной величиной, тогда величина математического ожидания будет пропорциональна числу частиц материала  $n(t)$ . На основании сказанного уравнение (1) с учетом (2) и (3) примет вид:

$$\frac{dn(t)}{dt} = k \cdot \omega \cdot \left(1 - \frac{t}{\tau_0}\right) \cdot n(t). \quad (4)$$

Решение уравнения (4) должно удовлетворять начальному условию:

$$n(t = 0) = n_0, \quad (5)$$

здесь  $n_0$  – начальное число частиц, поступающее на первый ряд ударных элементов.

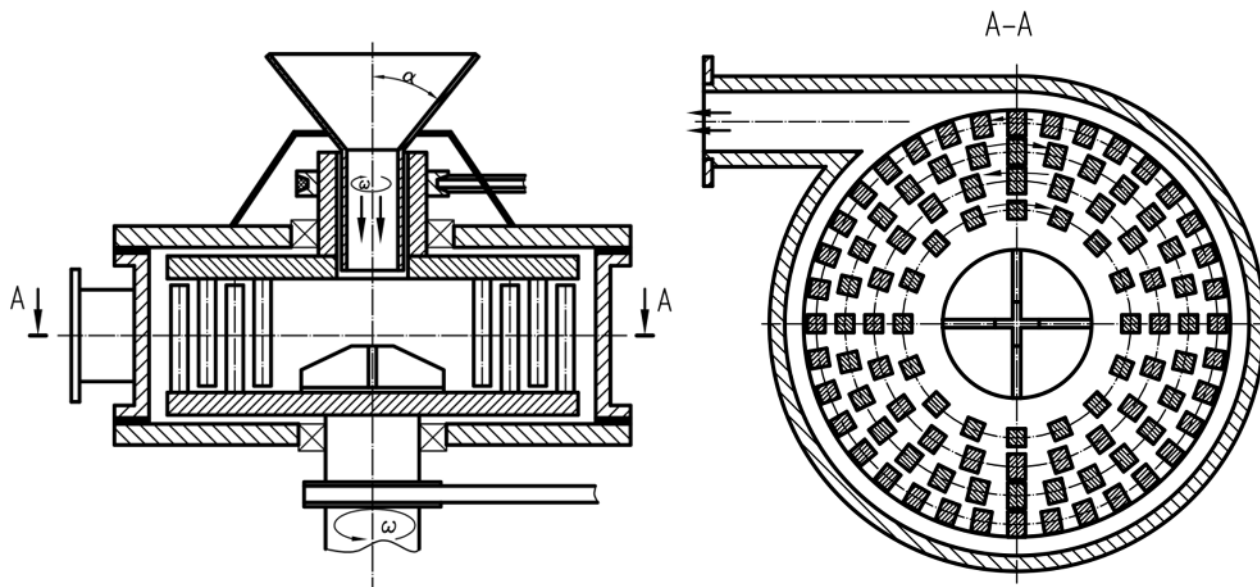


Рис. 1. Схема камеры помола дезинтегратора

Значение величины  $n_0$  можно найти на основании следующих соотношений (рис. 1):

$$n_0 \cdot \frac{\pi d_0^3}{6} = Q_0, \quad (6)$$

$$Q_0 = (2 \cdot R_{ш} \cdot \beta_0)^{\frac{5}{2}} \cdot \tau_0 \cdot \sqrt{\frac{g}{tg\alpha}}, \quad (7)$$

$$n_0 = \frac{6Q_0}{\pi d_0^3}, \quad (8)$$

$$\beta_0 = \left( \frac{\Omega^2 h^2 tg\alpha \varphi^2}{4R_{ш}g} \right)^{\frac{1}{5}}, \quad (9)$$

где  $d_0$  – среднее значение диаметра частицы загружаемого материала;  $Q_0$  – пропускная способность;  $R_{ш}$  – радиус трубы шнека;  $h$  – шаг шнека;  $\Omega$  – частота вращения шнека;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\alpha$  – угол наклона стенки бункера к вертикали.

Интегрирование уравнения (4) приводит к следующему результату:

$$\ln(n(t)) = k \cdot \omega \cdot \left( t - \frac{t^2}{2\tau_0} \right) + \ln const. \quad (10)$$

Применив равенство (5) к (10) находим:

$$const = n_0. \quad (11)$$

Подстановка (11) в (10) приводит к результату

$$n(t) = n_0 \exp \left( k \cdot \omega \cdot \left( t - \frac{t^2}{2\tau_0} \right) \right). \quad (12)$$

Полученное соотношение (12) определяет закон изменения числа частиц при прохождении каждого ряда ударных элементов.

Число частиц, образовавшихся после взаимодействия с ударными элементами первого ряда ударных элементов:

$$n_{k1} = n(t = \tau_0) = n_0 \exp \left( \frac{k \cdot \omega \cdot \tau_0}{2} \right). \quad (13)$$

Изменение числа частиц материала в между-рядном пространстве первого и второго рядов определяется формулой (12), в которой в качестве  $n_0$  необходимо подставить (13):

$$n_2(t) = n_0 \cdot \exp \left( \frac{k \cdot \omega \cdot \tau_0}{2} \right) \cdot \exp \left( k \cdot \omega \cdot \left( t - \frac{t^2}{2\tau_0} \right) \right). \quad (14)$$

На основании (14) число частиц, образовавшихся после взаимодействия с ударными элементами второго ряда:

$$n_{k2} = n_2(t = \tau_0) = n_0 \cdot \exp(k \cdot \omega \cdot \tau_0). \quad (15)$$

Изменение числа частиц материала в между-рядном пространстве второго и третьего ряда ударных элементов дезинтегратора также будет определяться формулой (12), в которой необходимо сделать следующую замену:

$$n_0 \rightarrow n_{k2} = n_0 \exp(k \cdot \omega \cdot \tau_0), \quad (16)$$

поэтому с учетом (16) формула (12) принимает вид:

$$n_3(t) = n_0 \cdot \exp(k \cdot \omega \cdot \tau_0) \cdot \exp \left( k \cdot \omega \cdot \left( t - \frac{t^2}{2\tau_0} \right) \right). \quad (17)$$

На основании (17) число частиц материала на выходе с третьего ряда ударных элементов камеры помола дезинтегратора будет равно:

$$n_{k3} = n_3(t = \tau_0) = n_0 \cdot \exp \left( \frac{3}{2} \cdot k \cdot \omega \cdot \tau_0 \right). \quad (18)$$

Изменение числа частиц материала в пространстве между третьим и четвертым рядом ударных элементов можно найти, если в формуле (12) произвести очевидную замену:

$$n_0 \rightarrow n_3(t = \tau_0) = n_{k3} = n_0 \exp \left( \frac{3}{2} \cdot k \cdot \omega \cdot \tau_0 \right). \quad (19)$$

Подстановка (19) в (12) приводит к соотношению

$$n_4(t) = n_0 \cdot \exp\left(\frac{3}{2} \cdot k \cdot \omega \cdot \tau_c\right) \cdot \exp\left(k \cdot \omega \left(t - \frac{t^2}{2\tau_0}\right)\right). \quad (20)$$

На основании (20) находим число частиц материала на выходе с последнего ряда ударных элементов камеры помола дезинтегратора:

$$n_k = n_4(t = \tau_0) = n_0 \cdot \exp(2k \cdot \omega \cdot \tau_0). \quad (21)$$

С другой стороны, значение числа  $n_k$  в готовом продукте на выходе из камеры помола дезинтегратора можно найти на основании очевидного равенства:

$$\frac{\pi d_k^3}{6} \cdot n_k = V_k, \quad (22)$$

где  $d_k$  – средний размер (диаметр) готового продукта в объёме  $V_k$ .

На основании (22):

$$n_k = \frac{6V_k}{\pi d_k^3}. \quad (23)$$

Подстановка (23) в (21) с учетом (8) позволяет получить соотношение:

$$\frac{6V_k}{\pi d_k^3} = \frac{6Q_0}{\pi d_0^3} \cdot \exp(2k \cdot \omega \cdot \tau_0). \quad (24)$$

На основании (24) находим:

$$d_k = \xi \cdot d_0, \quad (25)$$

где введено следующее обозначение:

$$\xi = \sqrt[3]{\frac{V_k}{Q_0}} \cdot \exp\left(-\frac{2}{3} k \cdot \omega \cdot \tau_0\right). \quad (26)$$

Таким образом, полученные соотношения (25) и (26) описывают кинетику измельчения частиц материала в камере помола дезинтегратора в рамках статистического подхода.

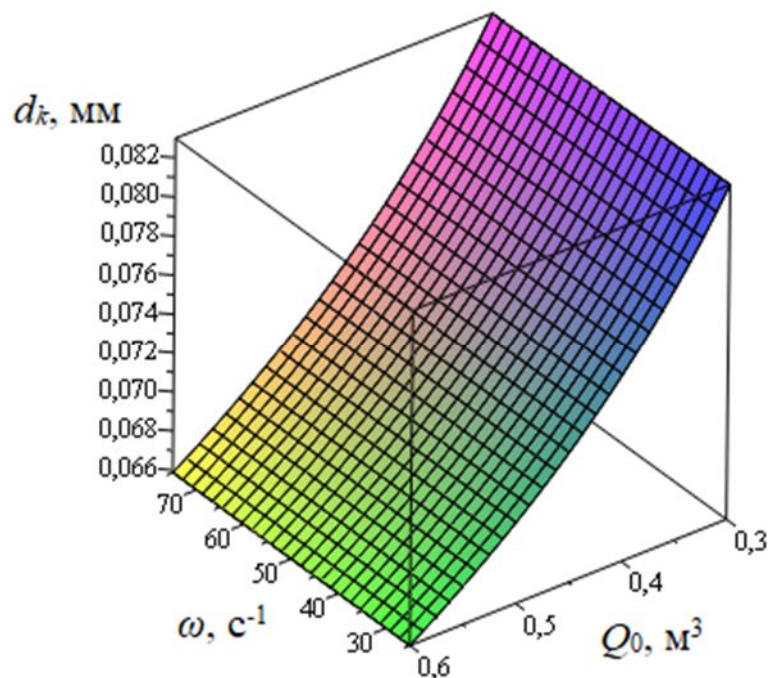


Рис. 2. Зависимость среднего размера частиц готового продукта от частоты вращения роторов дезинтегратора и его пропускной способности

Из графической зависимости, представленной на рисунке 2 видно, что средний размер частиц готового продукта при увеличении частоты вращения и пропускной способности дезинтегратора нелинейно уменьшается, то есть повышается тонкость помола.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хинт И.А. Основы производства силикатных изделий. Стройиздат, 1962. 636 с.

2. Лозовая С.Ю. Создание методов расчета и конструкций устройств с деформируемыми рабочими камерами для тонкого и сверхтонкого помола материалов. Диссертация доктора технических наук: 05.02.13. Белгород, 2005. 456 с.

3. Семикопенко И.А., Воронов В.П., Пензев П.П. Теоретические исследования скорости движения частиц материала вдоль поверхности ударного элемента мельницы дезинтеграторного типа // Известия ВУЗов. Строительство. 2008. № 11–12. С. 93–96.



## Информация об авторах

**Семикопенко Игорь Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования. E-mail: semikopenko.i@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Латышев Сергей Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Воронов Виталий Павлович**, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры механического оборудования. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Беляев Денис Александрович**, аспирант кафедры механического оборудования. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в апреле 2019 г.

© Семикопенко И.А., Латышев С.С., Воронов В.П., Беляев Д.А., 2019

**\*Semikopenko I.A., Latyshev S.S., Voronov V.P., Belyaev D.A.**

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

*Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46*

*\*E-mail: semikopenko.i@yandex.ru*

## FRACTURE KINETICS OF THE MATERIAL PARTICLES IN DISINTEGRATOR USING STATISTICAL APPROACH

**Abstract.** Disintegrators are one of the types of equipment that has the ability to combine grinding, mixing and activation of materials of medium strength and hardness. The advantages of disintegrators are the ability to integrate into existing technological schemes and obtain a grinding product with a given particle size distribution, as well as the simplicity of the design. This article analyzes the kinetics of particle destruction in the inter-row spaces of the disintegrator grinding chamber. A diagram of the disintegrator grinding chamber is presented. The mathematical description of impact destruction of particles in the grinding chamber is considered in the framework of the inhomogeneous Markov process. An equation is presented that describes the change in the statistical quantity  $m(t)$  - the mathematical expectation. It has been suggested that the intensity of the Markov process ( $\lambda$ ) is proportional to the frequency ( $\omega$ ) of rotor rotation multiplied by the time function  $f(t)$ . This functional dependence is determined from the condition of the same interaction time  $\tau_0$  of the material particle in the inter-row spaces of the grinding chamber. If we assume that the probability of destruction of the particles of the material in the interaction with each shock element is constant, then the mathematical expectation value  $m(t)$  will be proportional to the number of particles  $n(t)$ . The resulting relation (11) determines the law of change in the number of particles during the passage of each row of shock elements. The article derived formulas for determining the change in the number of particles in each inter-row space of the grinding chamber. The obtained relations (24) and (25) describe the kinetics of grinding material particles in the grinding chamber of the disintegrator in the framework of the statistical approach and make it possible to determine the relationship between the size of the initial particles and the size of the grinding product.

**Keywords:** disintegrator, destruction, particle, grinding chamber.

### REFERENCES

1. Khint I.A. Basics of the production of silicic-calcium products [Osnovy proizvodstva silikal'citnyh izdelij]. Stroyizdat, 1962. 636 p. (rus)
2. Lozova S.Yu. Creation of calculation methods and device designs with deformable working chambers for fine and ultrafine grinding of materials [Sozdanie metodov ras-cheta i konstrukcij ustrojstv s deformiruemymi rabochimi kamerami dlya tonkogo i sverhtonkogo pomola materialov]. The dissertation

of a doctor of technical sciences: 05.02.13. Belgorod, 2005. 456 p. (rus)

3. Semikopenko I.A., Voronov V.P., Penzev P.P. Theoretical studies of the speed of movement of material particles along the surface of the shock element of a mill of a disintegrator type [Teoreticheskie issledovaniya skorosti dvizheniya chastic materiala vdol' po-verhnosti udarnogo elementa mel'nicy dezintegratornogo tipa]. News of Universities. Construction, 2008. No. 11-12. Pp. 93-96. (rus)

*Information about the authors*

**Semikopenko, Igor A.** PhD, Assistant professor. E-mail: semikopenko.i@yandex.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Latyshev, Sergey S.** PhD, Assistant professor. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Voronov, Vitaly P.** DSc, Professor. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Belyaev, Denis A.** Research assistant. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received in April 2019*

**Для цитирования:**

Семикопенко И.А., Латышев С.С., Воронов В.П., Беляев Д.А. Кинетика разрушения частиц материала в дезинтеграторе в рамках статистического подхода // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 121–125. DOI: 10.34031/article\_5da463e3b2fce8.88813745

**For citation:**

Semikopenko I.A., Latyshev S.S., Voronov V.P., Belyaev D.A. Fracture kinetics of the material particles in disintegrator using statistical approach. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 9. Pp. 121–125. DOI: 10.34031/article\_5da463e3b2fce8.88813745

DOI: 10.34031/article\_5da4652c1400a3.95219452

<sup>1,\*</sup>Гапоненко Е.В., <sup>1</sup>Рыбак Л.А., <sup>1</sup>Холошевская Л.Р.<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46

\*E-mail: gaponenkobel@gmail.com

## СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ С ПРИВОДНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ НА ОСНОВЕ КАБЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Аннотация.** Существует большое разнообразие механизмов параллельной структуры. Особый интерес представляют кабельные роботы, которые используют кабели вместо выдвижных штанг для управления положением выходного звена. Они имеют ряд преимуществ, таких как большая рабочая область, простота сборки и разборки, высокая мобильность, но также имеются недостатки, связанные с управлением движением кабелей робота. В работе приведены примеры одних из первых кабельных роботов, рассмотрены их назначение и применение. Также в статье рассмотрены российские и зарубежные ученые, которые занимаются этими вопросами и проанализированы их работы. В результате структурного анализа составлена и подробно рассмотрена классификация кабельных роботов: по способу размещения барабанов, по количеству степеней свободы рабочего органа и числу гибких звеньев, по способу применения, по типу основания, по способу крепления кабелей. Приведена структура кабельного робота для перемещения грузов. Однако остается много областей, открытых для теоретических исследований. В заключение рассмотрены темы, которые нуждаются в большем изучении. Самая очевидная область исследований – управление, также оптимизация рабочей области для различных применений этих устройств, поиск и использование всех преимуществ, предлагаемых кабельными устройствами.

**Ключевые слова:** кабельные роботы, кабели, выходное звено, структурный анализ.

**Введение.** Манипуляторы параллельной структуры все большее применяются во многих отраслях промышленности таких как медицина, энергетика, строительство, машиностроение, космическая отрасль [1–4].

В настоящее время существует большое разнообразие механизмов параллельной структуры. Особый интерес представляют кабельные роботы, которые представляют собой особый тип кинематической структуры, состоящей в основном из рабочего органа, соединенного с неподвижной базовой платформой с помощью кабелей. Кабельные роботы используют кабели вместо выдвижных штанг для управления положением выходного звена. В этих манипуляторах управление положением выходного звена осуществляется посредством изменения длины кабелей. Кабели обычно наматываются на катушки, прикрепленные к основанию, и приводятся в действие вращающимся двигателем. Кабельные роботы имеют особые преимущества, такие как большая рабочая область, простота сборки и разборки, высокая мобильность, большая грузоподъемность и простота перенастройки. Контролируя длины кабелей в широких пределах, можно получить доступ к очень большому рабочему пространству от нескольких десятков сантиметров до нескольких десятков метров и более. Использование кабелей вместо жестких звеньев дополнительно уменьшает массу, так как приводы не меняют положение и

крепятся к неподвижному основанию так, что единственными движущимися частями являются кабели и выходное звено. Как следствие, получается робот с более высокой скоростью и маневренностью, и увеличенной грузоподъемностью. Затраты на производство кабельных роботов значительно ниже, чем у обычных манипуляторов. Кабельные роботы просты в установке. Такой манипулятор может быть собран с использованием ряда недорогих лебедок и кабелей.

Несмотря на их многочисленные преимущества, существует несколько проблем, связанных с управлением движением кабелей робота. Одним из недостатков является то, что кабели могут тянуть, но не толкать, это приводит к одностороннему ограничению, при котором кабели всегда должны поддерживаться в натянутом состоянии. Так же необходимо использовать больше кабелей, чем степеней свободы, чтобы полностью удерживать платформу и управлять ею.

Одним из первых кабельных роботов является NIST Robocrane (рис. 1), разработанный Джеймсом С. Альбусом и его командой из Национального института стандартов и технологий (Гейтерсберг, США). Манипулятор содержит перевернутую платформу Стюарта с шестью гидравлическими опорами, где каждая из шести опор была заменена на кабель. Как и платформа Стюарта, Robocrane обладает шестью степенями



свободы и может поднимать, и точно манипулировать тяжелыми грузами на большие расстояния.

В 1995 году П. Д. Кэмпбелл, П. Л. Сваим, К. Дж. Томпсон представили робота «Шарлотта» (рис. 2), разработанного Макдоннелл-Дугласом

(в настоящее время - «Боинг») для использования на Международной космической станции. Это мобильный ящик размером с микроволновую печь, подвешенный на восьми кабелях и приводимый в движение восемью моторами, установленными на корпусе.

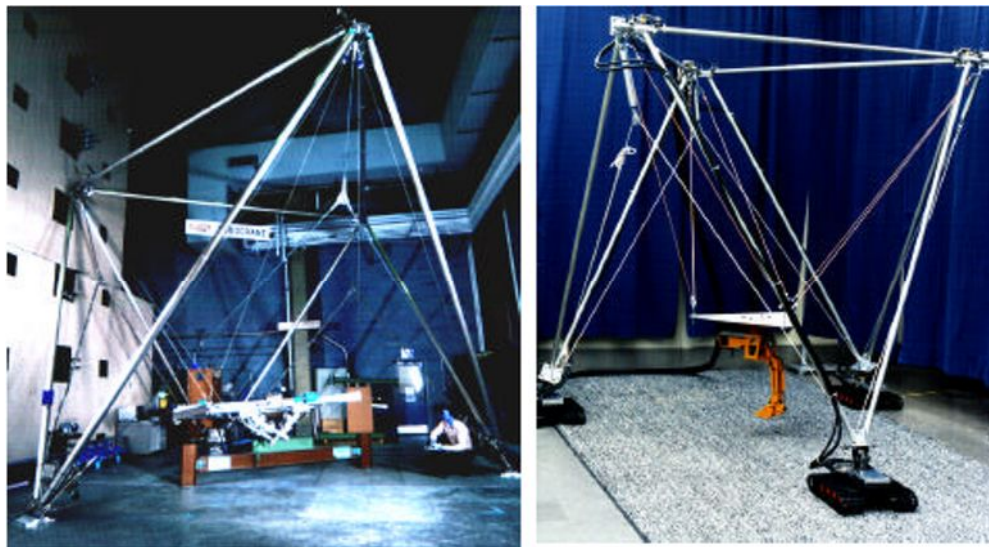


Рис. 1. NIST Robocrane



Рис. 2. Робот Charlotte

Особое внимание уделяют теме кабельных роботов: Ж. Б. Изард, М. Мишлен, Ж. П. Мерле, К. Госселин, С. Барадат, и др. Бучард и Госсла занимались оптимизацией рабочего пространства кабельного робота для радиовещания. Так, в работе [5] рассматриваются некоторые вопросы, касающиеся обратной кинематики и статики кабельных роботов, а также некоторые ограничения, присущие рабочему пространству. Аббаснеяд и др разработали плоский кабельный робот для реабилитационных целей и балансировки внешних сил. Ж.П. Мерле и Д. Дени разработали легкий и мобильный кабельный параллельный робот Marionet [6], который предназначен для спасательных работ в труднодоступных местах.

В работе [7] рассматривается динамическое планирование траектории 3-DOF пространственных подвесных параллельных манипуляторов. На основе динамической модели подвешенного робота получен набор алгебраических неравенств, представляющих ограничения на натяжение кабеля. При использовании периодических функций при проектировании траекторий показано, что возникают специальные частоты, аналогичны собственным частотам систем маятникового типа. Эти специальные частоты можно использовать на практике, чтобы значительно упростить планирование траектории. Разработан прототип 3-DOF кабельного робота. Предлагаемый подход к планированию траекторий может быть использован для планирования динамических траекторий, выходящих за пределы статического рабочего пространства механизма, открывая новые приложения и возможности для кабельных роботов. В работе [8] рассмотрен динамический анализ и классификация рабочей области на основе общего уравнения движения кабельного робота и одностороннего свойства кабелей. Проведено качественное сравнение различных типов рабочих пространств.

Исследования систем, подобных кабельным роботам, проводятся и в России, однако публикации по данному направлению немногочисленны. В работе [9] сформулирована в общем виде задача планирования траектории перемещения

схвата манипулятора. Приведено решение кинематической задачи по положению для зоны обслуживания в форме трехмерного четырехгранника и параллелепипеда, для скорости – в форме параллелепипеда. В работе [10] предложен способ изменения распределения сил между звеньями за счет использования всех гибких связей. Приведена оценка энергоэффективности использования манипуляторов данного типа и определена предпочтительная область использования. В работе [11] рассматриваются динамические ограничения структуры манипулятора с подвесом схвата на гибких звеньях. Представлена зависимость рекомендуемой максимальной скорости от

положения точки крепления груза по вертикали. Разработано устройство [12], которое может быть использовано в качестве устройства для перемещения грузов различного назначения в любую точку пространства в пределах обслуживаемой им территории, а также устройство для измерения натяжения троса.

Кабельные роботы можно классифицировать по способу размещения барабанов, по количеству степеней свободы рабочего органа и числу гибких звеньев, по способу применения, по виду основания, по способу крепления кабелей (рис. 3).



Рис. 3. Классификация кабельных роботов.

По способу размещения барабанов, предназначенных для намотки и смотки одних концов гибких звеньев, можно выделить: манипуляторы, где барабаны размещены возле основания каждой из четырех вертикальных колон, и манипуляторы, где барабаны размещены возле основания одной из вертикальных колон.

Манипулятор (рис. 4) состоит из четырех вертикальных колонн, возле основания каждой из которых размещены барабаны Б1, Б2, Б3, Б4, предназначенные для намотки (или смотки) одних концов гибких звеньев [13]. Другие концы гибких звеньев, проходящие через шкивы Ш1, Ш2, Ш3, Ш4, соединяются в точке крепления груза С. Под действием веса груза, закрепленного в точке С, в тросах возникают силы натяжения Т1, Т2, Т3, Т4. Изменение положения точки крепления груза происходит за счет изменения длин кабелей при вращении барабанов мотор – редукторами М1, М2, М3, М4.

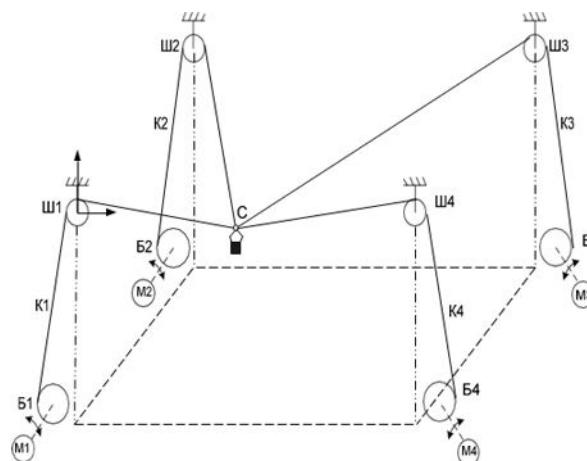


Рис. 4. Кинематическая схема кабельного робота

Робот NIMS3D [14, 15], где барабаны размещены возле основания одной из вертикальных колон, представленный на рис. 5. Как видно из рисунка, кинематика NIMS3D схожа с вышерассмотренной кинематикой параллельного манипу-

лятора. Отличие её в том, что параллельный робот NIMS3D состоит из трех вертикальных колонн 1, возле основания одной из которых размещены барабаны 3. Другие концы гибких звеньев также соединяются со схватом 2. Изменение положения схвата происходит аналогичным способом, как и в первом случае.

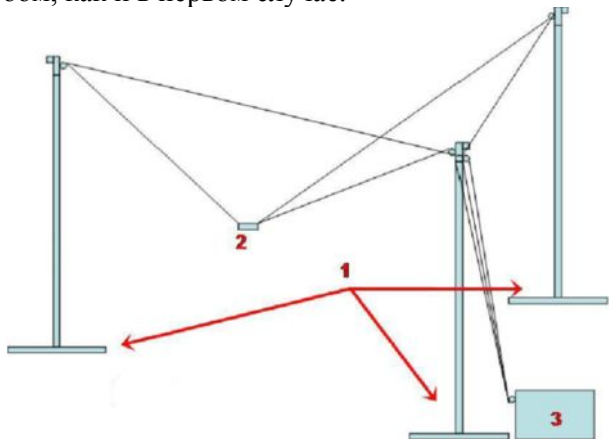


Рис. 5. Робот NIMS3D.

Параллельный манипулятор NIMS3D обладает следующими ключевыми преимуществами,

по сравнению с манипулятором, приведенным на рис. 4: удаленным расположением приводов от системы управления; быстрой разворачиваемостью; сравнительно большим объемом рабочей зоны; сравнительно высокой грузоподъемностью. NIMS3D может быть использован при решении задач обработки опасных материалов, проведении спасательных работ, организации видеосъемки спортивных мероприятий, имитации полета воздушного транспорта.

По количеству степеней свободы рабочего органа  $n$  и числа гибких звеньев  $m$  кабельные роботы классифицируют [16]:

1. Если  $m < n+1$  – ограниченный манипулятор, движение рабочего органа не может полностью контролироваться (рис. 6. *a*).

2. Если  $m = n+1$  – вполне ограниченный манипулятор – движение рабочего органа может контролироваться, но с этим минимальным количеством звеньев (рис. 6. *б, в, г*).

3. Если  $m > n+1$  – манипулятор с избыточными ограничениями – число кабелей превышает число степеней свободы (рис. 6. *д, е*).

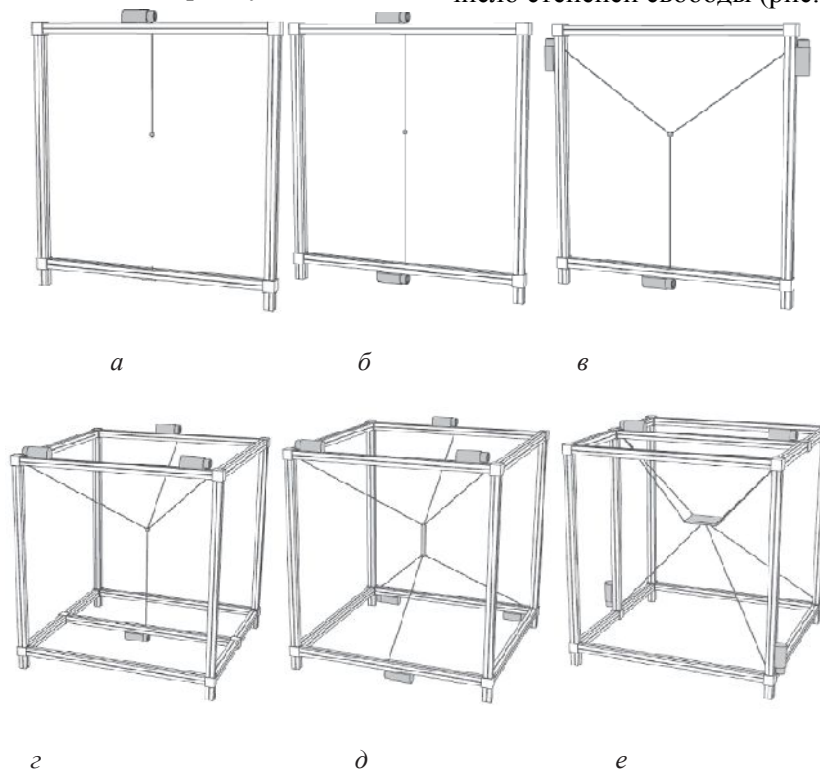


Рис. 6. Классификация кабельных роботов:

*a* – ограниченный манипулятор; *б, в, г* – вполне ограниченный; *д, е* – манипулятор с избыточными ограничениями

У механизмов с избыточными ограничениями движение рабочего органа может полностью контролироваться, также избыточность можно использовать для создания отказоустойчивых систем.

По виду основания кабельные роботы делятся на 2 класса: первый класс – манипуляторы

с подвижным основанием (рис. 7 *а, б*), которые используют для манипулирования объектами и транспортировки по суше, морю и в воздухе, спасательные работы [17-19]; второй класс – манипуляторы с фиксированным положением основания (рис. 7 *в, г*) (обычные кабельные роботы).



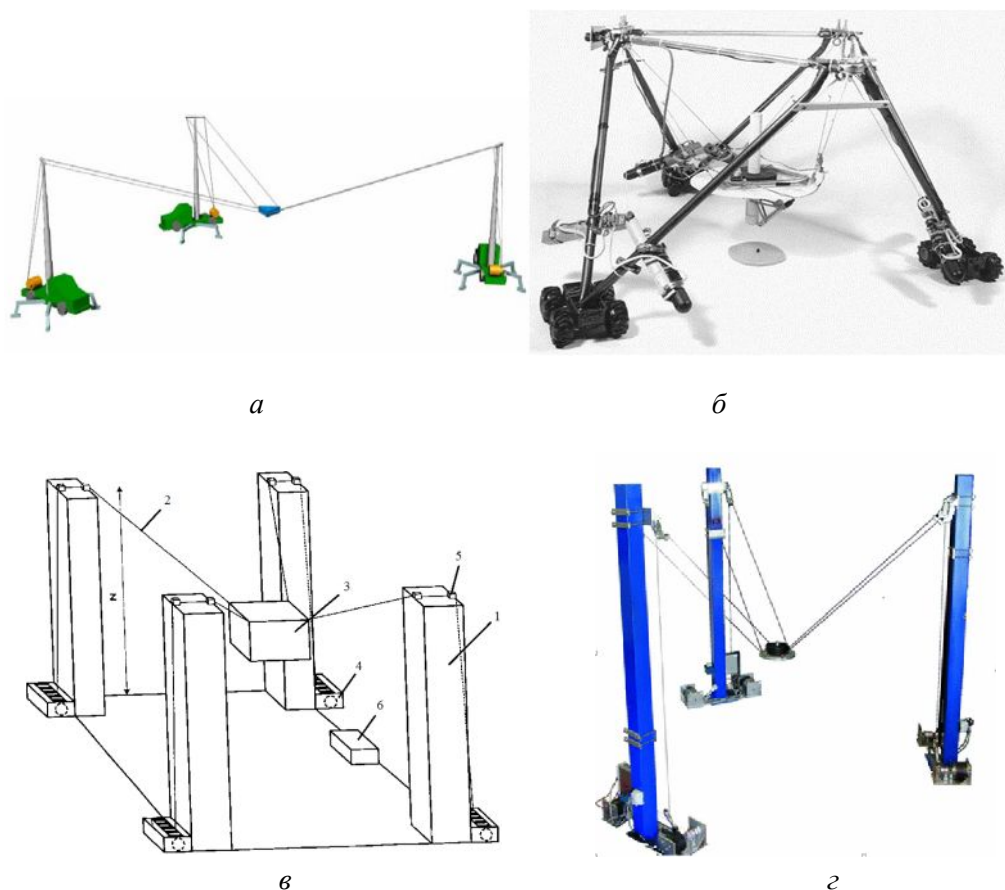


Рис. 7. Классификация кабельных роботов по виду основания:  
а, б – подвижное основание; в, г – фиксированное основание

Обычный кабельный робот имеет фиксированную разводку кабелей, то есть фиксированные точки выхода и конфигурацию кабелей. Эта структура может ограничивать размер рабочего пространства манипулятора из-за столкновений кабелей. Манипуляторы с подвижными выходными и опорными точками известны как реконфигурируемые кабельные роботы. Таким образом, изменяя расположение кабелей, следует избегать столкновений между кабелями и окружающей средой. В то же время, некоторые характеристики робота могут быть улучшены: увеличение жесткости, увеличение полезной нагрузки или уменьшение натяжения кабеля. Также модификация точек крепления кабеля приводит к увеличению размеров рабочего пространства. Однако для большинства существующих реконфигурируемых кабельных роботов реконфигурируемость выполняется либо дискретно, либо вручную, либо непрерывно, но с громоздкими реконфигурируемыми системами [20].

Кабельные роботы применяются в следующих областях:

1. Сборка крупногабаритных изделий. При подгоне и соединении двух массивных деталей используется мостовой кран или мобильный кран. Так как эта операция ответственная, то она должна выполняться с максимальной точностью.

Сложность позиционирования приводит к необходимости многократных подъемов, опусканий, подстукиваний и т.д. как при сборке деталей, так и в случае их разборки. В качестве решения данной задачи можно привести кабельную платформу (рис. 8) Aerial Multi-access Platform (AMP) компании Materials Handling Solutions (США).



Рис. 8. Кабельный робот AMP для сборки крупногабаритных изделий позиционирует крыло самолета при сочленении с фюзеляжем

2. Окраска крупногабаритных изделий. Роботизированные манипуляторы давно успешно

применяются при окраске различных изделий. Однако, габариты окрашиваемой детали ограничены сравнительно небольшой рабочей областью манипулятора. Использование же кабельных роботов с их большим рабочим пространством позволяет окрашивать крупногабаритные объекты,

такие как: корпуса судов, фюзеляжи самолетов, фасады зданий и т.д. Шасси робота может перемещаться по всей длине судна по мере того, как манипулятор окрасит поверхность (рис. 9), содержащуюся в его локальном рабочем пространстве.

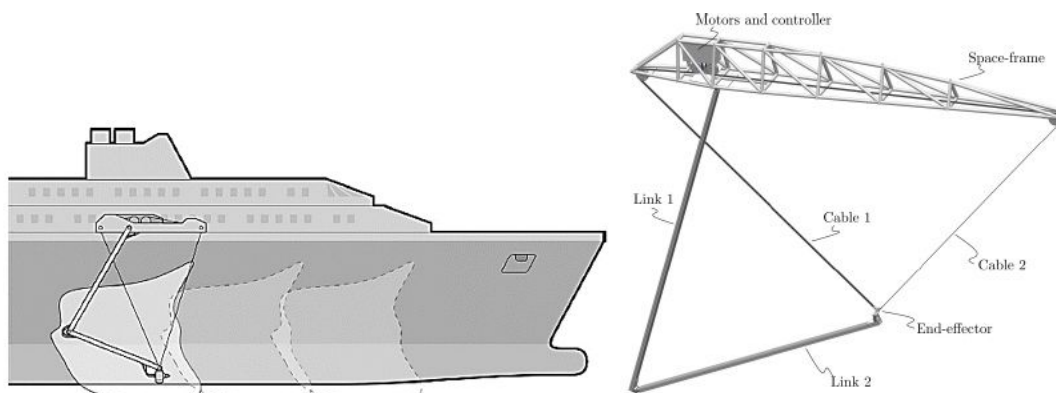


Рис. 9. Окрасочный процесс борта судна подвесным манипулятором с кабельными элементами

3. 3D-печать больших предметов. Производство крупномасштабных 3D-принтеров все еще является относительно новой областью исследований. Основным применением крупномасштабных 3D-принтеров является автоматизация строительства: способность быстро создавать объекты размером со здание при малом или вообще без ручного вмешательства. Рассмотрим крупномасштабный 3D-принтер, в котором для позиционирования используется кабельный робот с шестью степенями свободы. Шесть лебедок намотки кабелей закреплены в углах шестигранника в верхней плоскости, и шестигранная призма рабочего пространства (рис. 10). Кабельная система позиционирования обеспечивает большие диапазоны движения, а также менее дорогостоящая, более легкая, по сравнению с портальной системой, традиционно используемой в 3D-печати.

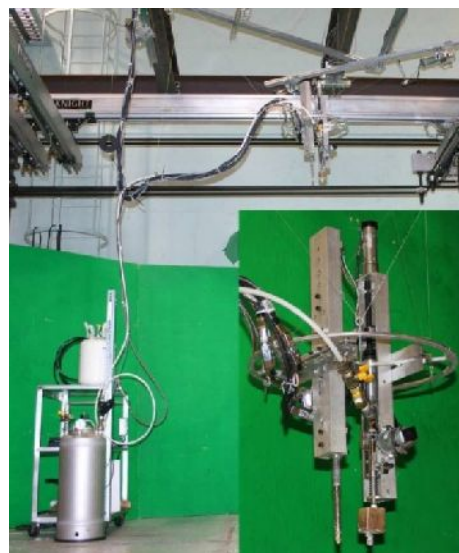


Рис. 10. Схема кабельного робота для 3D печати

4. Симуляторы движения. Симуляторы движения на основе виртуальной реальности доказали свою эффективность при обучении различным профессиям. Симулятор CableRobot (рис. 11), представляет собой кабели и лебедки для приведения в действие вместо жестких связей, традиционно используемых в конфигурации гексапода. Этот подход позволяет уменьшить перемещаемую массу, значительно увеличить рабочее пространство и обеспечивает большую гибкость для переключения между конфигурациями системы, в которых робот может работать. Особенностью проектирования кабельных роботов для симуляции движения является фокусировка на ускорении, а не на точности позиционирования.

5. Экзоскелеты для реабилитации. Реабилитационные робототехнические устройства активно изучаются для оказания помощи больным с ослабленными вследствие старения, заболеваний или травм конечностями. Современные роботизированные реабилитационные устройства для верхней конечности часто можно классифицировать на две категории: устройства с конечным эффектором, с которыми субъекты взаимодействуют, используя ручку на конце; и экзоскелетные устройства с жесткими звеньями, присоединенными к верхней конечности, и имеющие подвижность в суставах.

В последние годы были предложены легкие конструкции экзоскелетов для плеча на основе кабельных роботов, в которых жесткие звенья заменены легкими манжетами, прикрепленными к



подвижным сегментам человеческой руки. Кабели, приводимые в действие двигателями, проходят через эти манжеты для перемещения сегментов конечности. Учеными Колумбийского

университета (США) разработана конструкция кабельного экзоскелета CAREX (рис. 12) (Cable-driven ARm EXoskeleton).

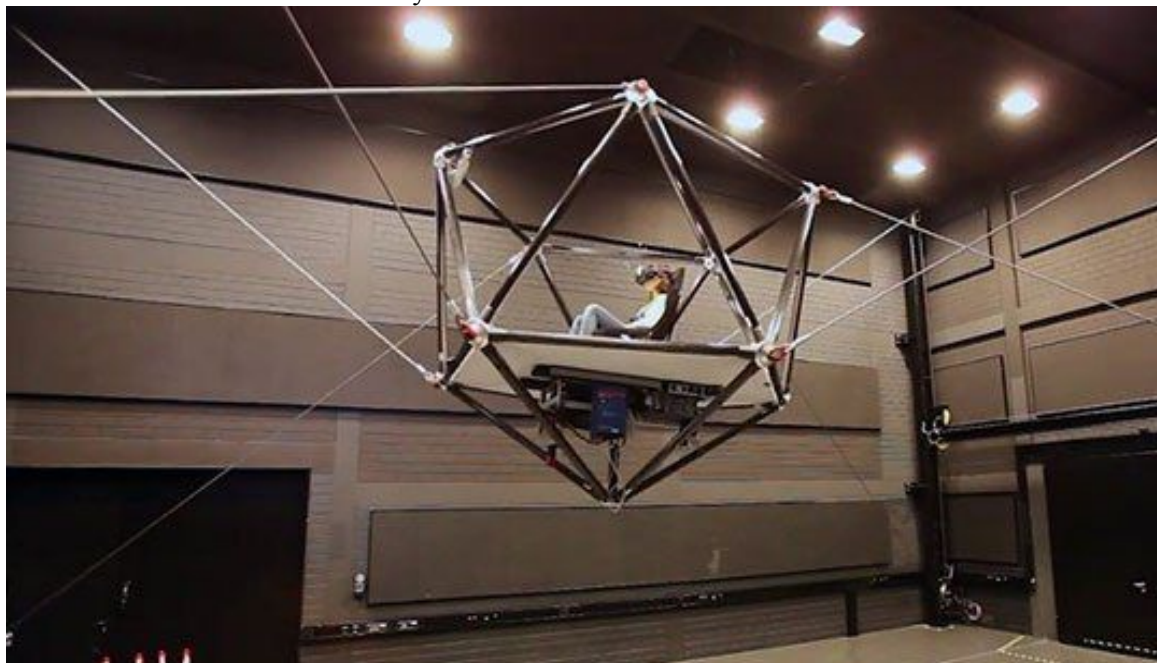


Рис. 11. Кабина кабельного симулятора

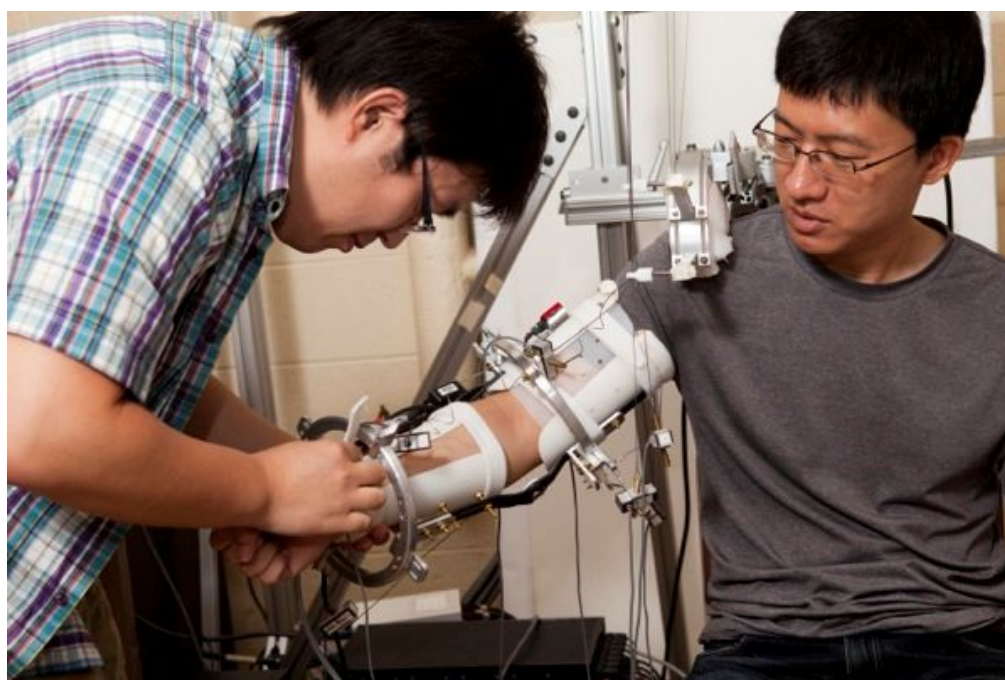


Рис. 12. Модель экзоскелета руки CAREX

6. Для операций складирования наиболее оптимальной структурой кабельного робота является манипулятор, представленный на рис. 13. Устройство перемещения грузов работает следующим образом. При вращении электродвигателей с устройствами для укладки кабелей и редукторами 1, 2, 3, 4, угловое положение валов которых задается устройством управления 5, происходит изменение длины кабелей 10, 11, 12, 13, поддерживаемых роликами 14, 15, 16, 17, распо-

ложенными на опорных башнях 6, 7, 8, 9 и телескопического звена 18 с захватным устройством 19, в результате чего захватное устройство 19 перемещается в нужную точку пространства. При этом предполагается, что горизонтальное перемещение захватного устройства 19 осуществляется за счет изменения длины кабелей 10, 11, 12, 13, а вертикальное перемещение осуществляется совокупностью изменения длин кабелей 10, 11, 12, 13 и телескопического звена 18, что обеспечивается устройством управления 5.



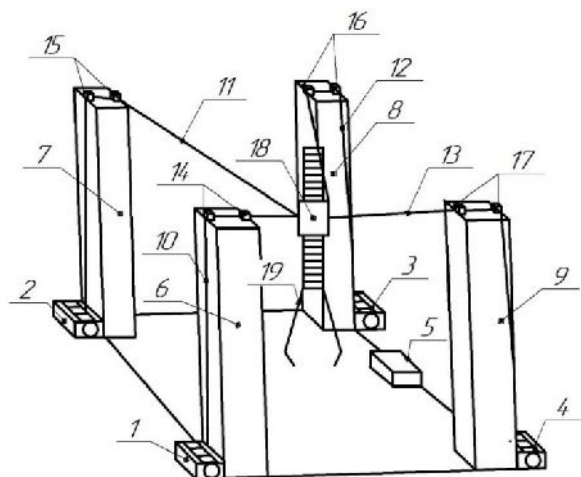


Рис. 13. Устройство перемещения грузов

**Выводы.** Хотя идея кабельной робототехники рассматривается только на протяжении нескольких десятилетий, она становится все более популярной. Все еще остается очень большой потенциал для разработки новых применений и конструкций для этого типа роботов. Остается много областей, открытых для теоретических исследований, хотя многие теоретические основы были заложены. Самая очевидная область исследований – управление. Как отметили некоторые исследователи, все еще нет надежных алгоритмов управления в реальном времени. Это делает большие или быстрые кабельные роботы несколько неустойчивыми. Кроме того, нуждаются в большем изучении и компенсации различных внешних факторов в динамике и управлении. Хотя тема рабочего пространства изучалась многими исследователями, по-прежнему существует необходимость в проведении работы по оптимизации рабочей области для различных применений этих устройств. Другие открытые области работы – поиск и использование всех преимуществ, предлагаемых кабельными устройствами. Например, гибкие связи позволяют продолжать использование механизма во время определенных столкновений, что было бы невозможно при использовании жестких параллельных роботов.

В отношении, как теоретических исследований, так и практического применения, понятно, что, несмотря на всю работу, которая была проделана, многое еще нужно сделать для того, чтобы реализовать весь потенциал этого типа роботизированных систем.

**Источник финансирования.** РФФИ, грант № 18-31-20060.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Merlet J.-P., *Parallel Robots*, 2nd ed. Springer. 2007. Pp. 3–16.

2. Рыбак Л.А., Мамаев Ю.А., Малышев Д.И., Вирабян Л.Г. Программный модуль для реализации заданной траектории движения выходного звена робота-гексапода для 3D печати изделий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №8. С. 155–164.

3. Kong H., Gosselin C.M., *Type Synthesis of Parallel Mechanisms* // Springer, 2007. Pp. 272–280.

4. Рыбак Л.А., Ержуков В.В., Чичварин А.В. Эффективные методы решения задач кинематики и динамики робота-станка параллельной структуры. ФИЗМАТЛИТ. 2011. 148 с.

5. Roberts R., Graham T., Lippitt T. On the inverse kinematics, statics, and fault tolerance of cable-suspended robots. // *Journal Field Robotics*. 1998. 15 (10). Pp. 581–597.

6. Merlet J.P., Daney D.A. A portable, modular parallel wire crane for rescue operations // *Robotics and Automation (ICRA)*. 2010 IEEE International Conference. 2010. Pp. 2834–2839.

7. Gosselin C. Global Planning of Dynamically Feasible Trajectories for Three-DOF Spatial Cable-Suspended Parallel Robots, in *Cable-Driven Parallel Robots*, T. Bruckmann and A. Pott, Eds., ed Berlin, Heidelberg // Springer Berlin Heidelberg, 2013. Pp. 3–22.

8. Duan Q.J., Xuechao D. Workspace Classification and Quantification Calculations of Cable-Driven Parallel Robots. // *Advances in Mechanical Engineering (Hindawi Publishing Corporation)*. 2014. Pp. 1–9. doi: 10.1155/2014/358727

9. Валюкевич Ю.А., Алепо А. В. Моделирование статической нагрузки на элементы конструкции и оценка энергоэффективности манипулятора с гибкими звеньями // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2012. №3 (162). С. 21–25.

10. Валюкевич Ю.А., Алепо А.В., Дубовсков В.В., Яковенко Д.М. Определение диапазона динамической управляемости манипулятора с гибкими связями // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 3. С. 28–32.

11. Валюкевич Ю.А., Алепо А.В. Планирование траектории перемещения манипулятора с подвесом схвата на гибких звеньях (часть 1) // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2011. № 6 (159). С. 12–15.

12. Пат. 2372274 Российская Федерация, МПК В66С 21/00. Устройство перемещения грузов. / Ю.А. Валюкевич, А.А. Зеленский, О.Г. Толстунов, И.И. Наумов: заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО "ЮРГУЭС". № 2008110304; заявл. 17.03.2008; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 31. 4 с.

13. Borgstrom P.H., Borgstrom N.P., Stealey M.J., Jordan B., Sukhatme G.S., Batalin M., Kaiser W. Generation of energy-efficient trajectories for

nims3d, a three-dimensional cabled robot // To Appear: IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2008. Pp. 325–339.

14. Borgstrom P.H., Stealey M., Batalin M., Kaiser W. Nims3d: A novel rapidly deployable robot for 3-dimensional applications // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006. Pp. 3628–3635.

15. Валукевич Ю.А., Козырев П.П., Нуждяк А.В., Сербул Г.Г. Кинематика манипуляторов параллельной структуры с гибкими звеньями // Вестник современных исследований. 2018. 4.2 (19). С. 207–213.

16. Duan Q.J., Xuechao D. Workspace Classification and Quantification Calculations of Cable-Driven Parallel Robots // Advances in Mechanical Engineering. Vol. 2014, Article ID 358727. Pp. 1–9. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/358727>

17. Donald B., Gariepy L., Rus D. Distributed manipulation of multiple objects using ropes // Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on. 2000. Vol. 1. Pp. 450–457.

18. Cheng P., Fink J., Kumar V., Pang J.-S. Cooperative towing with multiple robots // ASME Journal of Mechanisms and Robotics. 2009. Vol. 1. № 1. Pp. 101–118.

19. Michael N., Fink J., Kumar V. Cooperative manipulation and transportation with aerial robots // Robotics: Science and Systems. 2009. Vol. Pp. 1–8.

20. Lorenzo R., Caro G.S., Gouttefarde M., Girin A.A. Reconfiguration Strategy for Reconfigurable Cable-Driven Parallel // 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) Washington State Convention Center Seattle, Washington. 2015. Pp. 1613–1620.

#### Информация об авторах

**Гапоненко Елена Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: [gaponenkobel@gmail.com](mailto:gaponenkobel@gmail.com). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Рыбак Лариса Александровна**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения. E-mail: [rl\\_bgtu@intbel.ru](mailto:rl_bgtu@intbel.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Холошевская Людмила Романовна**, студент кафедры технологии машиностроения. E-mail: [mila.kholoshevskaya@mail.ru](mailto:mila.kholoshevskaya@mail.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в мае 2019 г.

© Гапоненко Е.В., Рыбак Л.А., Холошевская Л.Р., 2019

**\*Gaponenko E.V., Rybak L.A., Kholoshevskaya L.R.**

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov  
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

\*E-mail: [gaponenkobel@gmail.com](mailto:gaponenkobel@gmail.com)

## STRUCTURAL ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF ROBOTIC SYSTEMS WITH DRIVING MECHANISMS ON THE BASIS OF CABLE ELEMENTS

**Abstract.** The mechanisms of the parallel structure are very diverse. Cable-driven robots that use cables instead of retractable rods to control the position of the output link are of particular interest. They have several advantages, such as large workspace, easy assembly, and disassembly, high mobility, but also there are disadvantages associated with controlling the movement of robot cables. The paper gives examples of some of the first cable robots, their purpose, and application. The article also considers Russian and foreign scientists who deal with these issues and analyzes their work. As a result of the structural analysis, the classification of cable robots is compiled and considered in detail: by the method of placing the reels, by the DOF number of the working body and the number of flexible links, by the application method, by the type of base, by the method of cable fastening. The cable robot structure for the movement of goods is given. However, there are still many areas open to theoretical research. In conclusion, the topics that need more research are considered. The most obvious area of research is control, also optimizing the workspace for different applications of these devices, finding and take advantage of all the benefits offered by cable devices.

**Keywords:** cable-driven robots, cables, output link, structural analysis.

## REFERENCES

1. Merlet J.-P., *Parallel Robots*, 2nd ed. Springer. 2007. Pp. 3–16.
2. Rybak L.A., Mamaev Y.A., Malyshev D.I., Virabyan L.G. Software module for implementing a predetermined path of movement of the output link of the robot hexapod, for 3D printing products [Programmnyj modul' dlya realizacii zadannoj traektorii dvizheniya vyhodnogo zvena robota-geksapoda dlya 3D pechati izdelij]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016. No. 8. Pp. 155–164. (rus)
3. Kong H., Gosselin C.M. *Type Synthesis of Parallel Mechanisms*. Springer, 2007. Pp. 272–280.
4. Rybak L.A., Ergakov V.V., Chichvarin A.V. Effective methods for solving problems of kinematics and dynamics of robot-machine parallel structures [Effektivnye metody resheniya zadach kinematiki i dinamiki robota-stanka parallel'noj struktury]. *FIZMATLIT*. 2011. Pp. 148. (rus)
5. Roberts R., Graham T., and Lippitt T. On the inverse kinematics, statics, and fault tolerance of cable-suspended robots. *Journal Field Robotics*. 1998. 15 (10): Pp. 581–597.
6. Merlet J.P. Daney D.A. A portable, modular parallel wire crane for rescue operations. *Robotics and Automation (ICRA)*. 2010. IEEE International Conference on 2010. Pp. 2834–2839.
7. Gosselin C. "Global Planning of Dynamically Feasible Trajectories for Three-DOF Spatial Cable-Suspended Parallel Robots" in *Cable-Driven Parallel Robots*, T. Bruckmann and A. Pott, Eds., ed Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg. 2013. Pp. 3–22.
8. Duan Q.J., Xuechao D. Workspace Classification and Quantification Calculations of Cable-Driven Parallel Robots. *Advances in Mechanical Engineering (Hindawi Publishing Corporation)*. 2014. Pp. 1–9. doi: 10.1155/2014/358727
9. Walukiewicz J.A., Aleph A.V. Modeling of static loads on structural elements and assessment of energy efficiency of a manipulator with flexible links. *News of higher educational institutions [Modelirovanie staticheskoy nagruzki na elementy konstrukcii i ocenka energoeffektivnosti manipulyatora s gibkimi zven'yami]*. North Caucasus region. Technical science. 2012. No. 3 (162). Pp. 21–25.
10. Walukiewicz J.A., Aleph A.V., Dubovsky V.V., Yakovenko D.M. Determination of the range of dynamic controllability of a manipulator with flexible links [Opredelenie diapazona dinamicheskoy upravlyaemosti manipulyatora s gibkimi svyazyam]. *Modern problems of science and education*. 2012. No. 3. Pp. 28–32. (rus)
11. Walukiewicz J.A., Aleph A.V. Trajectory Planning of the manipulator with the suspension grip on flexible links (part 1). *News of higher educational institutions [Planirovanie traektorii peremeshcheniya manipulyatora s podvesom skhvata na gibkih zven'yah (Chast' 1)]*. North Caucasus region. Technical science. Novocherkassk. 2011. No. 6 (159). Pp. 12–15. (rus)
12. Valukevich Y.Y., Zelensky A. A., Tolstunov O.G., Naumov I. I. Device for the movement of goods. Patent RF, No 2008110304, 2009 (rus)
13. Borgstrom P.H., Borgstrom N.P., Stealey M.J., Jordan B., Sukhatme G.S., Batalin M., Kaiser W. Generation of energy-efficient trajectories for nims3d, a three-dimensional cabled robot. To Appear: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2008. Pp. 325–339
14. Borgstrom P.H., Stealey M., Batalin M., Kaiser W. Nims3d: A novel rapidly deployable robot for 3-dimensional applications. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 2006. Pp. 3628–3635
15. Walukiewicz Y.A., Kozyrev P.P., Nordac A.V., Scientific G.G. Kinematics of manipulators parallel structures with flexible links [Kinematika manipulyatorov parallel'noj struktury s gibkimi zven'yami]. *Bulletin of modern research*. 2018. 4.2. (19). Pp. 207–213.
16. Duan Q.J., Xuechao D. Workspace Classification and Quantification Calculations of Cable-Driven Parallel Robots // *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 2014, Article ID 358727. Pp. 1–9. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/358727>
17. Donald B., Garipey L., Rus D. Distributed manipulation of multiple objects using ropes *Robotics and Automation*. 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on. 2000. Vol. 1. Pp. 450–457.
18. Cheng P., Fink J., Kumar V., Pang J.-S. Co-operative towing with multiple robots, *ASME Journal of Mechanisms and Robotics*. February 2009. Vol. 1. No. 1. Pp. 101–118.
19. Michael N., Fink J., Kumar V. Cooperative manipulation and transportation with aerial robots” *Robotics: Science and Systems*. 2009. Vol. Pp. 1–8.
20. Lorenzo R. Caro G.S., Gouttefarde M. and Girin A. A Reconfiguration Strategy for Reconfigurable Cable-Driven Parallel. 2015 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* Washington State Convention Center Seattle, Washington. May 26–30. 2015. Pp. 1613–1620.

*Information about the authors*

**Gaponenko, Elena V.** PhD, Assistant professor. E-mail: gaponenkobel@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Rybak, Larisa A.** DSc, Professor. E-mail: rl\_bgtu@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Kholoshevskaya, Lyudmila R.** Bachelor student. E-mail: mila.kholoshevskaya@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received in May 2019*

**Для цитирования:**

Гапоненко Е.В., Рыбак Л.А., Холошевская Л.Р. Структурный анализ и классификация роботизированных систем с приводными механизмами на основе кабельных элементов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 126–136. DOI: 10.34031/article\_5da4652c1400a3.95219452

**For citation:**

Gaponenko E.V., Rybak L.A., Kholoshevskaya L.R. Structural analysis and classification of robotic systems with driving mechanisms on the basis of cable elements. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 9. Pp. 126–136. DOI: 10.34031/article\_5da4652c1400a3.95219452

DOI: 10.34031/article\_5da465e18130c2.46410279

<sup>1,\*</sup>Никитина И.П., <sup>1</sup>Поляков А.Н., <sup>2</sup>Уткин И.А.<sup>1</sup>Оренбургский государственный университет

Россия, 430005, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13

<sup>2</sup>ООО «Газпром переработка», Оренбургский газоперерабатывающий завод

Россия, 460068, Оренбургская обл., г. Оренбург, пос. Холодные Ключи

\*E-mail: innanikitina@list.ru

## УСТАНОВКА ФОРМОВАНИЯ ДРЕВЕСНО-БЕТОННЫХ ПЛИТ

**Аннотация.** В статье представлен подход к созданию сложных механических систем, заключающийся в сочетании автоматизированных систем проектирования различного типа, что дает возможность не только реализовывать многовариантное проектирование с использованием САД-систем, но и, используя возможности САЕ-систем, добиваться оптимальности конструкторских решений по нескольким критериям одновременно, т.е. решать многокритериальную задачу проектирования. В работе представлены новые конструкторские решения, направленные на повышение производительности установки для формования древесно-бетонных плит. Произведены расчеты и представлены конструкции: поворотных колесных стоек, которые обеспечивают перемещение установки в двух взаимно перпендикулярных направлениях; бункера-дозатора; конвейера, распределяющего и сбрасывающего готовый раствор в опалубку с помощью двух пневматических цилиндров; рамы установки формования плит; рамы бункера-дозатора; рамы конвейера. Приведены результаты инженерного анализа рам установки формования плит, бункера-дозатора и конвейера. Инженерный анализ проводился в САЕ-системе ANSYS. Инженерный анализ включал пять видов расчетов: расчет на жесткость с условиями жесткого и упругого закрепления; модальный; динамический; тепловой и термодформационный. Анализ полученных результатов расчетов позволил сделать заключение о незначительности статической и динамической деформации рам. Оценка термодформационного состояния элементов несущей системы установки для формования древесно-бетонных плит показала, что величина температурных перемещений является сопоставимой с динамическими.

**Ключевые слова:** формование плит, трамбующее устройство, бункер-дозатор, опалубка, тепловые характеристики, модальный анализ, динамический расчет, САД-система, САЕ-система.

**Введение.** Древобетон «Арболит» – это один из видов легкого бетона, в состав которого входит древесная щепа, высокосортный цемент, химические добавки и вода. Необходимость химических добавок в составе древобетона связана с тем, что в органической составляющей нужно нейтрализовать остаточный сахар, чтобы повысить сцепление дробилки и цемента, а также улучшить свойства конечного материала, такие как пористость, ускорение твердения, бактерицидность и т. д.

Экономическая эффективность использования такого вида отходов доказана ведущими предприятиями по изготовлению древобетона [1–3]. Немаловажную роль в данном вопросе играет и рациональность использования леса. Основной составляющей для изготовления древобетона, как уже упоминалось выше, являются древесные отходы столярного и мебельного производства, из которых на выходе получается щепа необходимого размера.

Одним из важнейших преимуществ древобетона является его экологичность [4]. Это безопасный для здоровья человека строительный материал. Состав и производство его также абсолютно безопасны, в том числе и для окружающей

среды [5–8]. По сравнению с кирпичом и керамзитобетонными блоками, в которых присутствуют минеральные заполнители, «Арболит» обладает теплоизоляционными и звукоизоляционными свойствами и малым весом. «Арболит» не подвержен биологическому разрушению, низкая теплопроводность материала не требует дополнительного утепления; материал также является огнеупорным [9]. Аналогов древобетону среди других строительных материалов по сочетанию свойств и технических характеристик – нет. Это строительный материал, соединивший в себе лучшие свойства дерева и камня [10–12].

Важным фактором в обеспечении высокого качества древобетона является технология производства. Все производство панелей включает в себя пять этапов: производство древесной щепы; деминерализация сырья; смешивание с цементом; формовка с прессованием; «созревание».

Производство «Арболита» невозможно без древесной щепы, которая получается после дробления древесины в специальной машине. Важнейшим условием применения щепы в производстве древобетона является воздействие воздуха. Открытое пространство до 6 месяцев рекомендуется щепе для нейтрализации содержащихся в

ней сахаров. Чтобы сократить время нейтрализации сахаров, щепу можно замочить в специальном химическом составе на срок не менее суток. Качество химических добавок также должно быть высоким, чтобы в конечном счете получить качественный материал. Последовательность добавления составляющих также играет немаловажную роль в создании древобетона высокого качества. Смесь должна быть замешана в смесителе принудительного типа.

Прессование – важный процесс в производстве плит. Обычно прессование (уплотнение) бетона осуществляется вручную – штыкование и трамбование (выполняемые ручными инструментами). Время, затрачиваемое на прессование должно составлять не более 20 секунд, иначе на выходе получится слоеная смесь из цемента и щепы, а не «Арболит». Поэтому процесс трамбования должен быть механизирован.

**Объект исследований.** В данной работе представлен один из вариантов [13, 14, 15] установки формирования плит, используемых в дальнейшем для малоэтажного строительства. Разработка проекта установки выполнялась в CAD-системе «КОМПАС-3D» (рис. 1).

Рама установки формирования плит (рис. 2, а) используется как несущая система для бункера-дозатора, конвейера с опрокидывающим устройством и трамбуемого устройства. Для возможности перемещения установки по цеху от одной

опалубки к другой установка оснащена двумя типами колесных стоек: ведущими и ведомыми (рис. 2 б). Соответствующего типа колесные стойки расположены по диагонали (рис. 1).

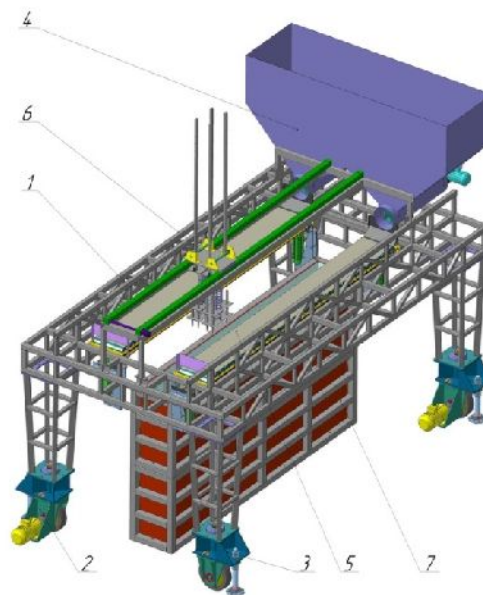
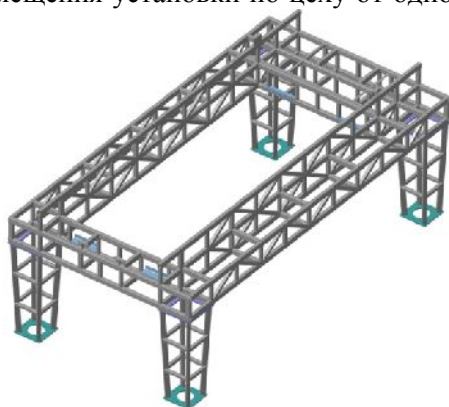


Рис. 1. Общий вид установки: 1 – рама установки формирования плит; 2 – ведущая колёсная стойка; 3 – ведомая колёсная стойка; 4 – бункер-дозатор; 5 – конвейер с опрокидывающим устройством; 6 – трамбуемое устройство; 7 – опалубка



а)



б)

Рис. 2. Рама установки формирования плит (а) с колесными стойками (б)

Каждая из ведущих колесных стоек оснащена отдельным мотор-редуктором, который через упругую муфту передает движение на колесо и приводит в движение всю установку формирования плит. Колесная стойка имеет поворотную часть, которая обеспечивает фиксированный поворот колеса на  $90^\circ$  и, тем самым, перемещение установки в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Ведомые колесные стойки не имеют привода.

Бункер-дозатор, установленный на установке формирования плит, выполняет функцию накопления, хранения и дозирования уже готового раствора для формирования плит (рис. 3, а). Бункер оснащен двигателем с эксцентриком, закрепленным на задней стенке бункера. В данном случае двигатель выполняет роль вибратора. Вибратор нужен для того чтобы готовая смесь, состоящая из перемешанного с водой цемента и древесной щепы, не налипала на стенки бункера,



а стекала вниз за счет вибрации. Бункер-дозатор крепится на раме с помощью приваренных к ней кронштейнов и присоединяется с помощью болтов к основной раме установки формирования плит. В нижней части бункера установлены два шнека

(рис. 3, а), вращающиеся с фиксированной скоростью и тем самым выталкивают раствор через выходное отверстие на конвейер, где смесь распределяется по всей поверхности.

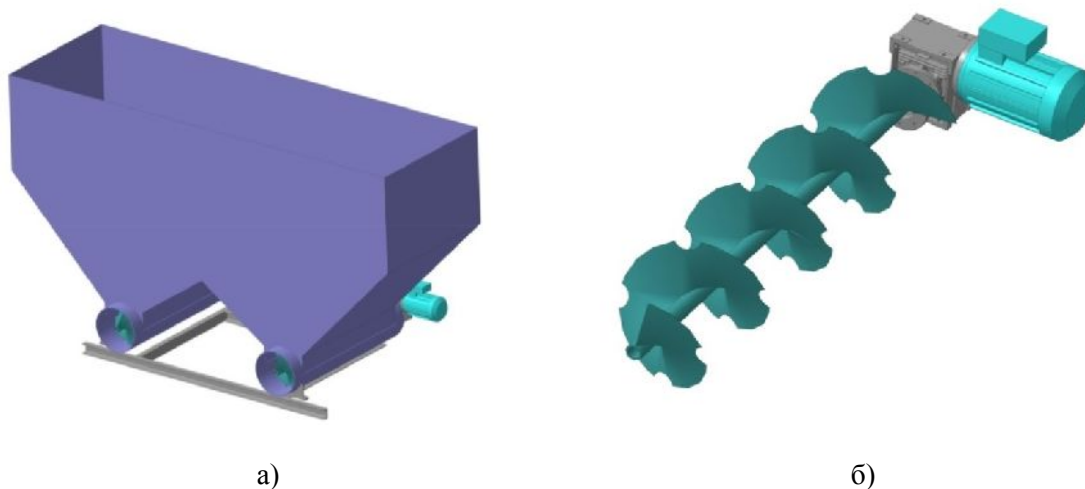


Рис. 3. Бункер-дозатор с рамой (а) и шнеками с приводом (б)

Подача материала в опалубку осуществляется двумя конвейерами с опрокидывающими устройствами (рис. 4, а). Эти конвейеры расположены вдоль рамы установки формирования плит зеркально друг к другу относительно середины установки. Назначение данных конвейеров – это распределение, накопление на поверхности конвейера готовой смеси для формирования плит и опрокидывания распределенной готовой массы в

опалубку. Смесь поступает из бункера дозатора за счет вращения приводных барабанов и перемещения ленты. Опрокидывание осуществляется за счет двух пневмоцилиндров, расположенных по краям конвейера. Опрокидывание конвейера осуществляется за счет двух пневматических цилиндров. Привод конвейера выполнен в виде мотора-барабана (рис. 4, б).

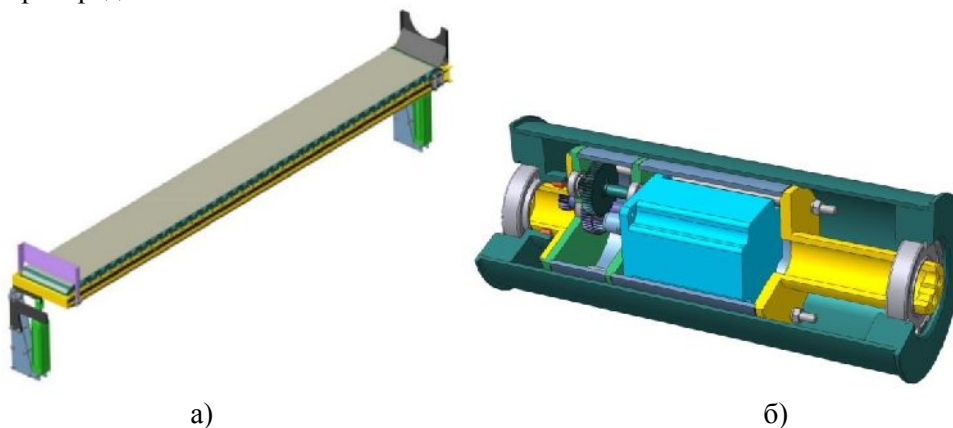


Рис. 4. Конвейер (а) с мотор-барабаном (б)

Трамбующее устройство (рис. 5, а) используется для уплотнения бетонной смеси после подачи ее на место укладки для удаления из нее воздушных пузырьков и придание ей максимальной плотности. За счет имеющейся пружины трамбователь (рис. 5, б) находится в постоянно напряженном состоянии. Усилие для трамбования передается за счет имеющегося «пневмомускула». Когда трамбователь занял позицию в начальном положении, штыри находятся в выдвинутом положении. С частотой в 2 Гц трамбующее устройство трамбует материал. После первого удара и

возвращения в начальное положение, за счет имеющихся пневмоцилиндров, штыри втягиваются в направляющую. Второй удар производится без участия штырей и материал еще сильнее уплотняется. Завершив трамбование, первый трамбователь занимает начальное положение и начинает работу второй трамбователь. После того как оба трамбователя завершили трамбование в начальном положении, они перемещаются на нужное расстояние за счет приводов и операции повторяются заново.

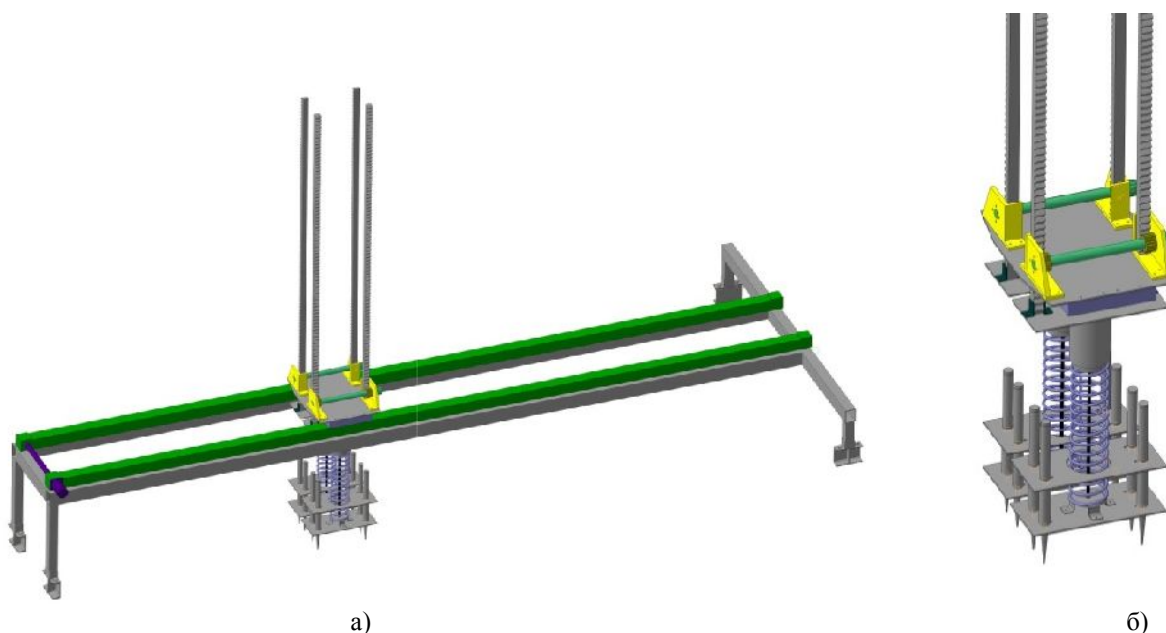


Рис. 5. Трамбующее устройство (а) с трамбователями (б)

Опалубка для формования плит – конструкция из металла и дерева, позволяющая придавать форму и габаритные размеры вязким смесям. В данном случае используется опалубка размерами  $3500 \times 1000 \times 400$  (мм). Собирается данная конструкция из квадратных профилей и деревянных листов. Профили для опалубки свариваются, деревянные листы крепятся винтами. Опалубка находится в неподвижном положении, т.к. установка будет передвигаться по цеху. Опалубка должна простоять не менее 30 минут с момента ее полной утрямбовки. Далее разобрав ее, можно передвигать по цеху сформированную плиту. Для складирования готовых плит нужно предварительно выдержать их в прохладном помещении, при этом они не должны соприкасаться. В таком положении плиты должны простоять три дня, после этого их можно складывать одну на другую.

**Результаты исследований.** Так как для проектируемой конструкции очень важно соотношение «масса/жесткость», то был выполнен инженерный анализ несущей системы установки. Инженерный анализ установки проводился в универсальной САЕ-системе ANSYS. Инженерный анализ включал следующие виды расчетов: на жесткость с условиями жесткого и упругого закрепления в стойках; модальный; динамический; тепловой и термдеформационный. В качестве типового конечного элемента использовался стержневой двухузловой элемент BEAM188. Результаты выполненного инженерного анализа позволили выполнить многовариантные расчеты различных конструкторских решений и добиться оптимального соотношения «масса/(статическая и динамическая) жесткость» несущей системы установки.

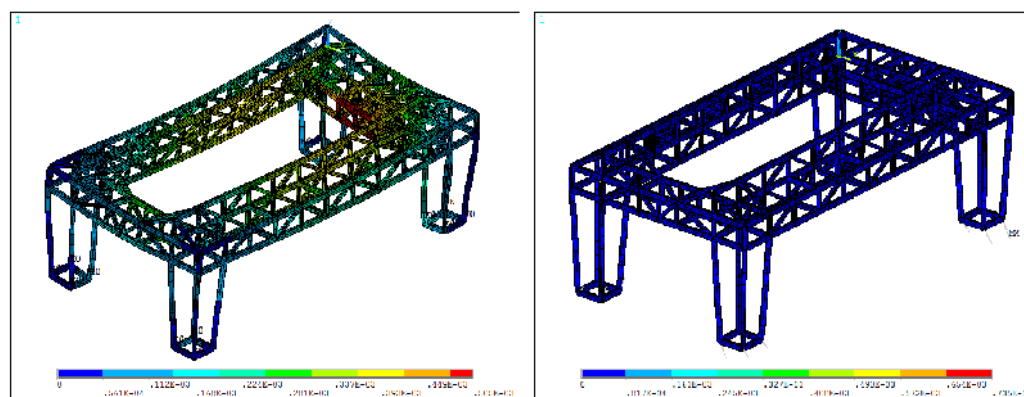
На рис. 6–8 в качестве примера представлен результат расчета рам установки формования плит, бункера-дозатора и конвейера.

Статический расчет несущей системы установки показал, что максимальная величина статических смещений рамы установки формования плит при упругих стойках составила около 0,5 мм, рамы бункера-дозатора – около 0,8 мм и рамы конвейера – около 0,08 мм. Эта величина деформации не влияет на точность изготовления плит и установку бункера-дозатора относительно конвейеров.

Установка формования плит обязательно использует трамбующее устройство, являющееся источником вибраций. Для их оценки был выполнен расчет собственных частот. Динамический расчет в заданном рабочем диапазоне частот позволил построить динамические характеристики [16, 17].

В качестве рабочего диапазона частот рассматривался интервал от 0 до 300 Гц. В этом диапазоне частот проявилось 20 частот. Минимальное значение частоты составило 14 Гц, максимальное – 280 Гц. Использование упругих опор обеспечило колебание несущей системы установки в области низких частот без искажения контура.

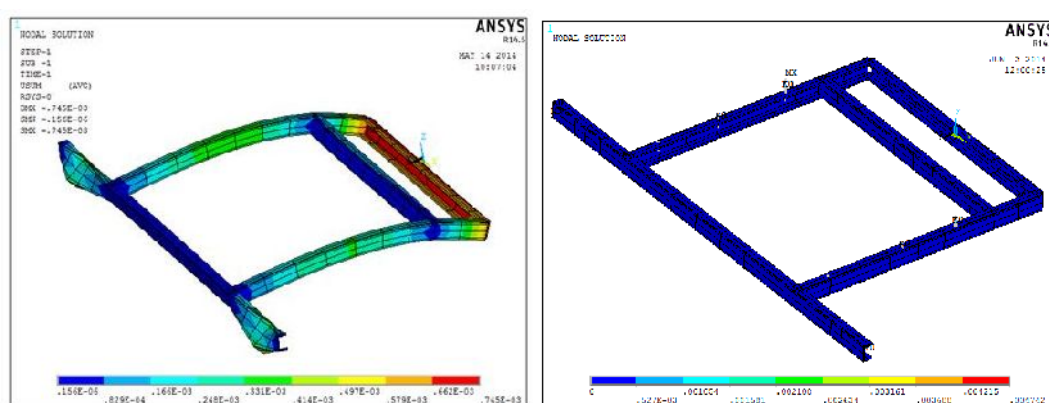
На рис. 9–11 в качестве примера приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), построенные по результатам динамического расчета несущей системы установки в САЕ-системе Ansys для осей: X, Y и Z. Ось X направлена вдоль конвейера, ось Y – поперек, а ось Z соответствует вертикальной оси.



а) результат расчета на жесткость

б) первая мода

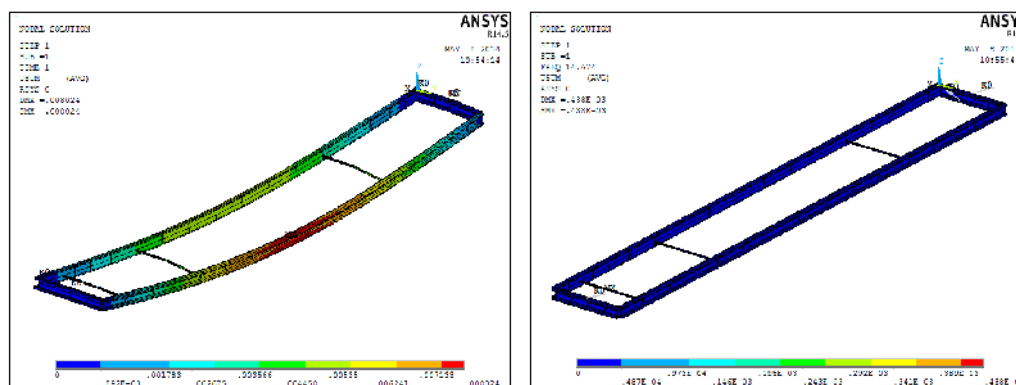
Рис. 6. Результат расчета рамы установки



а) результат расчета на жесткость

б) первая мода

Рис. 7. Результат расчета рамы бункера-дозатора



а) результат расчета на жесткость

б) первая мода

Рис. 8. Результат расчета рамы конвейера

Анализ АЧХ показал, что вдоль разных осей проявляются различные формы колебаний, а одинаковым значимым собственным частотам соответствуют различающиеся по величине амплитуды. Несмотря на то, что для спроектированной установки формования плит динамическая податливость не так критична, как для металлорежущих станков Тем не менее амплитуда динамической податливости имеет значение для надеж-

ного функционирования установки. Анализ амплитуд динамических перемещений, рассчитанных для рамы показал, что только вдоль оси Z их максимальная величина может пиково составить до 1,5 мм. Однако, максимальная частота вращения, установленных на установке двигателей, не превышает 1500 об/мин. Принимая во внимание, 40 %-ый размер неопределенности (+/- 20 %), нетрудно установить, что критичным диапазоном частот является область определения в пределах

от 20 до 30 Гц. Динамическая амплитуда колебаний в этой области частот не превышает 0,5 мм, что является вполне допустимым для такой конструкции. Аналогично для рамы бункера-дозатора в этом же диапазоне частот пиковые значения были установлены в пределах 10 мм. Так как ранее было отмечено, что для бункера важнейшим свойством является отсутствие налипания готовой смеси на его стенки, поэтому большая амплитуда колебаний полностью отвечает этому требованию. Рама конвейера испытывает колебания только вдоль оси Y. Их величина не превышает 1 мм.

Установка формирования древесно-бетонных плит не относится к высокоточной технике. Однако, множество установленных на ней электродвигателей, являющихся постоянными тепло-

выми источниками, обязательно приводит к тепловым деформациям. Чрезмерная величина которых может вызвать заклинивание в отдельных ответственных узлах конструкции и вызвать функциональный отказ установки. Поэтому для рамы установки был проведен анализ теплового и термодформационного состояний. Для расчета температурного поля установки были заданы условия формирования конвективного теплообмена и тепловых потоков. Термодформационный расчет – это расчет деформированного состояния, вызванного сложившимся тепловым состоянием. Количественный анализ сформированного термодформационного состояния показал незначительные температурные перемещения (менее 0,5 мм), сопоставимые с амплитудами динамических перемещений, причем только вблизи тепловых источников.

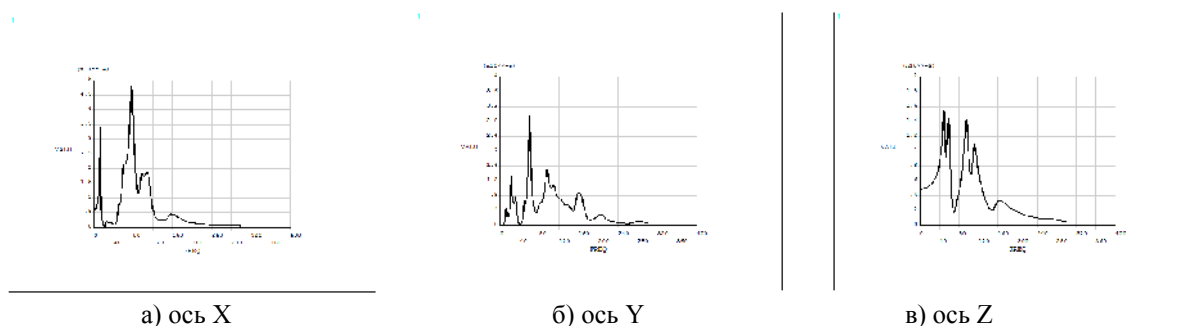


Рис. 9. Амплитудно-частотная характеристика рамы установки

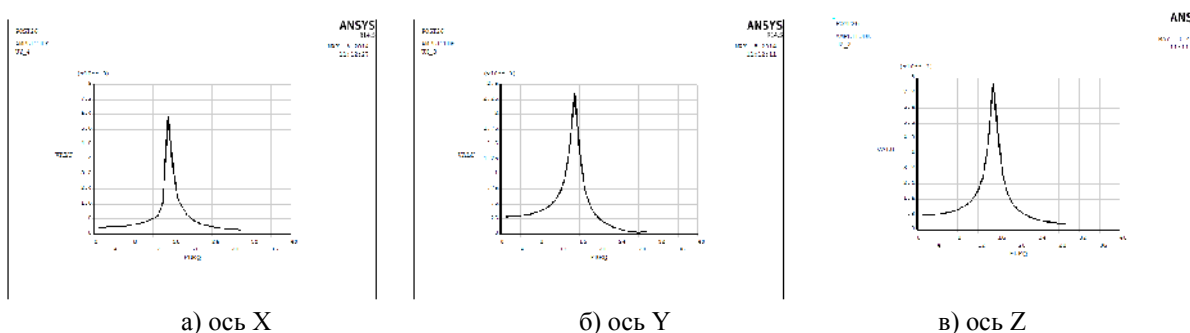


Рис. 10. Амплитудно-частотная характеристика рамы бункера-дозатора

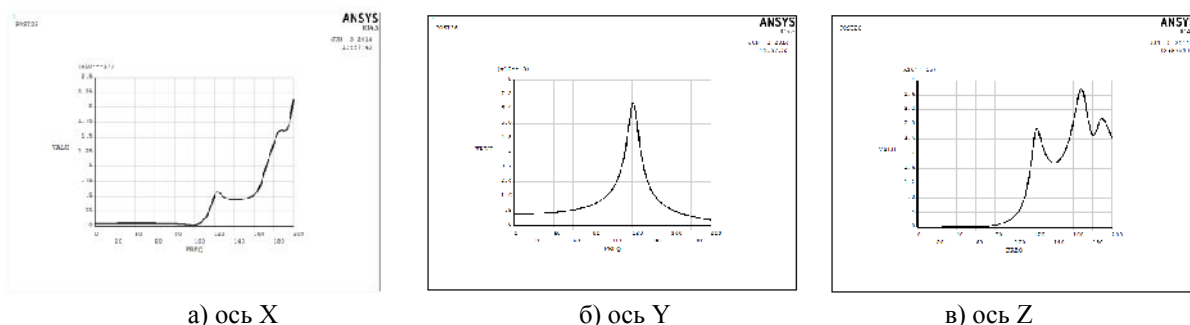


Рис. 11. Амплитудно-частотная характеристика рамы конвейера

**Выводы.** Таким образом, представленный в работе подход к созданию сложных механиче-

ских систем, заключающийся в сочетании автоматизированных систем проектирования различного типа, дает возможность не только создавать

многовариантное проектирование с использованием САЕ-систем, но и, используя возможности САЕ-систем, добиваться оптимальности конструкторских решений по нескольким критериям одновременно, т.е. решать многокритериальную задачу проектирования. Развитием работы может стать использование при проектировании несущей системы установки специальных процедур оптимизации, доступных сегодня в наиболее продвинутых САЕ-системах.

**Источник финансирования.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (Российский фонд фундаментальных исследований) и Оренбургской области в рамках научного проекта № 19-48-560001.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алёхина Е.А. Оценка конкурентоспособности стеновых панелей из арболита для малоэтажных зданий // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, 2015. № 3 (113). С. 43–46.
2. Чигвинцева Т.С., Тарасенко Е.А., Леонова А.Н. Арболитовые блоки как новый материал // Современные научные исследования и разработки. 2018. № 3 (20). С. 609–613.
3. Андриенко В.В., Пашкова М.Е. Арболитовые блоки и их применение / Безопасный и комфортный город: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. // Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (Орел, 27 сентября 2018 г.), Орел: Изд-во ОГУ им. И.С. Тургенева, 2018. С. 70–72.
4. Рубинская А.В., Чистова Н.Г., Зырянов М.А. Экологическая оценка получения модифицированного строительного материала на основе древесины // Научные труды SWorld. 2015. Т. 6. № 1 (38). С. 22–27.
5. Шапарин В.Д., Самошин А.П. Арболит. Производство и его преимущества // Молодежный научный вестник. 2017. № 5 (17). С. 160–164.
6. Матыева А.К. Модифицированный арболит из местного сырья Кыргызской Республики по энергосберегающей технологии для ограждающих конструкций зданий // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 4. С. 33–37.
7. Сорокин Д.С., Береговой В.А. Многокомпонентные вяжущие для бетонов на легких целлюлозосодержащих заполнителях // Молодой ученый. 2015. № 8 (88). С. 305–308.
8. Ягубкин А.Н., Бозылев В.В. Обоснование механизма повышения прочностных показателей арболита с направленной укладкой заполнителя // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. 2012. № 8. С. 63–66.
9. Толстой А.Д., Коломацкий А.С., Коломацкий А.С., Овсянников С.И. Древобетон на основе техногенного сырья / Современные технологии деревообрабатывающей промышленности: сб. материалов Междунар. науч.-практ. онлайн-конф. // Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (Белгород, 15–16 февраля 2018 г.), Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. С. 296–301.
10. Xu R., He T., Da Y., Liu Y., Li J., Chen C. Utilizing wood fiber produced with wood waste to reinforce autoclaved aerated concrete // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 208. Pp. 242–249.
11. Lia M., Khelifab M., El Ganaoui M. Mechanical characterization of concrete containing wood shavings as aggregate // International Journal of Sustainable Built Environment. 2017. Vol. 6(2). Pp. 587–596.
12. Akkaoui A., Caré S., Vandamme M., Experimental and micromechanical analysis of the elastic properties of wood-aggregate concrete // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 134. Pp. 346–357.
13. Бозылев В.В., Лисовский А.Л., Ягубкин А.Н. Промышленное внедрение технологии колебательного уплотнения арболита // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. 2015. № 8. С. 97–102.
14. Тюлькин Д.В. Разработка нового типа установки для производства арболита // Наука и бизнес: пути развития. 2017. № 8 (74). С. 5–8.
15. Дубовицкий С.И., Шитова И.Ю. Технологическая линия по производству арболитовых блоков // Молодежный научный вестник. 2017. № 10 (23). С. 60–64.
16. Поляков А.Н., Каменев С.В. Расчет базовых деталей станков в системе ANSYS: учебное пособие. Оренбург: ОГУ, 2006. 112 с.
17. Поляков А.Н., Каменев С.В., Романенко К.С. Расчет несущих систем станков в САЕ-системе Ansys: учебное пособие. Оренбург: ОГУ, 2013. 191 с.

## Информация об авторах

**Никитина Инна Петровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: innanikitina@list.ru. Оренбургский государственный университет, Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

**Поляков Александр Николаевич**, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов, профессор. E-mail: anp\_temos@mail.ru. Оренбургский государственный университет, Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

**Уткин Иван Анатольевич**, инженер-конструктор. E-mail: akimsk@gmail.com ООО "Газпром переработка", Оренбургский газоперерабатывающий завод, проектно-конструкторское бюро. Россия, 460068, Оренбургская обл., г. Оренбург, пос. Холодные Ключи.

Поступила в июле 2019 г.

© Никитина И.П., Поляков А.Н., Уткин И.А., 2019

<sup>1,\*</sup>*Nikitina I.P.*, <sup>1</sup>*Polyakov A.N.*, <sup>2</sup>*Utkin I.A.*

<sup>1</sup>*Orenburg State University.*

*Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13*

<sup>2</sup>*LLK «Gazprom pererabotka», Orenburg gas processing plant, design Bureau.*

*Russia, 460068, Orenburg region, Orenburg, village Holodnye Klyuchi*

*\*E-mail: innanikitina@list.ru*

## INSTALLATION OF FORMING WOOD-CONCRETE PLATES

**Abstract.** *The article presents an approach to the creation of complex mechanical systems, consisting in a combination of automated design systems of various types. This allows not only implementing multivariate design using CAD-systems, but also achieving optimal design solutions for several criteria simultaneously using CAE-systems. Thus, a multi-criteria design problem can be solved. The article presents new design solutions aimed at improving the performance of the installation for the molding of wood-concrete plates.*

*Calculations are made and the designs are presented: rotary wheel racks, which provide movement of the unit in two mutually perpendicular directions; dosing hopper, a conveyor that dispenses and discharges the finished mortar into the formwork using two pneumatic cylinders; plate forming installation frames; batch hopper frames; conveyor frame. The results of the engineering analysis of the frames for the installation of plate molding, metering hopper and conveyor are presented. Engineering analysis was carried out in the ANSYS CAE system. Engineering analysis included five types of calculations: the calculation of stiffness with the conditions of rigid and elastic fastening; modal; dynamic; thermal and thermal-deformational. The analysis of the obtained calculation results allowed making a conclusion about the insignificance of static and dynamic deformation of the frames. The assessment of the thermal deformation state of the elements of the carrier system of the installation for molding wood-concrete plates showed that the magnitude of the temperature displacements is comparable to the dynamic ones.*

**Keywords:** *plate molding, ramming device, hopper, formwork, thermal characteristics, modal analysis, dynamic calculation, CAD-system, CAE-system.*

## REFERENCES

1. Alyohina E.A. Evaluation of the competitiveness of wall panels of wood concrete for low-rise buildings [Ocenka konkurentosposobnosti stenovykh panelej iz arbolita dlya maloetazhnykh zdaniy]. Vestnik Donbasskoj nacional'noj akademii stroitel'stva i arhitektury. 2015. No. 3 (113). Pp. 43–46. (rus)
2. CHigvinceva T.S., Tarasenko E.A., Leonova A.N. Arbolite blocks as a new material [Arbolitovye bloki kak novyj material]. Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki. 2018. No. 3 (20). Pp. 609–613.
3. Andrienko V.V., Pashkova M.E. Arbolitovy blocks and their application [Arbolitovye bloki i ih primeneniye]. Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Bezopasnyj i komfortnyj gorod". Orlovskij gosudarstvennyj universitet imeni I.S. Turge-neva. 2018. Pp. 70–72. (rus)
4. Rubinskaya A.V., Chistova N.G., Zyryanov M.A. Environmental assessment of obtaining a modified wood-based building material [Ekologicheskaya ocenka polucheniya modifitsirovannogo stroitel'nogo materiala na osnove drevesiny]. Nauchnye trudy SWorld. 2015. Vol. 6. No. 1 (38). Pp. 22–27. (rus)
5. SHaparin V.D., Samoshin A.P. Wood concrete. Production and its advantages [Arbolit. Proizvodstvo i ego preimushchestva]. Molodezhnyj nauchnyj vestnik. 2017. No. 5 (17). Pp. 160–164. (rus)
6. Matyeva A.K. Modified wood concrete from local raw materials of the Kyrgyz Republic on energy-saving technology for building envelopes [Modifitsirovannyj arbolit iz mestnogo syr'ya kyrgyzskoj respubliky po energosberegayushchej tekhnologii dlya ograzhdayushchih konstrukcij]



zdaniy]. Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovaniy. 2019. No. 4. Pp. 33–37. (rus)

7. Sorokin D.S., Beregovoy V.A. Multicomponent binders for concrete on light cellulose-containing aggregates [Mnogokomponentnye vyazhushchie dlya betonov na legkih cellyulo-zosoderzhashchih zapolnitelyah]. Molodoj uchenyj. 2015. No. 8 (88). Pp. 305–308. (rus)

8. Yagubkin A.N., Bozylev V.V. Justification of the mechanism for improving the strength characteristics of wood concrete with directional packing of aggregate [Obosnovanie mekhanizma povysheniya prochnostnyh pokazatelej arbolita s napravlennoj ukladkoj zapolnitelya]. Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F: Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. 2012. No. 8. Pp. 63–66. (rus)

9. Tolstoj A.D., Kolomackij A.S., Kolomackij A.S., Ovsyannikov S.I. Wood based on technogenic raw materials [Drevobeton na osnove tekhnogenogo syr'ya]. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya onlajn-konferenciya "Sovremennye tekhnologii derevoobrabatvayushchej promyshlennosti". Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova. 2018. Pp. 296–301. (rus)

10. Xu R., He T., Da Y., Liu Y., Li J., Chen C. Utilizing wood fiber produced with wood waste to reinforce autoclaved aerated concrete. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 208. Pp. 242–249.

11. Lia M., Khelifab M., El Ganaoui M. Mechanical characterization of concrete containing wood shavings as aggregate. International Journal of

Sustainable Built Environment. 2017. Vol. 6(2). Pp. 587–596.

12. Akkaoui A., Caré S., Vandamme M., Experimental and micromechanical analysis of the elastic properties of wood-aggregate concrete. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 134. Pp. 346–357.

13. Bozylev V.V., Lisovskij A.L., Yagubkin A.N. Industrial introduction of the technology of oscillatory compaction of arbolit [Promyshlennoe vnedrenie tekhnologii koleba-tel'nogo uplotneniya arbolita]. Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F: Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. 2015. No. 8. Pp. 97–102. (rus)

14. Tyul'kin D.V. Development of a new type of plant for the production of wood concrete [Razrabotka novogo tipa ustanovki dlya proizvodstva arbolita]. Nauka i biznes: puti razvitiya. 2017. No. 8 (74). Pp. 5–8. (rus)

15. Dubovickij S.I., Shitova I.YU. Arbolite production line [Tekhnologicheskaya liniya po proizvodstvu arbolitovyh blokov]. Molodezhnyy nauchnyy vestnik. 2017. No. 10 (23). Pp. 60–64. (rus)

16. Polyakov A.N., Kamenev S.V. The calculation of the basic parts of machine tools in the system ANSYS: a tutorial [Raschet bazovyh detalej stankov v sisteme ANSYS: uchebnoe posobie]. Orenburg: OGU. 2006. 112 p. (rus)

17. Polyakov A.N., Kamenev S.V., Romanenko K.S. The calculation of the bearing systems of machines in the CAE-system Ansys: a tutorial [Raschet nesushchih sistem stankov v CAE-sisteme Ansys: uchebnoe posobie]. Orenburg: OGU. 2013. 191 p. (rus)

#### Information about the authors

**Nikitina, Inna P.** PhD, Assistant professor. E-mail: innanikitina@list.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

**Polyakov, Aleksandr N.** PhD, Professor. E-mail: anp\_temos@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

**Utkin, Ivan A.** Design engineer. E-mail: akimsk@gmail.com. LLK «Gazprom pererabotka», Orenburg gas processing plant, design Bureau. Russia, 460068, Orenburg region, Orenburg, village Holodnye Klyuchi.

---

*Received in July 2019*

#### Для цитирования:

Никитина И.П., Поляков А.Н., Уткин И.А. Установка формирования древесно-бетонных плит // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 137–145. DOI: 10.34031/article\_5da465e18130c2.46410279

#### For citation:

Nikitina I.P., Polyakov A.N., Utkin I.A. Installation of forming wood-concrete plates. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 9. Pp. 137–145. DOI: 10.34031/article\_5da465e18130c2.46410279

**К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ**

В связи с выявлением недопустимого объема необоснованного заимствования, редакция осуществила ретракцию статьи Щетининой Е.Д., Овчаровой Н.В. «Способы коммерциализации инноваций и роли посредников в процессе коммерциализации инноваций», опубликованную в Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №4. 127–129.

Первоисточник – статья Тихонов Н.А. «Эффективность способов коммерциализации инноваций» // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2012. №4 (40). С.104.

Научное издание

**«Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова»**  
**№ 9, 2019 г.**

Научно-теоретический журнал

**Координатор журнала**  
*Алфимова Наталия Ивановна*

**Редактор журнала**  
*Агеева Марина Сергеевна*

**Компьютерная верстка**  
*Яшкина Светлана Юрьевна*

**Перевод на английский язык**  
*Колесник Оксана Юрьевна*

**Учредитель журнала** – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»  
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

Журнал зарегистрирован Министерством РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовой информации ПИ №ФС77-26533

Сдано в набор 5.08.19. Подписано в печать 30.09.19. Формат 60×84/8  
Усл. печ. л. 16,97. Уч.-изд. л. 18,25  
Тираж 40 экз. Заказ 54. 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