

Научно-теоретический журнал  
**ВЕСТНИК**

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

6

2021

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

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

**№ 6, 2021 год**

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

**Vol. 6. 2021**

# Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

## научно-теоретический журнал

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

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

- 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
- 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)
- 05.23.05 – Строительные материалы и изделия (технические науки)
- 05.23.20 – Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия(архитектура)
- 05.23.21 – Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура)
- 05.23.22 – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)
- 05.23.22 – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура)
- 05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов (технические науки)
- 05.17.11 – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)
- 05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки)
- 05.02.07 – 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).

|  |  |
|--|--|
| <b>Наименование органа, зарегистрировавшего издание:</b> | Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций<br>Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.                                    |
| <b>Учредитель/Издатель:</b>                              | Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова)<br>Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46 |
| <b>Адрес редакции:</b>                                   | Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46,<br>БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 724/4 Гк  |
| <b>Адрес типографии:</b>                                 | Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46,<br>Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова   |
| <b>Тел:</b>  | +7 (4722) 30-99-77   |
| <b>E-mail:</b>   | VESTNIK@intbel.ru  |
| <b>Официальный сайт журнала:</b>                         | <a href="https://bulletinbstu.editorum.ru">https://bulletinbstu.editorum.ru</a>  |
| <b>Подписка и распространение</b>                        | Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке<br>Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 44446<br>Online подписка: <a href="http://www.akc.ru/itm/2558104627/">http://www.akc.ru/itm/2558104627/</a><br>Цена свободная |
| <b>Подписан в печать</b>                                 | 17.06.2021   |
| <b>Выход в свет</b>                                      | 05.07.2021   |

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 11,39. Уч.-изд. л. 12,25. Тираж 40 экз. Заказ № 54

# 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).

|  |  |
|--|--|
| <b>Founder / Publisher:</b>            | Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov)<br>46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation |
| <b>Editorial office address:</b>       | 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation<br>BSTU named after V.G. Shukhov, of. 724/4   |
| <b>Printing house address:</b>         | 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation<br>Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov   |
| <b>Tel:</b>                            | +7 (4722) 30-99-77   |
| <b>E-mail:</b>                         | VESTNIK@intbel.ru  |
| <b>Official website of the journal</b> | <a href="https://bulletinbstu.editorum.ru">https://bulletinbstu.editorum.ru</a>  |
| <b>Подписка и распространение</b>      | Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446<br>Online subscription: <a href="http://www.akc.ru/itm/2558104627/">http://www.akc.ru/itm/2558104627/</a>  |
| <b>Signed for printing:</b>            | 17.06.2021   |

**Главный редактор**

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

**Заместитель главного редактора**

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

**Члены редакционной коллегии**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Павлович Ненад**, PhD, проректор по научной работе и издательской деятельности, проф. Машиностроительного факультета Государственного Нишского университета (Республика Сербия, г. Ниш).

**Перькова Маргарита Викторовна**, д-р арх., проф., заведующий кафедрой архитектуры и градостроительства Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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

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

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

**Савин Леонид Алексеевич**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой мехатроники, механики и робототехники Орловского государственного 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-Берtram**, 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).

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

## CHIEF EDITOR

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

## DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

## MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

**Petr G. Grabov**, 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 NIIZH named after A.A. Gvozdeva AO «NIC «Stroitel'stvo» (Russian Federation, Moscow).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Margarita V. Per'kova**, Doctor of Architecture, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

- Сулейманова Л.А., Малюкова М.В., Корякина А.А.**  
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ПИГМЕНТА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ  
В СВЕТЯЩЕМСЯ АРХИТЕКТУРНО-ДЕКОРАТИВНОМ БЕТОНЕ 8
- Евдокимов А.Е.**  
НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ФЛАНЦЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ БАЛОК,  
ПОКРЫТИЕ ОДНОЭТАЖНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ (ОПЗ)  
С УЧЕТОМ ЕГО ГРИБОВИДНОСТИ 19
- Кладиева П.В., Моисеев М.В., Мозговой В.М.**  
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
АРМИРОВАНИЯ ИЗГИБАЕМЫХ ЯЧЕЙСТОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ 27
- Орлов П.А., Ильина Т.Н., Орлов К.П.**  
ВОЗДЕЙСТВИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ОБЛЕДЕНЕНИЕ  
ИСПАРИТЕЛЕЙ ВОЗДУШНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА 36
- Савина И.И.**  
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЗДАНИЙ И КОМПЛЕКСОВ  
ИННОВАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ 45
- Аль Савафи М.Х.**  
ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ  
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ 52

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

- Везенцев А.И., Кривенко Ю.Ю.**  
ГИДРОФОБИЗАЦИЯ ТОНКОДИСПЕРСНОГО МЕЛА 63

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Тихонов А.А., Польшин А.А., Любимый Н.С., Герасимов М.Д.**  
АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗГРУЗКИ КОВШЕЙ  
ЭЛЕВАТОРА 71
- Голдобина В.Г.**  
ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ КОМБИНИРОВАННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ 80
- Ганин П.Е., Кобрин А.И.**  
АЛГОРИТМЫ КИНЕМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОЗВЕННЫМИ  
МАНИПУЛЯЦИОННЫМИ РОБОТАМИ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ  
НЕЙРОННОЙ СЕТИ 87

## CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

- Suleymanova L.A., Maliukova M.V., Koryakina A.A.**  
RESEARCH OF PHOTOLUMINESCENT PIGMENT FOR USE IN LUMINOUS ARCHITECTURAL AND DECORATIVE CONCRETE 8
- Evdokimov A.E.**  
LOAD-BEARING CAPACITY OF THE FLANGE CONNECTION OF BEAMS, COVERING OF A SINGLE-STOREY INDUSTRIAL BUILDING TAKING INTO ACCOUNT ITS MUSHROOM SHAPE 19
- Kladieva P.V., Moiseev M.V., Mozgovoy V.M.**  
THEORETICAL JUSTIFICATION OF INCREASING THE EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF FLEXIBLE CELLULAR CONCRETE STRUCTURES 27
- Orlov P.A., Il'ina T.N., Orlov K.P.**  
EFFECTS OF MECHANICAL VIBRATIONS ON ICE FORMATION ON EVAPORATOR OF AIR HEAT PUMP 36
- Savina I.I.**  
MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF INNOVATIVE BUILDINGS AND COMPLEXES 45
- Al Sawafi M.H.**  
GEONFORMATION TECHNOLOGIES IN URBAN PLANNING 52

## CHEMICAL TECHNOLOGY

- Vezentsev A.I., Krivenko Yu.Yu.**  
HYDROPHOBIZATION OF FINE CHALK 63

## MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

- Tikhonov A.A., Polshin A.A., Lyubimy N.S., Gerasimov M.D.**  
ANALYTICAL STUDY OF THE UNLOADING PROCESS OF ELEVATOR BUCKETS 71
- Goldobina V.G.**  
ACCURACY OF HOLE PROCESSING WITH A COMBINED TOOL 80
- Ganin P.E., Kobrin A.I.**  
ALGORITHMS FOR KINEMATIC CONTROL OF MULTI-LINK MANIPULATION ROBOTS BASED ON A FUZZY NEURAL NETWORK 87



# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-8-18

*\*Сулейманова Л.А., Малюкова М.В., Корякина А.А.**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**\*E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ПИГМЕНТА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СВЕТЯЩЕМСЯ АРХИТЕКТУРНО-ДЕКОРАТИВНОМ БЕТОНЕ

**Аннотация.** Архитектурно-декоративный бетон с применением фотолюминесцентного пигмента аккумулирует солнечную энергию, которую преобразует в свет в темное время суток. Применение изделий с эффектом свечения обеспечивает увеличение безопасности в темное время суток и является дополнительным средством сигнализации на опасных и мало освещённых участках дорог, стоянках, велодорожках, а также позволяет характеризовать этот материал как функциональный (возможность изготовления широкой номенклатуры изделий), эстетически-выразительный (высокодекоративный в дневное время), экологичный (возможность изготовления с применением техногенных отходов). Бетон с применением фотолюминесцентных пигментов не должен утрачивать свойств свечения, при этом интенсивность свечения должна сохраняться достаточно длительный период времени. Критерием выбора портландцемента для светящихся архитектурно-декоративных бетонов являлся не только аспект декоративности бетона, но и эффект свечения. Проведен эксперимент по определению интенсивности свечения фотолюминесцентного пигмента в бетоне с применением белого и серого портландцементов. Предварительный анализ литературы и собственные исследования показали, что для усиления эффекта свечения фотолюминесцентного пигмента в бетоне поверхность изделий необходимо отшлифовать, что также целесообразно с позиции создания высокодекоративных поверхностей бетонных изделий. Оптимально подобранные материалы и способ обработки поверхности изделий обеспечивают декоративность архитектурного бетона и в дневное время.

**Ключевые слова:** архитектурно-декоративный бетон, фотолюминесцентный пигмент, светящийся бетон, белый портландцемент, интенсивность свечения.

**Введение.** В отечественной и зарубежной практике широко исследованы вопросы производства и применения архитектурно-декоративного бетона и изделий на его основе [1–7]. В состав декоративного бетона в зависимости от назначения могут вводиться пигменты или модификаторы с целью получения изделий с высокими эстетическими и эксплуатационными свойствами. В технологии изготовления изделий из декоративного бетона сложной конфигурации смесь должна характеризоваться достаточной удобоукладываемостью, минимальными усадкой и тепловлажностным расширением. Малые архитектурные формы эксплуатируются при агрессивном воздействии городской среды, поэтому изделия из декоративного бетона должны иметь высокие физико-механические характеристики. Эстетическая ценность таких изделий заключается в архитектурной выразительности поверхностной структуры. Малые архитектурные формы с такими свойствами органично интегрируются в любую архитектуру и дизайн среды [8, 9]. Тем не менее, вопрос функционального использования изделий из декоративного бетона в темное время суток ранее не рассматривался. Введение в состав декоративного бетона фотолюминесцентного пигмента, при сохранении

всех требуемых эксплуатационных характеристик, позволит обеспечить дополнительное свойство – свечение для архитектурной выразительности изделий в ночной период времени [10–14].

Актуальность данного исследования определяется тем, что эффект свечения позволяет расширить возможности функционального применения архитектурно-декоративных изделий и повысить их технико-экономическую эффективность за счет экономии электроэнергии путем исключения дополнительных источников освещения на некоторых территориях, а также повысить безопасность дорожного движения и пешеходных потоков.

В настоящее время применение фотолюминесцентного пигмента в бетоне исследовано недостаточно. Известный способ внедрения фотолюминесцентных пигментов в изделия из декоративного бетона, направленный на обеспечение свечения только верхнего декоративного слоя, имеет ряд существенных недостатков: он не обеспечивает свечение на весь период эксплуатации, технологически не позволяет изготавливать изделия сложных конфигураций и, в целом, снижает физико-механические характеристики.

Целью исследования является определение критериев подбора портландцемента для светящихся бетонов, определение влияния размера частиц фотолюминесцентного пигмента на длительность свечения архитектурно-декоративного бетона, с последующей возможностью изготовления светящихся изделий с лицевой поверхностью, формируемой в различных положениях и разных конфигурациях, при сохранении физико-механических характеристик бетона, с обеспечением стойкого свечения в темное время суток в течение всего срока службы.

**Материалы и методы.** Интенсивность свечения и фаза затухания фотолюминесцентного пигмента в бетоне определялась по разработанной авторами методикой, заключающейся в измерении яркости свечения люксметром в темном помещении (яркость освещения – 0 Лк) после накопления образцом световой энергии при выбранном источнике освещения. Исследования проводились с применением египетского белого портландцемента Aalborg SEM I 52,5 N, серого портландцемента ПЦ 500-Д0 (Новоросцемент), мраморной крошки фр. 0,2-0,5 с  $S_{уд} = 1570 \text{ кг/м}^3$ , введенной в смесь с целью экономии портландцемента, и фотолюминесцентных пигментов

ЛДП-2МА (40)П, ЛДП-2МА(70)П, ЛДП-2МА(100)П, заряжаемых при различных источниках освещения. Водостойкий фотолюминесцентный пигмент представляет собой оксидную матрицу на основе оксида алюминия, кристаллический мелкодисперсный порошок желтовато-зеленого оттенка. Свечение возбуждается излучением в коротковолновой области видимого спектра, люминесцирует в желто-зеленой области, имеет яркое послесвечение длительностью до 24 часов. Яркость послесвечения через 1 час 20–60 мкд/м<sup>2</sup>.

**Основная часть<sup>1</sup>.** На первом этапе целью эксперимента было определение степени зарядки фотолюминесцентного пигмента в архитектурном бетоне с применением белого и серого портландцементов при различных источниках освещения.

В бетонную смесь с применением белого СЕМ I 52,5 N (Египетский, Aalborg) и серого ПЦ 500-Д0 (Новоросцемент) портландцемента был введен фотолюминесцентный пигмент ЛДП-2МА (40)П на стадии сухого перемешивания в диапазоне 5 % от массы портландцемента. После этого образцы выдерживали в естественно-влажностных условиях в течение 14 суток (табл. 1).

Таблица 1

**Состав бетона с фотолюминесцентным пигментом с применением белого и серого портландцементов**

| № образца | Расход материалов кг/м <sup>3</sup> |                      |                             |  | В/Ц  |
|-----------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------------|--|------|
|           | Белый портландцемент                | Серый портландцемент | Мраморная крошка фр.0,2-0,5 | Фотолюминесцентный пигмент, 5 % от массы цемента |      |
| I         | 460                                 | –                    | 1570                        | 23,0   | 0,5  |
| II        | –                                   | 460                  | 1570                        | 23,0   | 0,52 |

После шлифовки поверхностного слоя рядка образцов осуществлялась при естественном освещении и с применением источников освещения Led различной мощности, светового потока и цветовой температуры (табл. 2).

Анализ данных показывает, что вид портландцемента оказывает существенное влияние на свечение образцов: серый портландцемент приглушает эффект свечения, не позволяя получить интенсивное свечение, в то время как использовании белого портландцемента, при одинаковой дозировке фотолюминесцентного пигмента, позволяет получать образцы с высокой интенсивностью свечения (рис. 1).

В ходе эксперимента было установлено, что максимальное свечение образцов обеспечивается зарядкой при естественном освещении, особенно

при солнечном свете с освещенностью в 50.000 Лк.

Также установлено, что на интенсивность свечения фотолюминесцентного пигмента в бетоне влияет и цветовая температура источника освещения. Пигмент лучше заряжается при искусственном освещении холодной цветовой температуры в 6500 К относительно теплой 3000 К.

Таким образом, установлено, что для изготовления светящихся архитектурно-декоративных бетонов целесообразно применять в качестве вяжущего только белый портландцемент. Поэтому все последующие эксперименты проводились с применением египетского белого портландцемента Aalborg SEM I 52,5 N.

На следующем этапе исследования проводилась оценка интенсивности свечения образцов,

<sup>1</sup>Часть исследований была представлена при защите НКР «Светящиеся декоративные бетоны с использованием отходов камнедробления горных пород».

изготовленных по составу: белый портландцемент Aalborg СЕМ I 52,5 N 460 кг/м<sup>3</sup>; мраморная крошка фр.0,2-0,5 1570 кг/м<sup>3</sup>; фотолюминесцентный пигмент ЛДП-2МА (40)П в количестве 5 %;

10 %; 15 %; 20 % от массы портландцемента (табл. 3), в зависимости от источника освещения и длительности зарядки.

Таблица 2

**Интенсивность свечения фотолюминесцентного пигмента в бетонных образцах в зависимости от времени зарядки и источника освещения**

| Источник света (мощность светового излучения, лм) | № образца | Интенсивность свечения образцов в темном помещении Лк, после зарядки в течение |         |         |         |         |
|---|-----------|--|---------|---------|---------|---------|
|   |           | 20 мин.  | 30 мин. | 40 мин. | 50 мин. | 60 мин. |
| Солнечный свет при ясной погоде (>50.000)         | I         | 1,17   | 1,50    | 1,79    | 1,83    | 2,60    |
|   | II        | 0,20   | 0,28    | 0,29    | 0,30    | 0,31    |
| Солнечный свет при пасмурной погоде (21.000)      | I         | 0,76   | 0,90    | 1,02    | 1,09    | 1,16    |
|   | II        | 0,11   | 0,16    | 0,25    | 0,26    | 0,13    |
| Сумерки (1.000)                                   | I         | 0,25   | 0,27    | 0,25    | 0,24    | 0,19    |
|   | II        | 0,03   | 0,02    | 0,02    | –       | –       |
| LED 11Вт 3000К (990)                              | I         | 0,20   | 0,21    | 0,23    | 0,24    | 0,24    |
|   | II        | 0,02   | 0,02    | 0,01    | –       | –       |
| LED 11Вт 6500К (990)                              | I         | 0,28   | 0,30    | 0,30    | 0,32    | 0,34    |
|   | II        | 0,03   | 0,02    | 0,01    | –       | –       |
| LED 15Вт 3000К (1200)                             | I         | 0,49   | 0,52    | 0,55    | 0,56    | 0,56    |
|   | II        | 0,03   | 0,02    | 0,01    | 0,01    | –       |
| LED 15Вт 6500К (1200)                             | I         | 0,51   | 0,55    | 0,57    | 0,58    | 0,61    |
|   | II        | 0,03   | 0,02    | 0,01    | 0,01    | 0,01    |
| LED 20Вт 3000К (1800)                             | I         | 0,57   | 0,61    | 0,65    | 0,67    | 0,68    |
|   | II        | 0,03   | 0,03    | 0,04    | 0,04    | 0,04    |
| LED 20Вт 6500К (1800)                             | I         | 0,64   | 0,67    | 0,68    | 0,7     | 0,72    |
|   | II        | 0,07   | 0,08    | 0,01    | 0,01    | 0,01    |

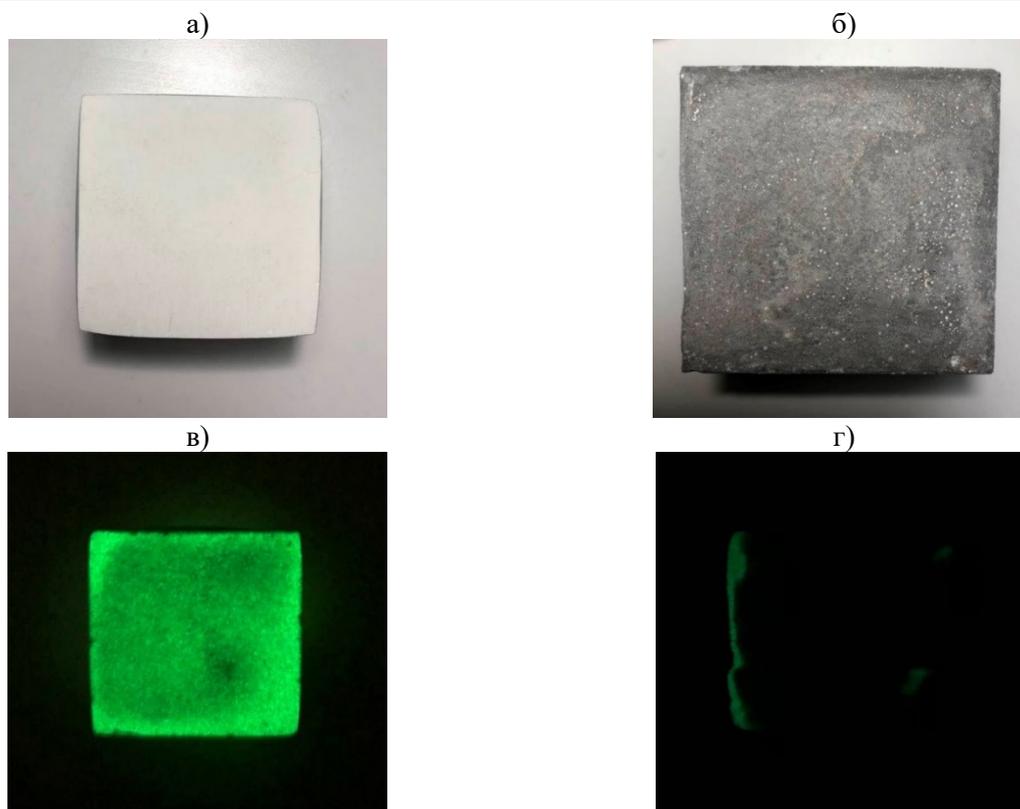


Рис. 1. Свечение образцов с фотолюминесцентным пигментом  
 а – образец с белым портландцементом; б – образец с серым портландцементом;  
 в – свечение образца с белым портландцементом; г – свечение образца с серым портландцементом

Анализ данных табл. 3 показал, что интенсивность свечения образцов увеличивается при повышении содержания фотолюминесцентного пигмента в бетоне (рис. 2). Однако очевидно, что интенсивность свечения образцов с содержанием пигмента 10 %; 15 % и 20 % при зарядке в различных источниках освещения изменяется несущественно. При этом следует отметить, что при

дозировке 5 % также наблюдается видимое свечение. Учитывая негативное влияние высокого процентного содержания пигментов на физико-механические характеристики бетона, для получения эффекта свечения будет обосновано принять за оптимальную дозировку диапазон 5–10 % фотолюминесцентного пигмента от массы портландцемента.

Таблица 3

**Интенсивность свечения бетонных образцов с разным количественным содержанием фотолюминесцентного пигмента в зависимости от источника освещения и времени зарядки**

| Источник света<br>(мощность светового излучения,<br>лм) | Дозировка<br>пигмента, % | Интенсивность свечения образцов в темном<br>помещении, Лк |          |          |          |          |
|---|--------------------------|---|----------|----------|----------|----------|
|   |                          | 20 минут  | 30 минут | 40 минут | 50 минут | 60 минут |
| Солнечный свет при ясной погоде<br>(>50.000)            | 5                        | 1,17  | 1,50     | 1,79     | 1,83     | 2,60     |
|   | 10                       | 1,65  | 1,68     | 1,89     | 2,11     | 2,97     |
|   | 15                       | 1,65  | 1,70     | 1,91     | 2,10     | 3,01     |
|   | 20                       | 1,67  | 1,79     | 1,95     | 2,12     | 3,00     |
| Солнечный свет при пасмурной<br>погоде (24.000)         | 5                        | 0,76  | 0,90     | 1,02     | 1,09     | 1,16     |
|   | 10                       | 0,79  | 0,98     | 1,10     | 1,28     | 1,54     |
|   | 15                       | 0,80  | 1,00     | 1,09     | 1,29     | 1,57     |
|   | 20                       | 0,82  | 1,03     | 1,10     | 1,32     | 1,59     |
| Сумерки (1.000)   | 5                        | 0,25  | 0,27     | 0,25     | 0,24     | 0,19     |
|   | 10                       | 0,42  | 0,47     | 0,59     | 0,62     | 0,63     |
|   | 15                       | 0,42  | 0,48     | 0,62     | 0,63     | 0,65     |
|   | 20                       | 0,44  | 0,49     | 0,65     | 0,65     | 0,67     |
| LED 11Вт 3000К (990)                                    | 5                        | 0,20  | 0,21     | 0,23     | 0,24     | 0,24     |
|   | 10                       | 0,29  | 0,32     | 0,35     | 0,35     | 0,36     |
|   | 15                       | 0,30  | 0,33     | 0,37     | 0,39     | 0,41     |
|   | 20                       | 0,30  | 0,34     | 0,37     | 0,40     | 0,41     |
| LED 11Вт 6500К (990)                                    | 5                        | 0,28  | 0,30     | 0,30     | 0,32     | 0,34     |
|   | 10                       | 0,36  | 0,37     | 0,39     | 0,40     | 0,42     |
|   | 15                       | 0,38  | 0,38     | 0,40     | 0,41     | 0,43     |
|   | 20                       | 0,49  | 0,42     | 0,43     | 0,43     | 0,43     |
| LED 15Вт 3000К (1200)                                   | 5                        | 0,49  | 0,52     | 0,55     | 0,56     | 0,56     |
|   | 10                       | 0,56  | 0,59     | 0,64     | 0,65     | 0,68     |
|   | 15                       | 0,58  | 0,60     | 0,64     | 0,66     | 0,68     |
|   | 20                       | 0,57  | 0,61     | 0,65     | 0,66     | 0,69     |
| LED 15Вт 6500К (1200)                                   | 5                        | 0,51  | 0,55     | 0,57     | 0,58     | 0,61     |
|   | 10                       | 0,62  | 0,62     | 0,66     | 0,67     | 0,69     |
|   | 15                       | 0,63  | 0,63     | 0,66     | 0,67     | 0,70     |
|   | 20                       | 0,63  | 0,64     | 0,66     | 0,68     | 0,71     |
| LED 20Вт 3000К (1800)                                   | 5                        | 0,57  | 0,61     | 0,65     | 0,67     | 0,68     |
|   | 10                       | 0,65  | 0,66     | 0,69     | 0,71     | 0,78     |
|   | 15                       | 0,67  | 0,68     | 0,70     | 0,73     | 0,79     |
|   | 20                       | 0,68  | 0,69     | 0,71     | 0,75     | 0,79     |
| LED 20Вт 6500К (1800)                                   | 5                        | 0,64  | 0,67     | 0,68     | 0,70     | 0,72     |
|   | 10                       | 0,71  | 0,77     | 0,79     | 0,81     | 0,82     |
|   | 15                       | 0,72  | 0,80     | 0,80     | 0,82     | 0,83     |
|   | 20                       | 0,74  | 0,79     | 0,82     | 0,83     | 0,85     |

Пигменты и наполнители как в исходном - порошкообразном состоянии, так и в составе пигментированного материала не однородны по размерам, т. е. характеризуются определенной полидисперсностью, и их распределение по размерам подчиняется интегральному закону распределения. Эти закономерности относятся и к фотолюминесцентным пигментам. Контроль размеров

частиц фотолюминесцентных пигментов открывает пути значительного снижения расхода дорогостоящих, и часто дефицитных пигментов. Характеристики фотолюминесцентных пигментов зависят как от физических, так и от химических свойств [15–20].

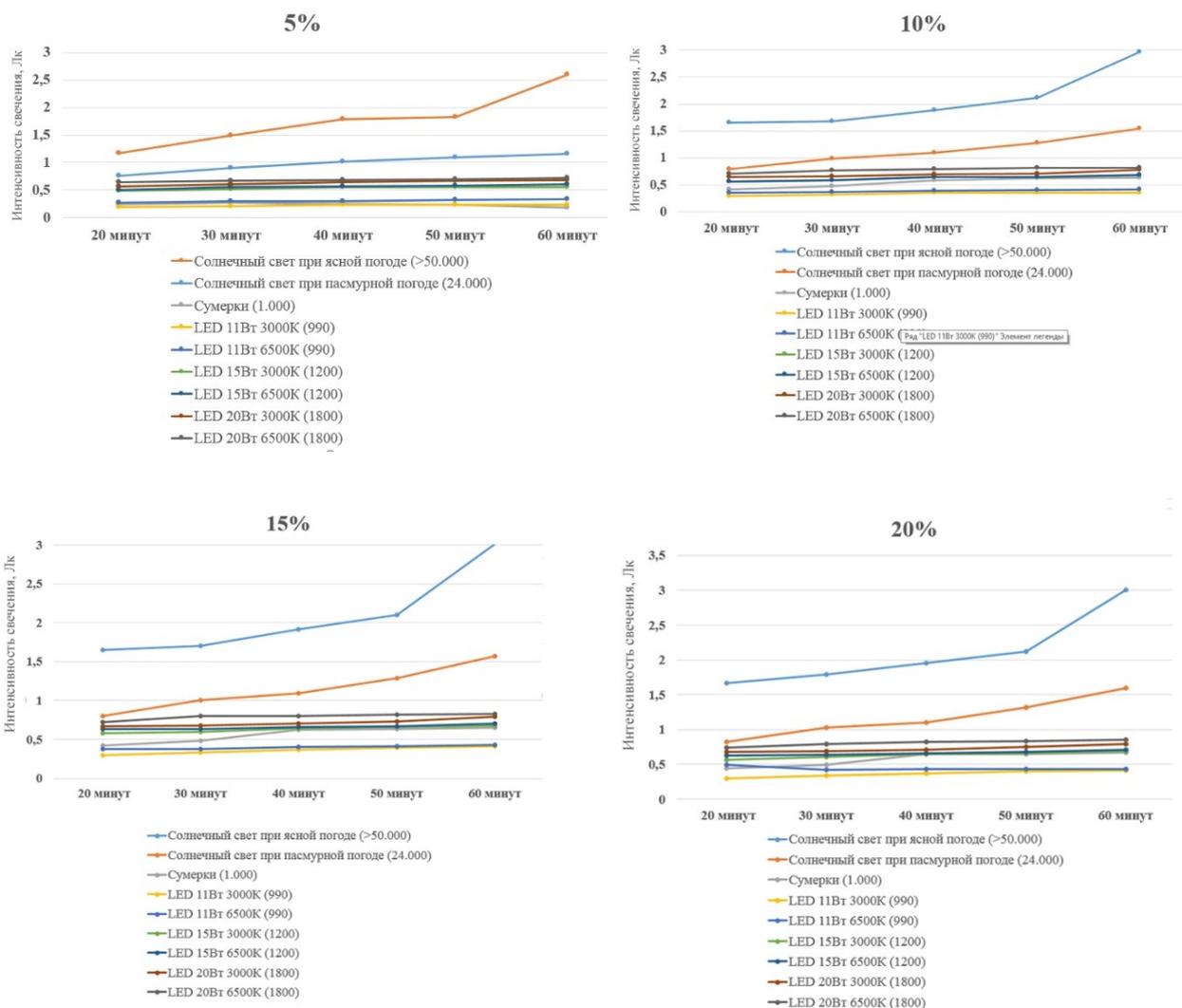


Рис. 2. Интенсивность свечения бетонных образцов с разным количественным содержанием фотолюминесцентного пигмента в зависимости от источника освещения и времени зарядки

На следующем этапе исследования было изучено влияние размера частиц пигмента на время послесвечения в архитектурно-декоративных бетонах. Оптимальное сочетание размера частиц светящихся пигментов и минеральных компонентов позволяет управлять не только реотехнологическими свойствами бетонных смесей, но и обеспечивает архитектурную выразительность в виде свечения при сохранении высокой эксплуатационной надежности.

Оценка изменения интенсивности свечения (затухания) в продолжительном периоде времени проводилась на образцах, изготовленных по составу: белый портландцемент 460 кг/м<sup>3</sup>; мраморная крошка фр. 0,2–0,5 1570 кг/м<sup>3</sup>; фотолюминесцентный пигмент с крупностью частиц 40 мкн; 70 мкн; 100 мкн в количестве 5 %; 10 %; 15 %; 20 % от массы портландцемента (табл. 4) с зарядкой при разных источниках освещения в течение 60 минут. Пигменты вводили в бетонную смесь на стадии сухого перемешивания. В зависимости от

размера частиц сравнивали фотолюминесцентные свойства пигментов в образцах бетона с помощью фотометрического оборудования.

Анализ данных исследования дает представление не только об интенсивности свечения, но и о фазах затухания, яркости свечения фотолюминесцентного пигмента в образцах бетона на белом портландцементе. Фаза интенсивного свечения пигмента продолжается первые 30–50 минут. В этой фазе послесвечение составляет 80–85 % от первоначальной яркости. Послесвечение через 60 минут составляет ~ 60 % от первоначальной яркости. Далее с каждым часом яркость послесвечения падает с меньшей скоростью, по сравнению с первой фазой. Через 120 минут составляет ~ 45 %. Далее с каждым часом снижается на 3–7 %. Таким образом, через 8 часов фотолюминесцентный пигмент в бетоне будет светиться с яркостью 20–25 % от первоначального, через 12 часов свечение составит 7–8 %, а через 14 часов около 4–5 %.

Таблица 4

**Снижение интенсивности свечения фотолюминесцентного пигмента ЛДП-2МА(40)П в образцах бетона с дозировкой пигмента в диапазоне от 5 до 20 % с зарядкой при различных источниках света**

| Источник света<br>(мощность<br>светового<br>излучения, лм) | Интенсивность свечения образцов в темном помещении, Лк |                     |                     |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|--|--|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|  | Количество<br>пигмента, %<br>от массы<br>цемента       | Через<br>30<br>мин. | Через<br>60<br>мин. | Через<br>120<br>мин. | Через<br>180<br>мин. | Через<br>240<br>мин. | Через<br>300<br>мин. | Через<br>360<br>мин. | Через<br>480<br>мин. |
| Солнечный свет<br>при ясной погоде<br>(>50.000)            | 5  | 2,60                | 1,59                | 1,18                 | 1,02                 | 0,92                 | 0,80                 | 0,66                 | 0,52                 |
|  | 10   | 2,97                | 1,80                | 1,35                 | 1,21                 | 1,05                 | 0,89                 | 0,74                 | 0,61                 |
|  | 15   | 3,01                | 1,81                | 1,36                 | 1,22                 | 1,06                 | 0,90                 | 0,76                 | 0,61                 |
|  | 20   | 3,00                | 1,81                | 1,36                 | 1,25                 | 1,06                 | 0,91                 | 0,77                 | 0,62                 |
| Солнечный свет<br>при пасмурной по-<br>годе<br>(24.000)    | 5  | 1,16                | 0,71                | 0,52                 | 0,51                 | 0,41                 | 0,35                 | 0,29                 | 0,24                 |
|  | 10   | 1,54                | 0,93                | 0,71                 | 0,62                 | 0,54                 | 0,47                 | 0,39                 | 0,30                 |
|  | 15   | 1,57                | 0,94                | 0,71                 | 0,63                 | 0,54                 | 0,48                 | 0,41                 | 0,31                 |
|  | 20   | 1,59                | 0,94                | 0,72                 | 0,64                 | 0,55                 | 0,48                 | 0,41                 | 0,33                 |
| Сумерки (1.000)  | 5  | 0,19                | 0,15                | 0,08                 | 0,07                 | 0,06                 | 0,05                 | 0,05                 | 0,04                 |
|  | 10   | 0,63                | 0,38                | 0,28                 | 0,25                 | 0,22                 | 0,19                 | 0,15                 | 0,13                 |
|  | 15   | 0,65                | 0,39                | 0,29                 | 0,25                 | 0,23                 | 0,19                 | 0,16                 | 0,14                 |
|  | 20   | 0,67                | 0,39                | 0,28                 | 0,26                 | 0,24                 | 0,20                 | 0,17                 | 0,14                 |
| LED 11Вт 3000К<br>(990)                                    | 5  | 0,24                | 0,15                | 0,11                 | 0,09                 | 0,08                 | 0,07                 | 0,06                 | 0,04                 |
|  | 10   | 0,36                | 0,22                | 0,16                 | 0,13                 | 0,12                 | 0,10                 | 0,09                 | 0,07                 |
|  | 15   | 0,41                | 0,23                | 0,16                 | 0,13                 | 0,13                 | 0,11                 | 0,10                 | 0,07                 |
|  | 20   | 0,41                | 0,24                | 0,18                 | 0,15                 | 0,14                 | 0,12                 | 0,11                 | 0,08                 |
| LED 11Вт 6500К<br>(990)                                    | 5  | 0,34                | 0,20                | 0,15                 | 0,13                 | 0,11                 | 0,10                 | 0,08                 | 0,06                 |
|  | 10   | 0,42                | 0,25                | 0,19                 | 0,16                 | 0,14                 | 0,12                 | 0,10                 | 0,08                 |
|  | 15   | 0,43                | 0,26                | 0,20                 | 0,17                 | 0,14                 | 0,13                 | 0,11                 | 0,08                 |
|  | 20   | 0,43                | 0,26                | 0,21                 | 0,17                 | 0,15                 | 0,13                 | 0,12                 | 0,09                 |
| LED 15Вт 3000К<br>(1200)                                   | 5  | 0,56                | 0,34                | 0,25                 | 0,22                 | 0,19                 | 0,17                 | 0,14                 | 0,11                 |
|  | 10   | 0,68                | 0,40                | 0,30                 | 0,27                 | 0,24                 | 0,20                 | 0,17                 | 0,14                 |
|  | 15   | 0,68                | 0,40                | 0,32                 | 0,28                 | 0,25                 | 0,21                 | 0,18                 | 0,15                 |
|  | 20   | 0,69                | 0,41                | 0,32                 | 0,28                 | 0,25                 | 0,22                 | 0,18                 | 0,16                 |
| LED 15Вт 6500К<br>(1200)                                   | 5  | 0,61                | 0,37                | 0,27                 | 0,24                 | 0,21                 | 0,18                 | 0,15                 | 0,12                 |
|  | 10   | 0,69                | 0,41                | 0,32                 | 0,27                 | 0,24                 | 0,20                 | 0,17                 | 0,14                 |
|  | 15   | 0,70                | 0,42                | 0,32                 | 0,28                 | 0,25                 | 0,22                 | 0,18                 | 0,15                 |
|  | 20   | 0,71                | 0,43                | 0,33                 | 0,33                 | 0,25                 | 0,22                 | 0,19                 | 0,15                 |
| LED 20Вт 3000К<br>(1800)                                   | 5  | 0,68                | 0,40                | 0,30                 | 0,27                 | 0,24                 | 0,20                 | 0,17                 | 0,14                 |
|  | 10   | 0,78                | 0,35                | 0,35                 | 0,31                 | 0,27                 | 0,23                 | 0,20                 | 0,15                 |
|  | 15   | 0,79                | 0,36                | 0,35                 | 0,32                 | 0,28                 | 0,23                 | 0,21                 | 0,15                 |
|  | 20   | 0,79                | 0,36                | 0,35                 | 0,33                 | 0,30                 | 0,24                 | 0,21                 | 0,16                 |
| LED 20Вт 6500К<br>(1800)                                   | 5  | 0,72                | 0,43                | 0,32                 | 0,28                 | 0,25                 | 0,21                 | 0,18                 | 0,15                 |
|  | 10   | 0,82                | 0,49                | 0,37                 | 0,33                 | 0,29                 | 0,24                 | 0,20                 | 0,17                 |
|  | 15   | 0,83                | 0,51                | 0,38                 | 0,34                 | 0,30                 | 0,25                 | 0,22                 | 0,18                 |
|  | 20   | 0,85                | 0,52                | 0,38                 | 0,35                 | 0,32                 | 0,27                 | 0,23                 | 0,19                 |

Исследование снижения интенсивности свечения на пигментах с размерами частиц, 70 и 100 мкм, проводилось при зарядке на солнечном свете в ясную погоду (50.000 лм) и при LED 20Вт 6500К (1800 лм), ввиду самых высоких показателей мощности светового излучения при естественном и искусственном свете. Результаты испытаний представлены в табл. 5.

Анализ данных исследования интенсивности свечения и фаз затухания свечения фотолюминесцентного пигмента ЛДП-2МА(70)П и ЛДП-

2МА(100)П в образцах бетона на белом портландцементе подтверждает закономерности, выявленные при испытаниях образцов с пигментом ЛДП-2МА(40)П (табл. 6).

Полученные данные свидетельствуют о незначительном влиянии размера частиц фотолюминесцентного пигмента на интенсивность свечения в бетоне, а также на фазы затухания. При измерениях были получены очень близкие показатели свечения образцов (рис. 3).

Таблица 5

**Снижение интенсивности свечения фотолюминесцентного пигмента ЛДП-2МА(70)П и ЛДП-2МА(100)П в образцах бетона с дозировкой пигмента в диапазоне от 5 до 20 % с зарядкой при различных источниках света**

| Источник света (мощность светового излучения, лм) | Свечение образцов в темном помещении, Лк |               |               |                |                |                |                |                |                |
|---|--|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|   | Количество пигмента, % от массы цемента  | Через 30 мин. | Через 60 мин. | Через 120 мин. | Через 180 мин. | Через 240 мин. | Через 300 мин. | Через 360 мин. | Через 480 мин. |
| <i>Фотолюминесцентный пигмент ЛДП-2МА(70)П</i>    |  |               |               |                |                |                |                |                |                |
| Солнечный свет при ясной погоде (50.000)          | 5  | 2,7           | 1,62          | 1,19           | 1,05           | 0,93           | 0,80           | 0,68           | 0,53           |
|   | 10                                       | 3,07          | 1,81          | 1,37           | 1,22           | 1,06           | 0,90           | 0,75           | 0,61           |
|   | 15                                       | 3,08          | 1,81          | 1,37           | 1,25           | 1,07           | 0,90           | 0,74           | 0,62           |
|   | 20                                       | 3,08          | 1,82          | 1,37           | 1,25           | 1,08           | 0,92           | 0,78           | 0,63           |
| LED 20Вт 6500К (1800)                             | 5  | 0,75          | 0,45          | 0,33           | 0,29           | 0,26           | 0,22           | 0,19           | 0,16           |
|   | 10                                       | 0,84          | 0,50          | 0,38           | 0,34           | 0,29           | 0,25           | 0,20           | 0,18           |
|   | 15                                       | 0,87          | 0,52          | 0,39           | 0,35           | 0,30           | 0,25           | 0,23           | 0,20           |
|   | 20                                       | 0,88          | 0,52          | 0,38           | 0,36           | 0,33           | 0,28           | 0,23           | 0,19           |
| <i>Фотолюминесцентный пигмент ЛДП-2МА(100)П</i>   |  |               |               |                |                |                |                |                |                |
| Солнечный свет при ясной погоде (50.000)          | 5  | 2,67          | 1,60          | 1,20           | 1,05           | 0,93           | 0,81           | 0,67           | 0,54           |
|   | 10                                       | 3,14          | 1,82          | 1,37           | 1,22           | 1,06           | 0,91           | 0,76           | 0,62           |
|   | 15                                       | 3,15          | 1,82          | 1,38           | 1,22           | 1,06           | 0,91           | 0,76           | 0,63           |
|   | 20                                       | 3,05          | 1,83          | 1,39           | 1,26           | 1,08           | 0,93           | 0,79           | 0,63           |
| LED 20Вт 6500К (1800)                             | 5  | 0,75          | 0,45          | 0,34           | 0,31           | 0,27           | 0,22           | 0,19           | 0,17           |
|   | 10                                       | 0,88          | 0,51          | 0,38           | 0,35           | 0,29           | 0,26           | 0,21           | 0,18           |
|   | 15                                       | 0,91          | 0,53          | 0,38           | 0,36           | 0,30           | 0,27           | 0,22           | 0,20           |
|   | 20                                       | 0,88          | 0,52          | 0,39           | 0,37           | 0,33           | 0,26           | 0,23           | 0,20           |

Таблица 6

**Сравнительный анализ времени затухания фотолюминесцентного пигмента ЛДП-2МА (40)П, ЛДП-2МА (70)П и ЛДП-2МА(100)П в образцах бетона с применением белого портландцемента и разной дозировкой пигментов**

| Источник света (мощность светового излучения, лм) | Интенсивность свечения образцов в темном помещении, Лк |               |                |                |                |                |                |                |
|---|--|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|   | Количество пигмента, % от массы цемента                | Через 60 мин. | Через 120 мин. | Через 180 мин. | Через 240 мин. | Через 300 мин. | Через 360 мин. | Через 480 мин. |
| <i>Фотолюминесцентный пигмент ЛДП-2МА(40)П</i>    |  |               |                |                |                |                |                |                |
| Солнечный свет при ясной погоде (50.000)          | 5  | 1,59          | 1,18           | 1,02           | 0,92           | 0,80           | 0,66           | 0,52           |
|   | 10   | 1,80          | 1,35           | 1,21           | 1,05           | 0,89           | 0,74           | 0,61           |
|   | 15   | 1,81          | 1,36           | 1,22           | 1,06           | 0,90           | 0,76           | 0,61           |
|   | 20   | 1,81          | 1,36           | 1,25           | 1,06           | 0,91           | 0,77           | 0,62           |
| LED 20Вт 6500К (1800)                             | 5  | 0,43          | 0,32           | 0,28           | 0,25           | 0,21           | 0,18           | 0,15           |
|   | 10   | 0,49          | 0,37           | 0,33           | 0,29           | 0,24           | 0,20           | 0,17           |
|   | 15   | 0,51          | 0,38           | 0,34           | 0,30           | 0,25           | 0,22           | 0,18           |
|   | 20   | 0,52          | 0,38           | 0,35           | 0,32           | 0,27           | 0,23           | 0,19           |
| <i>Фотолюминесцентный пигмент ЛДП-2МА(70)П</i>    |  |               |                |                |                |                |                |                |
| Солнечный свет при ясной погоде (50.000)          | 5  | 1,62          | 1,19           | 1,05           | 0,93           | 0,80           | 0,68           | 0,53           |
|   | 10   | 1,81          | 1,37           | 1,22           | 1,06           | 0,90           | 0,75           | 0,61           |
|   | 15   | 1,81          | 1,37           | 1,25           | 1,07           | 0,90           | 0,74           | 0,62           |
|   | 20   | 1,82          | 1,37           | 1,25           | 1,08           | 0,92           | 0,78           | 0,63           |
| LED 20Вт 6500К (1800)                             | 5  | 0,45          | 0,33           | 0,29           | 0,26           | 0,22           | 0,19           | 0,16           |
|   | 10   | 0,50          | 0,38           | 0,34           | 0,29           | 0,25           | 0,20           | 0,18           |
|   | 15   | 0,52          | 0,39           | 0,35           | 0,30           | 0,25           | 0,23           | 0,20           |
|   | 20   | 0,52          | 0,38           | 0,36           | 0,33           | 0,28           | 0,23           | 0,19           |
| <i>Фотолюминесцентный пигмент ЛДП-2МА(100)П</i>   |  |               |                |                |                |                |                |                |
| Солнечный свет при ясной погоде (50.000)          | 5  | 1,60          | 1,20           | 1,05           | 0,93           | 0,81           | 0,67           | 0,54           |
|   | 10   | 1,82          | 1,37           | 1,22           | 1,06           | 0,91           | 0,76           | 0,62           |
|   | 15   | 1,82          | 1,38           | 1,22           | 1,06           | 0,91           | 0,76           | 0,63           |
|   | 20   | 1,83          | 1,39           | 1,26           | 1,08           | 0,93           | 0,79           | 0,63           |
| LED 20Вт 6500К (1800)                             | 5  | 0,45          | 0,34           | 0,31           | 0,27           | 0,22           | 0,19           | 0,17           |
|   | 10   | 0,51          | 0,38           | 0,35           | 0,29           | 0,26           | 0,21           | 0,18           |
|   | 15   | 0,53          | 0,38           | 0,36           | 0,30           | 0,27           | 0,22           | 0,20           |
|   | 20   | 0,52          | 0,39           | 0,37           | 0,33           | 0,26           | 0,23           | 0,20           |

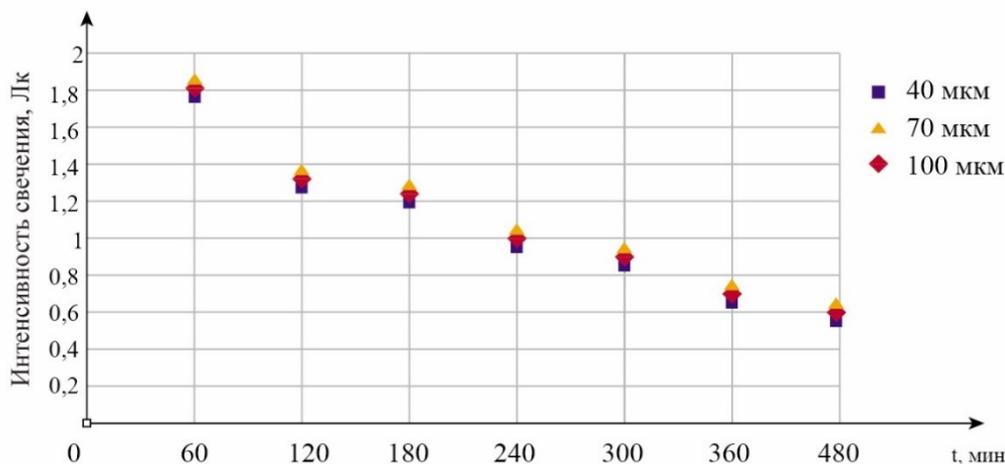


Рис. 3. График затухания интенсивности свечения фотолюминесцентных пигментов в бетоне, введенных в смесь в количестве 10 % от массы портландцемента, после зарядки при ясной погоде

**Выводы.** Результатами исследований подтверждено, что одним из основных критериев выбора портландцемента для светящихся архитектурно-декоративных бетонов является цвет цемента: серый портландцемент приглушает эффект свечения, в то время как использование белого портландцемента позволяет получать образцы с высокой интенсивностью свечения. Также установлено, что максимальное свечение образцов обеспечивается зарядкой при естественном освещении и солнечном свете с освещенностью в 50.000 Лк. Также определено, что на интенсивность свечения фотолюминесцентного пигмента в бетоне влияет и цветовая температура источника освещения. Пигмент лучше заряжается при искусственном освещении холодной цветовой температуры. Результаты экспериментов подтвердили, что интенсивность свечения увеличивается при повышении содержания фотолюминесцентного пигмента в бетоне, однако установлено, что интенсивность свечения образцов с содержанием пигмента выше 10 % при зарядке в различных источниках освещения изменяется незначительно. Доказано, что размер частиц пигмента не оказывает существенного влияния на интенсивность свечения бетона.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калашников В.И. Бетоны нового поколения и реологические матрицы // Новые энерго- и ресурсосберегающие наукоемкие технологии в производстве строительных материалов. Пенза. 2011. С. 25–41.
2. Сулейманова Л.А., Малюкова М.В., Крушельницкая Е.А. Высокопрочные декоративные бетоны // В сборнике: Наука и инновации в строительстве международной научно-практической конференции (к 165-летию со дня рождения В.Г.

Шухова). Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. С. 422–425.

3. Лесовик В.С. Геоника. Предмет и задачи: монография // 2-е изд., доп. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 219 с.

4. Vorobchuk V., Matveeva M., Peshkov A. Decorative concrete on white cement: Resource provision, technology, properties and cost-effectiveness // In MATEC Web of Conferences (Vol. 212). EDP Sciences. 2018. С. 110–117.

5. Сулейманова Л.А., Гридчин А.М., Малюкова М.В., Морозова Т.В. Повышение архитектурной выразительности плит бетонных тротуарных. // В сборнике: Наукоемкие технологии и инновации Юбилейная Международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова (XXI научные чтения). 2014. С. 347–353.

6. Хольберг Ресснер, Ed. Zuedlin AG. Новые возможности в области дизайна архитектурных фасадов // CPI Международное бетонное производство. 2013. №6. С. 152–155.

7. Сулейманова Л. А., Лесовик В. С., Сулейманов А. Г. Технология бетона строительных изделий и конструкций // Лабораторный практикум. Белгород, 2009.

8. Федоров В.В., Давыдов В. А., Скибина Е.В. Малые формы в структуре архитектурного текста // Архитектура и строительство России. 2013. № 6. С. 24–29.

9. Кузнецова Н.В., Яковлева К.Е. Проблемы организации общественно-коммуникативных точек в сложившейся жилой застройке города // Творчество и современность. 2018. № 1 (5). С. 102–107.

10. Yan Li, Shuxia Ren. Building Decorative Materials // Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. 2011, Pp. 10–24.



11. Volkov A.A., Sedov A.V., Chelyshkov P. D. The concept of "smart city" // М-vo obrazovaniya i nauki Ross. Russian Federation, 2015. Pp. 50–54.

12. Нехуженко Н.А. Основы ландшафтного проектирования и ландшафтной архитектуры // 2-е изд. Санкт-Петербург: ИД «Нева», 2011. 192 с.

13. Зверев В.М., Мельников Б.Н., Шерстюков М.С. Бетоны для изделий малых архитектурных форм // Журнал труды псковского политехнического института. 2011. № 14.2. С. 117–121.

14. Нурмухаметов Р.Н., Волкова Л.В., Кунавин Н.И., Клименко В.Г. Применение люминесцентных материалов для дорожных знаков и разметок // Известия МГТУ «МАМИ» № 2(4), 2007. С. 199–203.

15. Сулейманова Л. А., Малюкова М. В., Корякина А.А. Светящиеся декоративные бетоны с использованием отходов камнедробления горных пород // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. С.115–126.

16. Lusvardi G., Malavasi G., Menabue L., Smargiassi M. Systematic investigation of the parameters that influence the luminescence properties of photoluminescent pigments // J. Lumin. 2016. Pp. 70–74.

17. Filikman V.R., Sorokin Y.V., Kalashnikov O.O. Construction-technical properties particularly high strength quickly hardening concrete // Bet. i Zhelezobet. 2004. Pp. 170–174.

18. Купчикова Н.В., Жилияева Е.А., Кукушкина Л.О. Производство энергосберегающих самосветящихся отделочных плиток и бордюрных камней для строительства зданий и сооружений // Фундаментальные и прикладные исследования университетов, интеграция в региональный инновационный комплекс: Международная научно-практическая конференция. Доклады молодых ученых в рамках программы «У.М.Н.И.К.». Т. 4. Секция: «Машиностроение, электроника, приборостроение». Астрахань: ИП Сорокин Р.В., 2010. С. 139–141.

19. Архитектурное освещение фасада здания: [Электронный ресурс] URL: [http://fasadoved.ru/osveshhenie\\_arhitekturnoezdaniya.html](http://fasadoved.ru/osveshhenie_arhitekturnoezdaniya.html) (дата обращения: 11.02.2021)

20. Tunali A., Selli N.T. Influence of the photoluminescent Pigments' particle size distribution on the after glow duration // Acta Physica Polonica A. 2014. Pp. 89–96.

#### Информация об авторах

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

**Малюкова Марина Валерьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: [arbetlab@yandex.ru](mailto:arbetlab@yandex.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Корякина Алина Александровна**, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: [alina-koryakina.arch@gmail.com](mailto:alina-koryakina.arch@gmail.com). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 26.03.2021 г.

© Сулейманова Л.А., Малюкова М.В., Корякина А.А., 2021

**\*Suleymanova L.A., Maliukova M.V., Koryakina A.A.**  
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov  
\*E-mail: [ludmilasuleimanova@yandex.ru](mailto:ludmilasuleimanova@yandex.ru)

## RESEARCH OF PHOTOLUMINESCENT PIGMENT FOR USE IN LUMINOUS ARCHITECTURAL AND DECORATIVE CONCRETE

**Abstract.** Architectural and decorative concrete with the use of photoluminescent pigment accumulates solar energy, which is converted into light in the dark. The use of products with the glow effect provides an increase in safety in the dark. It is an additional mean of signaling on dangerous and poorly lit sections of roads, parking lots, bike paths. In addition, it allows to characterize this material as functional (the possibility of manufacturing a wide range of products), aesthetically expressive (highly decorative in the daytime), eco-friendly (the possibility of manufacturing with the use of man-made waste). Concrete with the use of photoluminescent pigments should not lose the properties of the glow, while the intensity of the glow should be maintained for a sufficiently long period. The criterion for choosing Portland cement for luminous architectural and decorative concretes is not only the aspect of decorative concrete, but also the effect of luminescence. An

*experiment is conducted to determine the degree of luminescence of photoluminescent pigment in concrete using white and grey Portland cement. A preliminary analysis of the literature and authors' own research has shown that in order to enhance the effect of the photoluminescent pigment glow in concrete, the surface of the products must be sanded, which is also advisable for creating highly decorative surfaces of concrete products. The optimally selected materials and the method of surface treatment of the products ensure the decorative effect of architectural concrete even in the daytime.*

**Keywords:** *architectural and decorative concrete, photoluminescent pigment, luminous concrete, white portland cement, luminous intensity.*

## REFERENCES

1. Kalashnikov V.I. New generation concretes and rheological matrices [Betony novogo pokoleniya i reologicheskie matricy]. New energy-and resource-saving high-tech technologies in the production of building materials. Penza, 2011. Pp. 25-41. (rus)
2. Suleymanova L.A., Malyukova M.V., Krushelnitskaya E.A. High-strength decorative concrete [Vysokoprochnye dekorativnye betony]. Science and Innovation in construction of the international scientific and practical conference (to the 165th anniversary of the birth of V. G. Shukhov). Belgorod: BSTU Publishing House, 2018. Pp. 422-425. (rus)
3. Lesovik V.S. Geonika. Subject and tasks [Geonika. Predmet i zadachi]. Belgorod: BSTU Publishing House, 2014. 219 p. (rus)
4. Vorobchuk V., Matveeva M., Peshkov A. Decorative concrete on white cement: Resource provision, technology, properties and cost-effectiveness. MATEC Web of Conferences EDP Sciences, 2018. Vol. 212. Pp. 110-117.
5. Suleymanova L.A., Gridchin A.M., Malyukova M.V., Morozova T.V. Improving the architectural expressiveness of concrete paving slabs [Povyshenie arhitekturnoj vyrazitel'nosti plit betonnyh trotuarnykh]. High-tech technologies and innovations Anniversary International Scientific and Practical Conference dedicated to the 60th anniversary of BSTU named after V. G. Shukhov (XXI scientific readings). 2014. Pp. 347-353. (rus)
6. Holberg Ressler, Ed. Zuedlin AG. New opportunities in the field of architectural facade design. CPI International Concrete Production. 2013. No. 6. Pp. 152-155.
7. Suleymanova L.A., Lesovik V.S., Suleymanov A.G. Technology of concrete construction products and structures [Tekhnologiya betona stroitel'nykh izdelij i konstrukcij]. Belgorod: BGTU, 2009. 218 p. (rus)
8. Fedorov V.V., Davydov V.A., Skibina E.V. Small forms in the structure of architectural text [Malye formy v strukture arhitekturnogo teksta]. Architecture and Construction of Russia. 2013. No. 6. Pp. 24-29. (rus)
9. Kuznetsova N.V., Yakovleva K.E. Problems of the organization of social and communicative points in the existing residential development of the city [Problemy organizacii obshchestvenno-kommunikativnykh toчек v slozhivshejsya zhiloj zastrojke goroda]. Creativity and modernity. 2018. No. 1 (5). Pp. 102-107. (rus)
10. Yan Li, Shuxia Ren. Building Decorative Materials. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. 2011. Pp. 10-24.
11. Volkov A., Sedov A., Chelyshkov P. The concept of "smart city". M-vo obrazovaniya i nauki Ross. Russian Federation, 2015. Pp. 50-54.
12. Nekhuzhenko N.A. Fundamentals of landscape design and landscape architecture. 2nd ed. St. Petersburg: Publishing House "Neva", 2011. 192 p.
13. Zverev V.M., Melnikov B.N., Sherstyukov M. S. Concrete for products of small architectural forms [Betony dlya izdelij malyh arhitekturnykh form]. Journal Proceedings of the Pskov Polytechnic Institute. 2011. No. 14.2. Pp. 117-121. (rus)
14. Nurmukhametov R.N., Volkova L. V., Kunavin N. I., Klimenko V. G. Application of luminescent materials for road signs and markings [Primenenie lyuminescentnykh materialov dlya dorozhnykh znakov i razmetok]. Izvestiya MSTU "MAMI". 2007. No. 2 (4). Pp. 199-203. (rus)
15. Suleymanova L.A., Malyukova M.V., Koryakina A.A. Luminous decorative concretes with the use of rock crushing waste. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Pp.115-126.
16. Lusvardi G., Malavasi G., Menabue L., Smargiassi M. Systematic investigation of the parameters that influence the luminescence properties of photoluminescent pigments. J. Lumin. 2016. Pp. 70-74.
17. Filikman V.R., Sorokin Y.V., Kalashnikov O. O. Construction-technical properties particularly high strength quickly hardening concrete. Bet. i Zhelezobet. 2004. Pp. 170-174.
18. Kupchikova N.V., Zhilyaeva E.A., Kukushkina L.O. Production of energy-saving self-luminous finishing tiles and curb stones for the construction of buildings and structures [Proizvodstvo energosberegayushchih samosvetyashchihsya otdelochnykh plitok i bordyurnykh kamnej dlya stroitel'stva zdaniy i sooruzhenij] Fundamental and applied research of universities, integration into the regional innovation complex: International Scientific and practical conference. Reports of young scientists in the framework of the program "U. M. N. I. K.".Section: "Me-

chanical engineering, electronics, instrument making". Astrakhan: IP Sorokin R. V. 2010. Vol. 4. Pp. 139–141. (rus).

19. Architectural lighting of the facade of the building. URL: <http://fasadoved.ru/osveshhenie/arhitekturnoe-zdaniya.html> (accessed: 11.02.2021).

20. Tunali A., Selli N.T. Influence of the photoluminescent Pigments' particle size distribution on the after glow duration. Acta Physica Polonica A. 2014. Pp. 89–96.

*Information about the authors*

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

**Maliukova, Marina V.** Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor. E-mail: [arbetlab@yandex.ru](mailto:arbetlab@yandex.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Koryakina, Alina A.** Postgraduate student. E-mail: [alinakoryakina.arch@gmail.com](mailto:alinakoryakina.arch@gmail.com). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 26.03.2021*

**Для цитирования:**

Сулейманова Л.А., Малиюкова М.В., Корякина А.А. Исследование фотолюминесцентного пигмента для применения в светящемся архитектурно-декоративном бетоне // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 6. С. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-8-18

**For citation:**

Suleymanova L.A., Maliukova M.V., Koryakina A.A. Research of photoluminescent pigment for use in luminous architectural and decorative concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 6. Pp. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-8-18

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-19-26

**Евдокимов А.Е.**

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

E-mail: cendo123@mail.ru

## НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ФЛАНЦЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ БАЛОК, ПОКРЫТИЕ ОДНОЭТАЖНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ (ОПЗ) С УЧЕТОМ ЕГО ГРИБОВИДНОСТИ

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы, касающиеся анализа узлов стальных конструкций. Предметом исследования является фланцевое соединение. Объект исследования – фланцевые соединения балок покрытий одноэтажных производственных зданий. С целью достижения поставленных задач в работе используются различные методы, в том числе анализ, синтез, описание, обобщение и сравнение. По результатам работы определены особенности формирования качества взаимодействия фланцевых соединений и высокопрочных болтов в виде узлового соединения балок покрытия. Дополнительно проведен анализ особенностей при проведении проектировочных работ и производства фланцевых соединений, используемых для реализации популярных конструктивных решений стальных поперечных рам ОПЗ. Кроме того, раскрыты основные направления анализа состояния стальных конструкций при наличии признаков деформации (грибовидности) фланцевого соединения. Полученные данные позволяют провести оптимизацию состава элементов усиления конструкции, а также снизить уровень трудоемкости работ при производстве и монтаже фланцевых соединений балок покрытий ОПЗ. В ходе исследования был проведен эксперимент, при котором был использован принцип симметрии. Однонаправленное соединение в узлах и между ними было смоделировано за счет рассмотренных элементов. В этом случае следует упоминать явление адгезионного эффекта узлов при сжатии и отсутствие сцепления при растяжении. Модель учитывает физическую нелинейность свойств материала, поведение которой было задано билинейными зависимостями под нагрузкой.

**Ключевые слова:** стальные конструкции, фланцевые соединения, балки покрытия, узлы.

**Введение.** В основе данного исследования лежит проблематика, касающаяся распределения контактных напряжений и рычагов во фланцевом соединении. Уже проводилось несколько работ ранее, задевающих эту проблему, но выход из строя болтов во фланцевом соединении конструкций во время строительства и эксплуатации ОПЗ все еще частое явление.

Данная проблема крайне актуальна, ведь до этого времени существовало множество заблуждений по распределению нагрузки фланцевого соединения. В том числе считалось, что эксцентриситет смещения растягивающих усилий рычага в болте под нагрузкой минимален, а соотношение жесткости не отражается на расчете фланцевого соединения. Для определения результирующей силы от напряжений, оказываемых на ось болта (с учетом перемены толщины фланца), необходимо детальное изучение фланцевых напряжений под шайбой головки болта. Целью работы было исследование несущей способности фланцевого соединения балок с учетом грибовидности здания. Объект исследования – конструктивные решения, применяемые для стержней открытого профиля [1].

**Материалы и методы.** Положение опоры определяется точкой приложения, так называе-

мой равнодействующей контакта между фланцами (рис. 1. b – Nf). Векторы Pf и Nb обозначают точки приложения сил на эту опору. При этом существует возможность перераспределения контактных напряжений в соединениях (шайбы, фланцы, головки болта), которая создает неопределенность действия данного рычага [1, 2].

Результирующие векторы Nb и Nf могут изменять направление и передвигаться. Эксцентриситет  $e_1$  смещается к оси фланцевой нагрузки от оси болта,  $e_2$  – от свободного края к фланцевой нагрузке. В данном случае решение задачи – определение значения эксцентриситетов (рис. 1) [3].

В ходе исследования был проведен эксперимент, при котором был использован принцип симметрии. Именно этот принцип и способствовал созданию модели (рис. 1), размеры модели в 4 раза меньше оригинального соединения. Сечение прутка, соединенного с фланцем с помощью угловых швов, равно 20 мм. Шаг резьбы фланца 5 мм, толщина в диапазоне 15-35 мм. Размер диаметра болтов 24 мм ( $d_b$ ).

Коэффициент масштабирования при моделировании учтен с помощью изменения слоев конечных элементов, влияющих на размер толщины исследуемого фланца [4, 5].

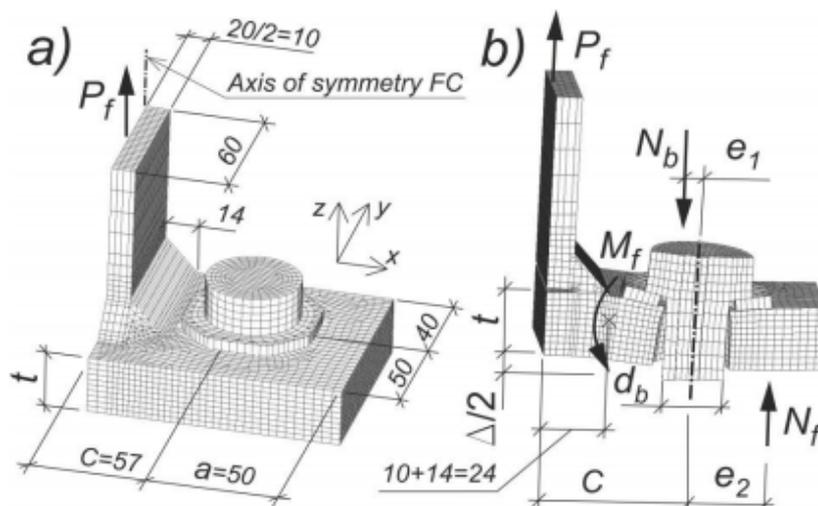


Рис. 1. Модель, учитывающая симметрию (а – симметрия фланцевого соединения; б – деформированная конечно-элементная модель расчета фланцевых соединений)

Однонаправленное соединение в узлах и между ними было смоделировано за счет рассмотренных элементов. В этом случае следует упоминать явление адгезионного эффекта узлов при сжатии и отсутствие сцепления при растяжении. Модель учитывает физическую нелинейность свойств материала, поведение которой было задано билинейными зависимостями под нагрузкой.

Для этого в элементах модели фланцевых соединений использованы упруго-пластические схемы работы из материала, соответствующего стали: пластина и приварка-С345, фланец-С255, шайба и винт-40Х «Select».

Загрузка модели проходила поэтапно. На первом этапе рассмотрено предварительное натяжение болта - усилие Nb имеет значение 240 кН. Последующие этапы были выполнены с равными

долями нагрузки Pf. К десятому этапу значение внешней нагрузки составляло 150 кН, при номинальном напряжении поперечного сечения 25 кН/см<sup>2</sup>.

Было выполнено ограниченное количество шагов нагружения, равное 20, что соответствует конечной прочности нагруженной плиты [7, 8].

Координаты образовавшихся Nf и Nb рассчитывались по аналогии с методом определения центра тяжести в механике. Для этого использовались значения продольных сил Ni в каждом контактном элементе (сила между узлами контактных поверхностей) и их положение xi относительно оси болта. Поэтому эксцентриситеты рассчитывались по формуле:

$$e_1, e_2 = \frac{\sum x_i \cdot N_i}{\sum N_i}$$

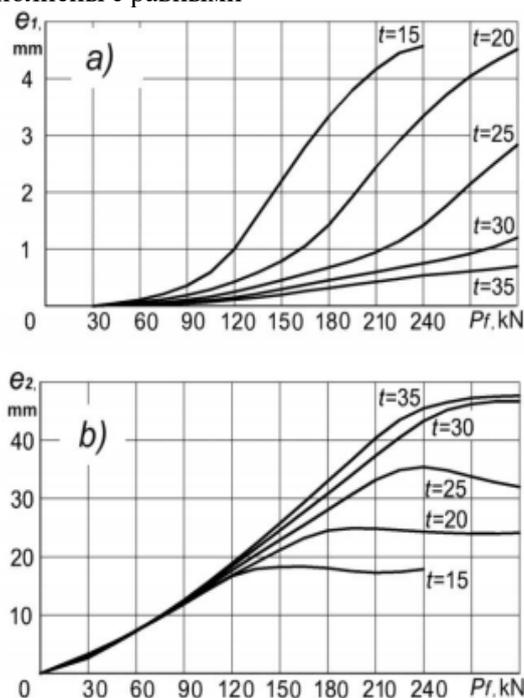


Рис. 2. Графики зависимости эксцентриситета (а – для e<sub>1</sub>, б – для e<sub>2</sub>)

Наиболее значительное изменение контактных напряжений под шайбой наблюдается для «тонких» фланцев  $t = 15$  мм, и, наоборот, контактные напряжения между фланцами более интенсивно смещаются к внешнему краю фланца для «толстых» фланцев при  $t = 35$  мм.

Результаты экспериментов представлены в виде графиков на рис. 2а и 2б. Зависимости

можно разделить на два участка, которые будут соответствовать упругой и упругопластической стадиям фланца [9].

Результаты исследования сведены в таблицу 1. Значения эксцентриситетов при максимальной нагрузке сведены в таблицу 2.

Изменение значений эксцентриситетов представлено в графике на рис. 3.

Таблица 1

### Зависимость толщины фланца от выдерживаемой внешней нагрузки

|                             |      |     |     |     |     |
|-----------------------------|------|-----|-----|-----|-----|
| Внешняя нагрузка $P_f$ , кН | 0-60 | 105 | 195 | 225 | 240 |
| Толщина фланца, $t$ , мм    | 15   | 20  | 25  | 30  | 35  |

Таблица 2

### Значение эксцентриситетов в точке максимальной нагрузки (240 кН) для различной толщины фланцев

|                          |      |      |      |      |      |
|--------------------------|------|------|------|------|------|
| Толщина фланца, $t$ , мм | 15   | 20   | 25   | 30   | 35   |
| Значение $e_1$ , мм      | 4,71 | 3,32 | 1,41 | 0,97 | 0,51 |
| Значение $e_2$ , мм      | 18   | 23   | 35   | 43   | 46   |

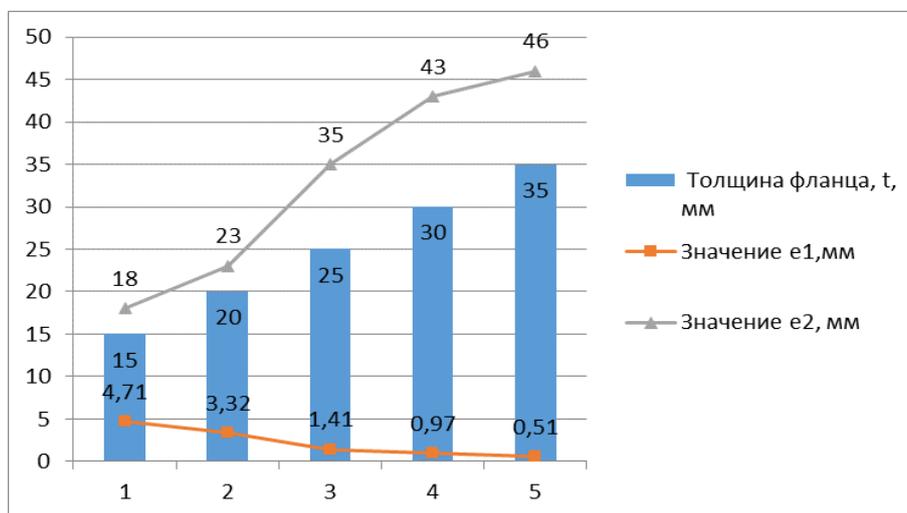


Рис. 3. Зависимость значения эксцентриситетов в точке максимальной нагрузки 240 кН от толщины фланца

Согласно проведенному исследованию выявлено, что отношение  $e_1/db$  снижается в 8,65 раз при росте показателя толщины фланца с 15 до 35 мм для внешней нагрузки, значение которой варьируется от 150 до 225 кН. Для отношения  $e_2/db$  наблюдается обратная тенденция, т. е. при нагрузках  $P_f = 150$  и 225 кН отношение  $e_2/db$  увеличивается в 1,4 и 2,5 раза соответственно [10, 11, 12].

**Основная часть.** Распространенное предположение о том, что соединение стенки балки передает сдвиг, а соединения полки балки передают момент, неточно.

Ряд исследователей пришли к выводу, основываясь как на экспериментальных данных, так и на моделировании методом конечных элементов, что значительный сдвиг передается на колонну через фланцевые соединения балки [13, 14].

Кроме того, распределение сдвига между стенкой балки и полками рядом с лицевой стороной колонны зависит от деталей соединения, различается в упругом и неупругом диапазонах поведения и зависит от степени неупругого вращения, поддерживаемого балкой. Формулы, предложенные в работах Вананта для прогнозирования распределения сдвига между стенкой балки и полками, основаны на гибком анализе и, поэтому не могут быть актуальными и применимыми.

Поведение соединения в негибком диапазоне представляет наибольший интерес для сейсмостойкого соединения и предварительной оценки соединений для ANSI / AISC 358. Кроме того, даже в гибком диапазоне поведения уравнения не позволяют правильно спрогнозировать величину сдвига, воспринимаемую полками балки при соединении балки с колонной.

Из исследований хорошо понятно, что полки балки переносят большую часть сдвига балки в сварных соединениях балки с колонной. Также понятно, что сдвиг в полках балки не только добавляет напряжение сдвига в полки балки, но также создает вторичные изгибающие напряжения во фланцах балки [15].

Дополнительные сложности возникают в состоянии напряжения в полках балки вблизи лицевой стороны колонны из-за изгиба полки колонны и влияния отверстий для доступа к сварке. Эти вопросы также широко изучались в исследованиях. Тем не менее, несмотря на сложности в состоянии напряжений в полках балки возле торца колонны, исследования и испытания также показали, что сварные соединения балки с колонной могут иметь очень большую циклическую пластичность, если они правильно спроектированы и детализированы. ANSI / AISC 358 предоставляет необходимое руководство по проектированию и строительству соединений между балками, способных обеспечить удовлетворительные сейсмические характеристики. Было бы неверно делать вывод, что такая проблема, как сдвиг в полках балки, каким-то образом не учитывалась исследовательским сообществом или не учитывалась при разработке соединений, прошедших предварительную квалификацию в ANSI / AISC 358 [16].

**Остаточные напряжения при усадке сварного шва.** Большинство соединений рамы с моментом проверяются с использованием образцов, построенных с отрезком балки длиной от 305 до 610 см, соединенным с колонной. Во время сварки на свободный конец балки обычно не накладывается никаких внешних ограничений. Однако неверно предполагать, что это делает эти тесты недействительными [17].

Проводились расчетные исследования сварочных остаточных напряжений в сварных моментных соединениях рамы. В исследовании рассчитывались остаточные напряжения в простом стыковом сварном соединении, в котором пластины не имели внешних ограничений [18].

Также вычислялись остаточные напряжения в сварном шве, соединяющем полку балки с колонной, где полка балки была полностью ограничена горизонтальным перемещением на небольшом расстоянии от сварного шва, что представляет собой более жесткие условия ограничения, чем в реальной конструкции.

Оба случая, с внешним ограничением или без него, показали очень высокие остаточные напряжения на уровне текучести как в продольном, так и в поперечном направлениях, а также значительную трехосность напряженно-деформируемого состояния (НДС) [19].

Эти результаты предполагают, что внешнее ограничение не требуется для создания высоких остаточных напряжений при сварке. Скорее, местные эффекты, которые хорошо представлены на образцах для испытаний на моментное соединение, обеспечивают сдерживание, приводящее к высоким остаточным напряжениям.

Например, в многопроходных сварных швах, используемых для соединения полки балки с колонной, усадка каждого прохода сдерживается предыдущими проходами. Кроме того, дифференциальное охлаждение сварного шва по ширине полки балки будет создавать большие остаточные напряжения даже при отсутствии внешнего ограничения на балку, поскольку части сварного шва, которые охлаждаются первыми, будут сдерживать части сварного шва, которые охлаждаются позже, за один и тот же сварной проход [20].

Исследования влияния остаточных напряжений при сварке на поведение моментных сварных соединений были проведены Chi et al. [1]. В своем исследовании они использовали остаточные напряжения, рассчитанные Zhang и Dong для случая, когда полка балки была полностью зажата [21].

Их исследования показали, что эти остаточные напряжения повышают требования к вязкости разрушения сварных швов полки балки и могут снизить прочность соединения на излом при наличии сварных швов с низкой вязкостью. Тем не менее, высокий уровень трещиностойкости, необходимый для сварных моментных соединений после северного гребня, в сочетании с улучшенными требованиями к детализации и контролю, обеспечивают существенно улучшенную защиту от преждевременного хрупкого разрушения в сварных швах полки балки и делают эти сварные швы очень устойчивыми к большим остаточным напряжениям.

Таким образом, неверно предполагать, что испытания, используемые для предварительной оценки моментных соединений для ANSI / AISC 358, недействительны на основе остаточных напряжений при сварке. Кроме того, как описано выше, текущие требования к сварке, детализации и проверке соединений моментной рамы обеспечивают надежные сварные швы с высоким допуском по остаточным напряжениям [22].

В своей статье Москалев пишет: «Моментное соединение с фланцевыми пластинами (BFP) использует фланцевые пластины в качестве соединительных элементов, и пластины могут свободно перемещаться при приварке к колонне; следовательно, в сварном шве существует лишь остаточное напряжение» [10]. Основываясь на исследовании Zhang и Dong (2000), описанном

выше, можно ожидать очень высоких остаточных напряжений в сварных швах, которые соединяют фланцевые пластины с колонной в болтовом соединении фланцевых пластин, и, конечно, их нельзя считать незначительными. Следовательно, проектировщикам не следует ослаблять требования к сварке, детализации и проверке соединения фланцевых пластин на болтах, полагая, что остаточные напряжения при сварке в этой связи незначительны [16].

#### **Сварное соединение фланцевых пластин.**

В своей статье г-н Ванант указывает, что соединение с приварной фланцевой пластиной (WFP) должно рассматриваться для предварительного отбора, но оно еще не было протестировано для предварительного отбора. Соединение WFP было протестировано в рамках проекта FEMA / SAC и включено в FEMA 350.

Проектировщики, заинтересованные в подключении к WFP, могут обратиться в FEMA 350 для получения рекомендаций по проектированию и детализации. Обратите внимание, однако, что соединение WFP еще не прошло предварительную квалификацию в ANSI / AISC 358.

Комиссия по предварительной квалификации соединений (CPRP) AISC отвечает за предварительную квалификацию соединений для включения в ANSI / AISC 358. CPRP, в свою очередь, соответствует требованиям для предварительной квалификации, указанным в главе К ANSI / AISC 341-16, Положения о сейсмических условиях для конструкционной стали. Как описано выше, ограниченное количество тестов было проведено на соединении WFP Kim et al. (2000), и неясно, достаточно ли этих тестовых данных для поддержки предварительной квалификации. Тем не менее, CPRP может рассмотреть возможность подключения к WFP для предварительной квалификации в будущем [24].

Предварительно квалифицированные моментные соединения в ANSI / AISC 358 прошли всестороннее тестирование, подтвержденное вычислительными и аналитическими исследованиями. Разработка и предварительная оценка соединений для ANSI / AISC 358 основаны на обширном объеме исследований моментных соединений, проведенных после землетрясения в Нортридже 1994 года, включая исследования сдвига во фланцах балки, остаточных напряжений при сварке и множества других вопросов. Хотя, безусловно, необходимы дополнительные исследования, существующие знания о поведении моментных соединений для сейсмических приложений очень сильны, и проектировщики могут быть уверены, что соединения в ANSI / AISC 358 обеспечат надежность и устойчивость при сейсмической нагрузке [24].

#### **Выводы.**

1. Конструкция открытого фланцевого профиля аналогична второму типу соединения. В нем точки внешней нагрузки и силы, возникающие от болта к фланцу, расположены с одной стороны от точки контакта результирующей силы между фланцами. В этом случае результирующие векторы меняют положение и значения в зависимости от внешней нагрузки и толщины фланца. Таким образом, результирующая сила между болтом и фланцем смещается от оси болта к оси нагрузки фланца, и возникающий силовой контакт между фланцами происходит в направлении, противоположном свободному краю фланца.

2. В построенном графике на рис. 3 наблюдается существующая линейная зависимость значения эксцентриситетов при максимальной нагрузке фланцевого соединения от его толщины. Причем изгибающий момент не зависит от толщины фланцевого соединения.

3. Согласно проведенному исследованию выявлено, что отношение  $e_1/db$  снижается в 8,65 раз при росте показателя толщины фланца с 15 до 35 мм для внешней нагрузки, значение которой варьируется от 150 до 225 кН. Для отношения  $e_2/db$  наблюдается обратная тенденция, т. е. при нагрузках  $P_f = 150$  и 225 кН отношение  $e_2/db$  увеличивается в 1,4 и 2,5 раза соответственно.

Полученные результаты способствовали определению особенностей формирования качества взаимодействия фланцевых соединений и высокопрочных болтов в виде узлового соединения балок покрытия. Дополнительно проведен анализ особенностей при проведении проекторочных работ и производства фланцевых соединений, используемых для реализации популярных конструктивных решений стальных поперечных рам ОПЗ. Раскрыты основные направления анализа состояния стальных конструкций при наличии признаков деформации (грибовидности) фланцевого соединения. Полученные данные позволяют провести оптимизацию состава элементов усиления конструкции, а также снизить уровень трудоемкости работ при производстве и монтаже фланцевых соединений балок покрытий ОПЗ.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Chi W.M., Deierlein G., Ingrassia A. Fracture Toughness Demands in Welded Beam-Column Moment Connections // Journal of Structural Engineering. 2000. V. 126. No. 1.
2. El-Tawil S., Mikesell T., Vidarsson E., and Kunnath S. Strength and Ductility of FR Welded-Bolted Connections // Rep. No. SAC/BD-98/01, SAC Joint Venture, Sacramento, Calif. 1998.



3. FEMA 2000. Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings. FEMA 350, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
4. Kim T., Whittaker A.S., Bertero V.V. Steel Moment-Resisting Connections Reinforced with Cover and Flange Plates // Report SAC/BD-00/27, SAC Joint Venture. 2000.
5. Lee K.H., Goel S.C., Stojadinović B. Boundary Effects in Welded Steel Moment Connections // Research Report UMCEE 97–20. The University of Michigan. 1997.
6. Uang C.M., Yu Q.S., Noel S., Gross, J. Cyclic Testing of Steel Moment Connections Rehabilitated with RBS or Welded Haunch // Journal of Structural Engineering. 2000. No. 1. Pp. 126–130.
7. Zhang J. and Dong P. Residual Stresses in Welded Moment Frames and Implications for Structural Performance // Journal of Structural Engineering. 2000. No. 3. Pp. 126–129.
8. Struik J.H., A. J. de Back. Stevin Laboratory, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands. 1969
9. Abidelah A. Analyse numérique du comportement d'assemblages métalliques. Approche numérique et validation expérimentale. Thèse en co-tutelle préparée au Laboratoire de Mécanique et Ingénieries (Université Blaise Pascal) et à la Faculté de Génie Civil. 2009
10. Moskalev N.S., Pronozin Ya.A., Korsun N.D. Metal structures, including welding. M.: ASV. 2014. Pp. 353–367.
11. Mityugov E.A. Kurs metallicheskih konstrukcij. M.: Izd-vo Associacii stroitel'nyh vuzov. 2010. 120 p.
12. Kopytov M.M. Metallokonstrukcii karkasov odnoetazhnyh zdaniy. Tomsk: Izd-vo Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2012. 316 p.
13. Marutyan A.S., Chernov P.S. Flancevye soedineniya metallokonstrukcij. Sovremennaya nauka i innovacii. 2015. No. 1 (9). Pp. 70–79.
14. Smirnova A.A. Proektirovanie flancevyh soedinenij metallokonstrukcij. Alleya nauki. 2018. No. 6. (22). Pp. 500–502.
15. Rekomendacii po raschetu, proektirovaniyu, izgotovleniyu i montazhu flancevyh soedinenij stal'nyh stroitel'nyh konstrukcij. M.: SO "Stal'montazh", VNIPI "Promstal'konstrukciya", CNIIPSK im. Mel'nikova. 1988. 83 p.
16. Zhang J., Dong P. Residual Stresses in Welded Moment Frames and Implications for Structural Performance // Journal of Structural Engineering. 2000. No. 3 (126). Pp. 70–78.
17. Krohalev V.G., Chebykin A.A. Tekhnologiya izgotovleniya metallokonstrukcij. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo universiteta, 2017. 180 p.
18. Katyushin V.V. Zdaniya s karkasami iz stal'nyh karkasov peremennogo secheniya. M.: Strojizdat. 2005. 450 p.
19. Shafray K.A. Features of work of flange connections of architectural and building structures. Off-center tension of bolts // Izvestiya Vuzov Construction. 2013. No. 7. Pp. 84–92.
20. Kriksunov E.Z., Perel'muter A.V., Yurchenko V.V. Raschetnye modeli flancevyh soedinenij karkasnyh soedinenij metallokonstrukcij i ih programmaya realizaciya v SCAD office. Vestnik stroitel'noj tekhniki. 2010. No. 1. Pp. 56–59.
21. Li D. Behaviour and design of demountable CFST column-column connections under tension // Journal of Constructional Steel Research. 2017. Pp. 761–773
22. Li D. Behaviour and design of demountable CFST column-column connections subjected to compression // Journal of Constructional Steel Research. 2018. No 141. Pp. 262–274.
23. Liu S.H. Bending-shear performance of column-to-column bolted-flange connections in prefabricated multi-high-rise steel structures // Journal of Constructional Steel Research. 2018. No. 145. Pp. 28–48.
24. Liu X.C. Compression-bend-shearing performance of column-to-column bolted flange connections in prefabricated multi-high-rise steel structures // Engineering Structures. 2018. No 160. Pp. 439–460.

*Информация об авторах*

**Евдокимов Алексей Евгеньевич**, аспирант кафедры МДК. E-mail: cendo123@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва Ярославское шоссе, 26.

*Поступила 01.12.2020 г.*

© Евдокимов А.Е., 2021

**Evdokimov A.E.**

National research Moscow State University of Civil Engineering

E-mail: cendo123@mail.ru

## LOAD-BEARING CAPACITY OF THE FLANGE CONNECTION OF BEAMS, COVERING OF A SINGLE-STOREY INDUSTRIAL BUILDING TAKING INTO ACCOUNT ITS MUSHROOM SHAPE

**Abstract.** The article deals with issues related to the analysis of steel frame structures. The subject of the study is the construction sector. The object of research is flanged joints of beams of coverings of one-storey industrial buildings. In order to achieve these goals, the following methods are used: analysis, synthesis, description, generalization and comparison. According to the results of the work, the features of forming the quality of interaction between flanged joints and high-strength bolts in the form of a nodal connection of coating beams are determined. Additionally, the analysis of features during the design work and production of flanged connections used for the implementation of popular design solutions for steel cross frames of single-storey buildings is carried out. The main directions of analysis of the state of steel structures in the presence of signs of deformation (mushroom shape) of the flange connection are disclosed. The obtained data helps to optimize the composition of structural reinforcement elements, as well as reduce the level of labor intensity in the production and installation of flange joints of single-storey buildings' coating beams. In the course of the study, an experiment is conducted in which the principle of symmetry is used. The unidirectional connection in and between nodes is modeled using the elements considered. In this case, it is necessary to mention the phenomenon of the adhesive effect of the nodes during compression and the lack of adhesion during tension. The model takes into account the physical nonlinearity of the material properties, the behavior of which is set by bilinear dependencies under load.

**Keywords:** steel structures, flanged connections, coating beams, nodes.

### REFERENCES

1. Chi W.M., Deierlein G., Ingrassia A. Requirements for fracture toughness in Welded Beam-Column Joints. Journal of Structural Engineering. 2000. V. 126. No.1.
2. El-Tawil S., Miksell R.T., Vidarsson E., Kunnath, S. Strength and ductility of welded FR-bolted joints. Rep. no. Sac/BR-98/01, joint venture of SAC, Sacramento, CA. 1998.
3. FEMA 2000. Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Frame Buildings. FEMA 350, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
4. Kim T., Whittaker A.S. Words steel moment-resisting connections reinforced with cover and flange plates.report GAK/BR-00/27, GAK SP. 2000.
5. Li K.H., Goel S.S., Stoyadinovich B. Boundary effects in welded steel torque joints. Research report UMCEE 97-20. University of Michigan. 1997.
6. Uang C.M., Yu Q.S., Noel S., Gross J. Cyclic Testing of Steel Moment Connections Rehabilitated with RBS or Welded Haunch. Journal of Structural Engineering. 2000. No. 1. Pp. 126–130.
7. Zhang J., Dong P. Residual Stresses in Welded Moment Frames and Implications for Structural Performance. Journal of Structural Engineering. 2000. No. 3. Pp. 126–129.
8. Struik J.H., A.J. de Back. Stevin Laboratory, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands. 1969
9. Abidelah A. Analyse numérique du comportement d'assemblages métalliques.Approche numérique et validation expérimentale. Thèse en co-tutelle préparée au Laboratoire de Mécanique et Ingénieries (Université Blaise Pascal) et à la Faculté de Génie Civil. 2009
10. Moskalev N.S., Pronozin Ya.A., Korsun N.D. Metal structures, including welding. M.: ASV. 2014. Pp. 353–367.
11. Mityugov E.A. Kurs metallicheskih konstrukcij. M.: Izd-vo Associacii stroitel'nyh vuzov. 2010. 120 p.
12. Kopytov M.M. Metallokonstrukcii karkasov odnoetazhnyh zdaniy. Tomsk: Izd-vo Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2012. 316 p.
13. Marutyanyan A.S., Chernov P.S. Flancevye soedineniya metallokonstrukcij. Sovremennaya nauka i innovacii. 2015. No. 1 (9). Pp.70–79.
14. Smirnova A.A. Proektirovanie flancevyh soedinenij metallokonstrukcij. Alleya nauki. 2018. No. 6 (22). Pp. 500–502.
15. Rekomendacii po raschetu, proektirovaniyu, izgotovleniyu i montazhu flancevyh soedinenij stal'nyh stroitel'nyh konstrukcij. M.: SO "Stal'montazh", VNIPI "Promstal'konstrukciya", CNIIPSK im. Mel'nikova. 1988. 83 p.
16. Zhang J., Dong P. Residual stresses in welded torque frames and their influence on the performance characteristics of structures. Journal of Structural Engineering. 2000. No. 3 (126). Pp. 70–78.

17. Krokhaliev V.G., Chebykin A.A. Technology of manufacturing metal structures. Yekaterinburg: Ural University Publishing House, 2017. 180 p.
18. Katyushin V.V. Buildings with frames made of steel frames of variable cross-section. M.: Stroyizdat. 2005. 450 p.
19. Shafray K.A. Features of the work of flanged joints of architectural and building structures. Displacement of the bolt tension center. *Izvestiya vuzov stroitelstva*. 2013. No. 7. Pp. 84–92.
20. Kriksunov E.Z., Perelmuter A.V., Yurchenko V.V. Calculation models of flanged joints of frame joints of metal structures and their software implementation in computer control systems. *Bulletin of construction equipment*. 2010. No. 1. Pp. 56–59.
21. Li D. Behavior and construction of detachable column-column CFST joints under tension. *Journal of Construction Steel Research*. 2017. Pp. 761–773
22. Li D. Behavior and design of CFST column-column split joints subjected to compression. *Journal of Structural Steel Research*. 2018. No. 141. Pp. 262–274.
23. Liu S.H. Flexural-shear characteristics of column-to-column bolted flange connections in panel multihigh high-rise steel structures. *Bulletin of structural steel scientific research*. 2018. No. 145. Pp. 28–48.
24. Liu. X.C. Compression-bending-shear characteristics of bolted flanged column-column joints in prefabricated multi-storey steel structures. *Engineering structures*. 2018. No. 160. Pp. 439–460.

*Information about the authors*

**Evdokimov, Aleksey E.** Graduate student. E-mail: cendo123@mail.ru. National research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26

---

*Received 01.12.2020*

**Для цитирования:**

Евдокимов А.Е. Несущая способность фланцевого соединения балок, покрытие одноэтажного промышленного здания (ОПЗ) с учетом его грибовидности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 6. С. 19–26. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-19-26

**For citation:**

Evdokimov A.E. Load-bearing capacity of the flange connection of beams, covering of a single-storey industrial building taking into account its mushroom shape. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2021. No. 6. Pp. 19–26. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-19-26

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-27-35

**\*Кладиева П.В., Моисеев М.В., Мозговой В.М.***Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**\*E-mail: davidenkovpolly@mail.ru*

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АРМИРОВАНИЯ ИЗГИБАЕМЫХ ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Аннотация.** Ячеистый бетон активно используется в строительстве энергоэффективных преимущественно в качестве кладочного материала для вертикальных несущих конструкций. В то же время создание замкнутого теплового контура здания, лежащее в основе современных требований энергосбережения, рационально применением ячеистого бетона в несущих горизонтальных конструкциях, требующих армирования. Традиционно используемая в строительстве стержневая арматура малоэффективна в ячеистом бетоне из-за особенностей структуры материала и механизмов включения арматуры в работу – низкого удельного сцепления на границе арматуры с бетоном и существенно меньшей, чем у тяжелых бетонов распределительной способности пристержневого объема бетона, равномерно включающего в работу бетонное сечение элемента, следствием чего является недоиспользование прочности арматуры из-за ее продергивания в бетоне. Авторские исследования в области рационализации арматурных элементов, эффективных в ячеистых бетонах, направленные на увеличение поверхности контакта арматурного элемента с бетоном при сохранении исходной металлоемкости, позволяют рекомендовать к использованию в армированных ячеистобетонных конструкциях ленточное армирование – стальные зубчатые ленты, равной стержневой арматуре площади сечения, но обладающие развитой боковой поверхностью, обеспечивающей повышение прочности сцепления арматуры с бетоном и предупреждающей ее продергивание. В статье представлены результаты численного исследования параметров напряженно-деформированного состояния моделей, армированных ячеистобетонных балок прямоугольного сечения, армированных предлагаемой ленточной арматурой в сравнении с традиционным стержневым армированием.

**Ключевые слова:** армированный ячеистый бетон, ячеистобетонные изгибаемые конструкции, ячеистобетонная балка, ячеистобетонная плита, ленточная арматура, стальная зубчатая лента.

**Введение.** Принципы рационального проектирования железобетонных конструкций сводятся к решению двух основных задач: повышению прочности конструкции, позволяющей обеспечить высокий технический уровень и надежность готового изделия, за счет учета фактической работы конструкции под действием нагрузки, и обоснованию ее экономической эффективности и снижению расхода материалов за счет совершенствования методов оценки напряженно-деформированного состояния железобетонной конструкции [1]. Железобетон – композитный материал, представляющий собой совокупность массива хрупкого бетона с включаемой в работу пластичной арматурой, с особыми свойствами – анизотропией, контролируемым трещинообразованием и непостоянной деформативностью в зависимости от характера нагружения, определяющими нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями конструкции [2]. Ячеистый бетон обладает еще более специфическими свойствами и также физически нелинеен, что делает приоритетными вопросы уточнения реальных физических моделей армированного ячеистого бетона, с учетом ряда факторов, оказывающих существенное влияние на его работу в составе изгибаемых конструкций [3].

**Методика.** Расчет железобетонных конструкций в линейной постановке без учета физической нелинейности работы материала, допускаемый на стадии предварительной оценки металлоемкости армирования методологически несложен и позволяет дать верхнюю оценку прочности конструкции. Уточнение параметров НДС конструкций, особенно для расчета по предельным состояниям второй группы, требует применения физически нелинейных моделей деформирования бетона и арматуры, на что направлен достаточно развитый и верифицированный методологический инструментарий современных строительных правил в России и за рубежом [4]. Однако, с точки зрения рационального учета фактических условий работы арматуры в ячеистых бетонах, очевидно, существенно отличающихся от работы арматуры в тяжелом бетоне как по физической модели работы, так и получаемому распределению напряжений в состоянии равновесия конструкции, строительные нормы для ячеистобетонных конструкций (СП 351.1325800.2017) все еще опираются на принципы работы и правила проектирования арматуры в тяжелых бетонах, с включением некоторого количества эмпирических поправок в деформативные характеристики бетона. Авторам представляется суще-

ственной рационализация положений строительных правил, регулирующих проектирование армированных ячеистобетонных конструкций, внесением корректировок в описание физической модели работы арматуры в бетоне и включением в анализ параметров арматурных элементов, определяющих форму поперечного сечения, позволяющую повысить расчетную эффективность включения арматуры в работу конструкции и оптимизировать металлоемкость изделия [5]. С этой целью авторами проведены предварительные численные исследования моделей ячеистобетонных балок, армированных традиционной стержневой и инновационной ленточной арматурой, обладающей развитой боковой поверхностью для более эффективного сцепления со структурно неоднородным ячеистым бетоном [6]. Исследования проводились в программном комплексе ЛИРА-САПР, реализующем метод конечных элементов в перемещениях, формирование исходных данных осуществлялось с исполь-

зованием положений действующих строительных правил, регулирующих проектирование бетонных и ячеистобетонных армированных конструкций [7, 15].

**Основная часть.** Установлено, что в отличие от обычного железобетона, предельное состояние которого по прочности в основном характеризуется прочностью вертикальных сечений от изгибающего момента и наклонных сечений от поперечной силы, конструктивный ячеистый бетон из-за сравнительно низкой прочности сцепления арматуры с бетоном имеет дополнительное характерное выражение предельного состояния по прочности – разрушение по наклонным сечениям от изгибающего момента вследствие продергивания арматуры [8]. Один из характерных примеров такого рода разрушения являются опытные образцы ячеистобетонных армированных перемычек, произведенных и испытанных в 2018 г. по ГОСТ 8829 на ОАО «Бонолит – Строительные решения» (рис. 1)

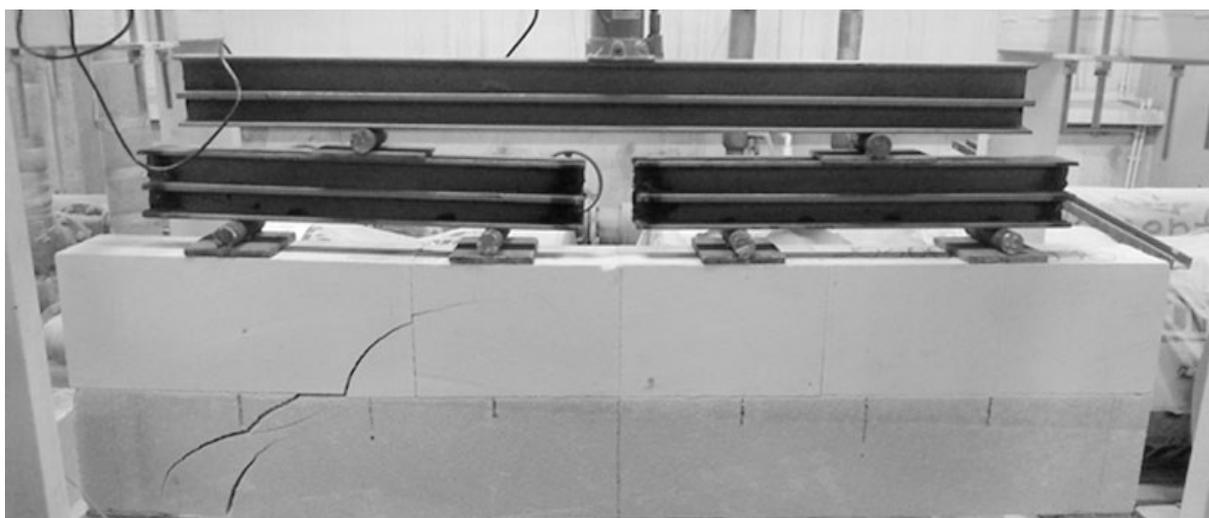


Рис. 1. Разрушение армированной ячеистобетонной, испытанной ОАО «Бонолит – Строительные решения», с продергиванием растянутой арматуры

Для демонстрации большей эффективности для несущей способности ячеистобетонных изгибаемых конструкций армирования их арматурными элементами, обладающими развитой боковой поверхностью, было выполнено моделирование и сравнительный физически нелинейный расчет параметров напряженно-деформированного состояния армированных ячеистобетонных балок прямоугольного сечения  $150 \times 200$  мм ( $b \times h$ ) пролетом 1,5 м из ячеистого бетона D500 B1,5, условно армированных традиционной стержневой и инновационной ленточной арматурой (стальными зубчатыми лентами) равной площади сечения [9]. Реализация физически нелинейного расчета и полный анализ фактического

напряженно-деформированного состояния армированной ячеистобетонной балки в ходе исследования влияния ленточного армирования на несущую способность изгибаемых конструкций из ячеистого бетона, выполнена с учетом заданных диаграмм деформирования материалов конструкции на основе метода конечных элементов в ПК Лира-САПР 2020.

Прочностные и деформативные характеристики ячеистого бетона и стальной арматуры (A500 и аналогичного класса) принимались согласно СТО НААГ 3.1–2013 «Конструкции с применением автоклавного газобетона в строительстве зданий и сооружений. Правила проектирования и строительства», СП 63.13330.2018 и СП

351.1325800.2017. Прочностные и деформативные свойства ячеистого бетона задавались трехлинейной диаграммой с начальным модулем деформации  $E_b = 1300$  МПа, прочностями бетона  $R_{b,n} = 1,4$  МПа ( $R_b = 0,95$  МПа) и  $R_{bt,n} = 0,22$  МПа ( $R_{bt} = 0,09$  МПа), коэффициентом ползучести  $\phi_{b,cr} = 3,9$  (для бетонов класса ниже В10), относительными деформациями бетона при продолжительном действии нагрузки при сжатии (1) и при растяжении (2).

$$\varepsilon_{b1} = 0,6R_b/E_{b,\tau} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{b1} = 0,0021, \quad \varepsilon_{b0} = 0,0034, \quad \varepsilon_{b2} = 0,0048,$$

$$\varepsilon_{b1} = 0,6R_{bt}/E_{b,\tau} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{b1} = 0,0002, \quad \varepsilon_{b0} = 0,00024, \quad \varepsilon_{b2} = 0,00031.$$

Прочностные и деформативные свойства стали задавались двухлинейной диаграммой с модулем деформации  $E_s = 206000$  МПа, прочностью стали  $R_s = 435$  МПа, относительными деформациями стали  $\varepsilon_{s0} = R_s/E_s = 0,0021$ ,  $\varepsilon_{s2} = 0,025$ . Расчетное армирование балки моделировалось продольными стержнями d10 A500 и полосами  $1,6 \times 50$  мм эквивалентной площади сечения (по одному стержню в растянутой и сжатой зоне), поперечное армирование стержнями d5 A240 с шагом 100 мм [10].

Модели балок нагружались равномерно распределенной по верхнему поясу нагрузкой, интенсивностью 10 кН/м, что соответствует экспериментально полученным в исследованиях ОАО «Бонолит – Строительные решения» значениям несущей способности по прочности балки сопоставимых размеров сечения и пролета.

Результаты расчета представлены ниже, и в целом, позволяют констатировать существенно более эффективное включение в работу, и как следствие, большую предполагаемую несущую способность ячеистобетонных балок, армированных элементами с развитой боковой поверхностью (стальными зубчатыми лентами) [11]. Так, расчетный прогиб балки, армированной стержнями круглого сечения (рис. 2, слева) составил до 1,5 мм, в то время как расчетный прогиб балки, армированной стальными лентами, не превысил 1,2 мм. Появлению трещин в растянутой зоне соответствовало 60 % полной нагрузки в случае стержневой арматуры и 80 % ленточной, что позволяет установить большую на 20 % жесткость балок, армированных лентами, при большем включении арматуры в работу.

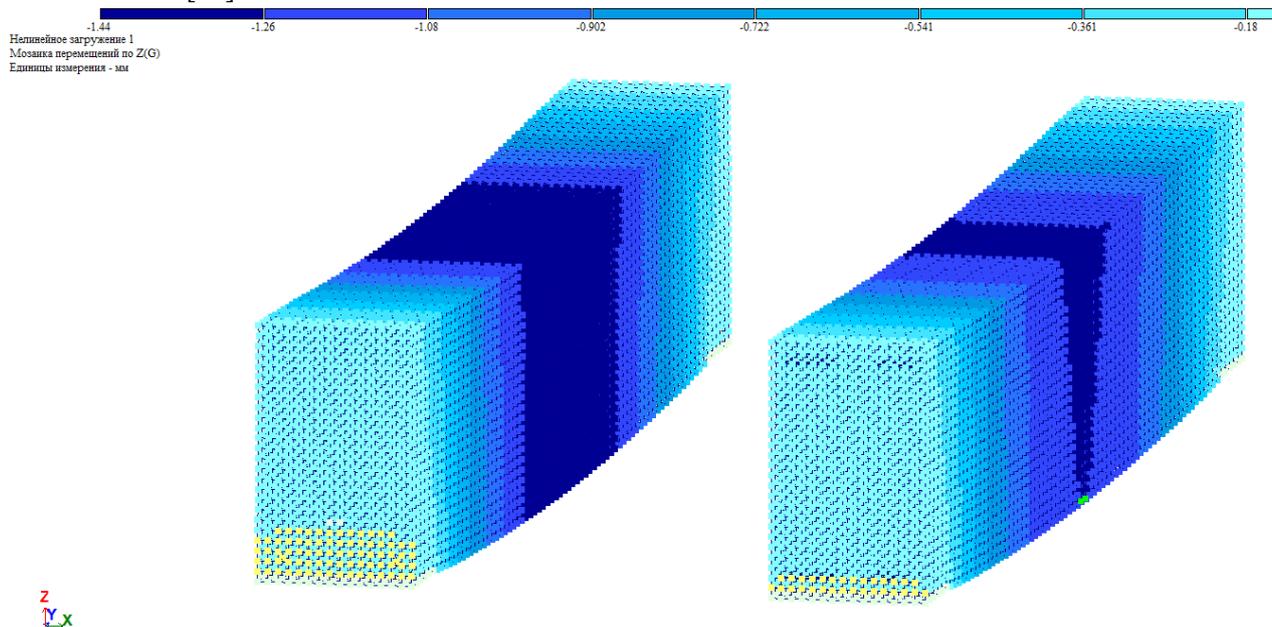


Рис. 2. Расчетные прогибы численных моделей равнонагруженных балок, армированных стержневой арматурой круглого сечения (слева) и стальными лентами (справа) равного поперечного сечения, мм

Продольные сечения балок, приведенные на рис. 3 показали существенно меньшую концентрацию напряжений в приарматурных объемах бетона для балок, армированных ленточной арматурой. Так для бетона балок со стержневой арматурой значения главных продольных напряжений составило до 0,346 МПа, преимущественно сосредоточившись в пределах одного-двух ко-

нечных элементов вглубь от стержневой арматуры, что превышает прочность ячеистого бетона на растяжение до трех раз, и, очевидно, разрушив приарматурный слой, вызовет продергивание арматуры в реальных балках, в пределах четверти пролета с обеих опор [12]. Балка, армированная лентами, продемонстрировала существенно более равномерное распределение главных напряжений, максимально составляющих 0,17 МПа,

что сопоставимо с нормативной прочностью ячеистого бетона на растяжение.

Армированная ленточной арматурой балка имеет большей высоты и полноты сжатую зону бетона нормальных пролетных сечений (рис. 4), меньшие на 15–20 % главные напряжения в наклонных опорных сечениях.

Большее и наиболее эффективное включение в работу стали ленточного арматурного элемента соответствует примерно равному уровню

развиваемых в арматурных элементах внутренних усилий, представленному на рис. 6. Продольные усилия в стержневых элементах балки, армированной ими, составили 4,6 кН растяжения/сжатия, что при площади арматурного стержня  $A_s = 79 \text{ мм}^2$  составит 58 МПа, в то время как расчетные продольные напряжения в пластинах, моделирующих ленточное армирования той же площади сечения составляют 60,2 МПа.

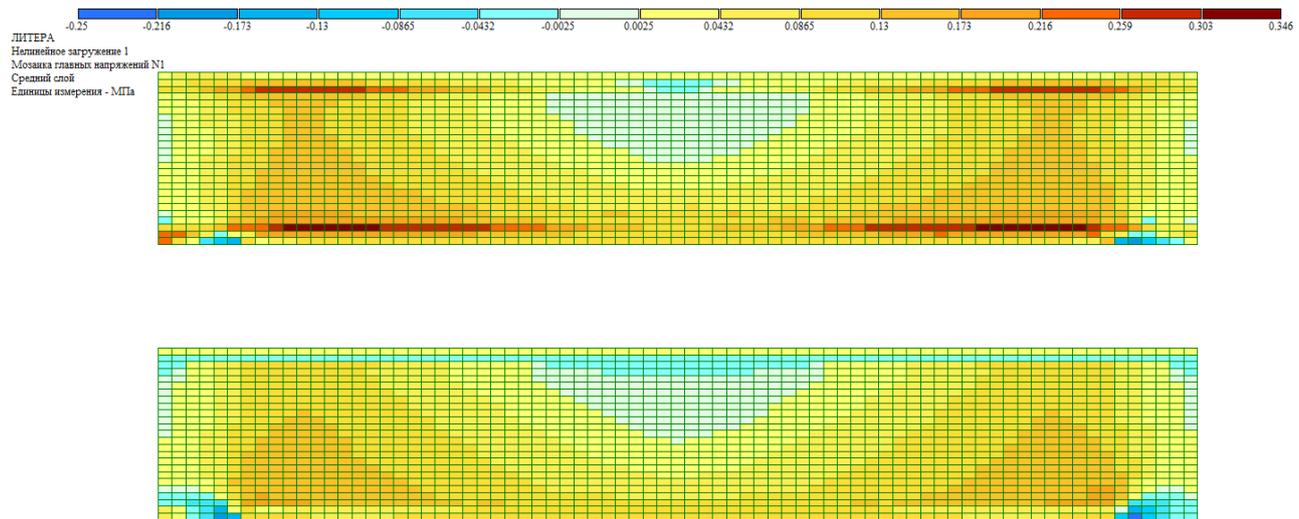


Рис. 3. Расчетные главные напряжения в бетоне численных моделей равномерно нагруженных балок, армированных стержневой арматурой круглого сечения (вверху) и стальными лентами (внизу) равного поперечного сечения, МПа

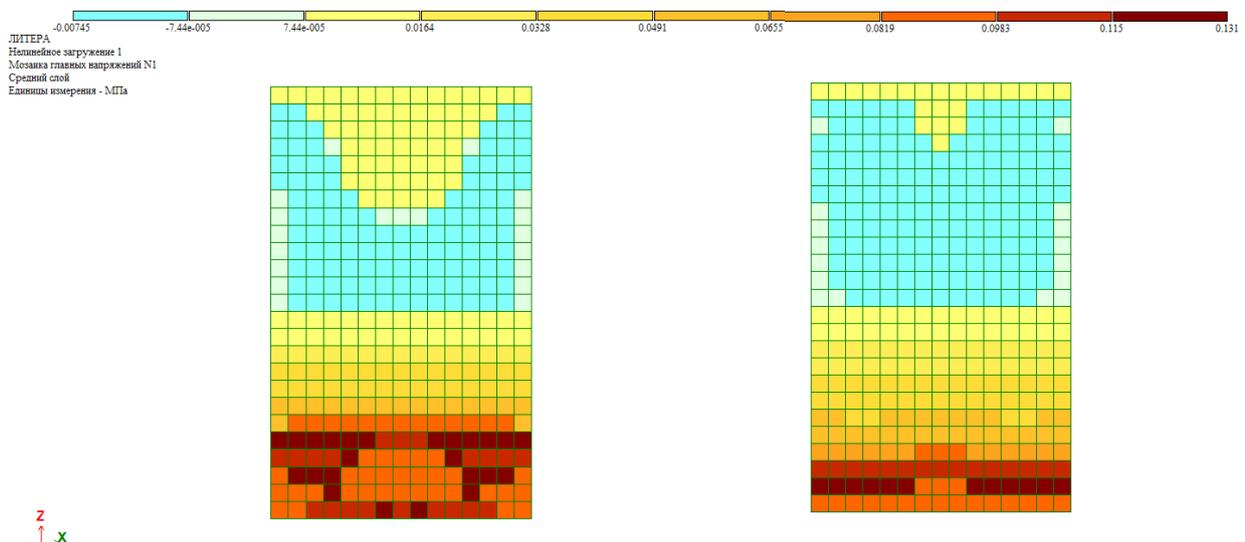


Рис. 4. Расчетные главные напряжения в нормальных пролетных сечениях численных моделей равномерно нагруженных балок, армированных стержневой арматурой круглого сечения (слева) и стальными лентами (справа) равного поперечного сечения, МПа

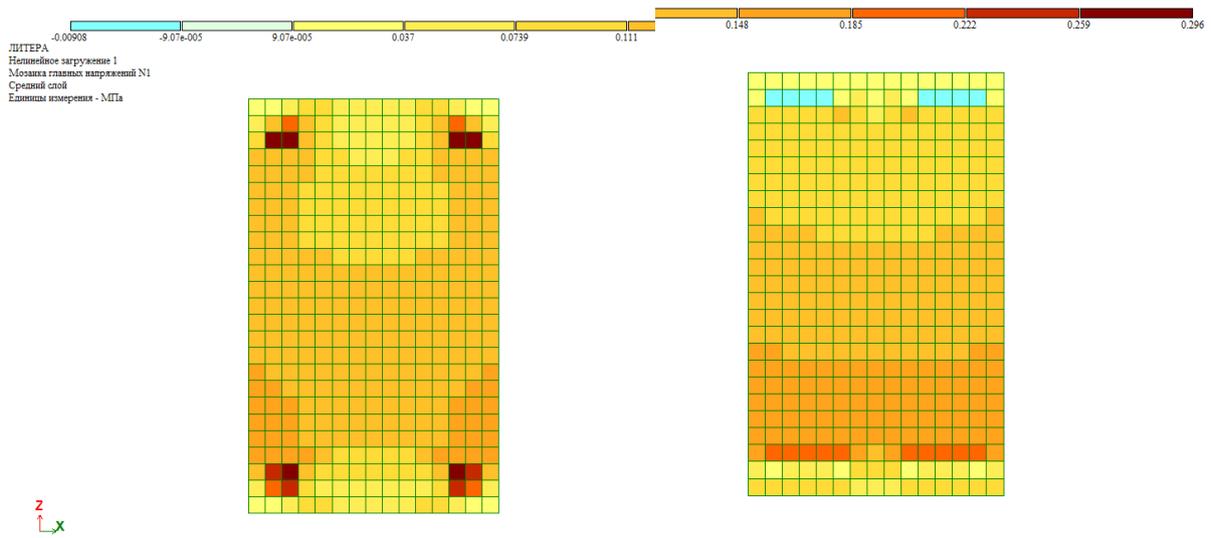


Рис. 5. Расчетные главные напряжения в наклонных опорных сечениях численных моделей равнонагруженных балок, армированных стержневой арматурой круглого сечения (слева) и стальными лентами (справа) равного поперечного сечения, МПа

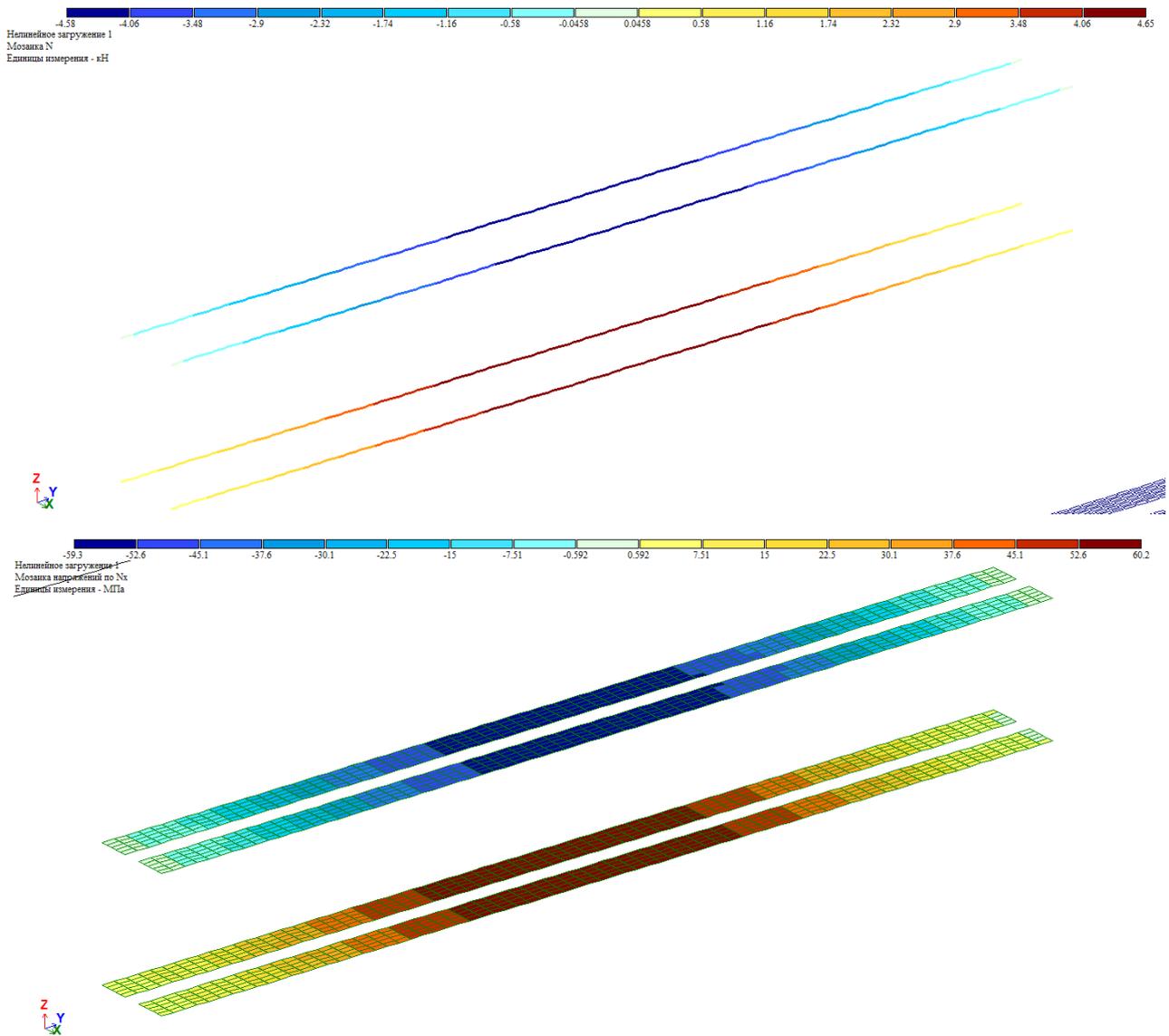


Рис. 6. Расчетные продольные усилия и напряжения в арматурных элементах численных моделей равнонагруженных балок, армированных стержневой арматурой круглого сечения (вверху) и стальными лентами (внизу) равного поперечного сечения, кН, МПа



**Выводы.** Результаты численного эксперимента исследования параметров напряженно-деформированного состояния моделей армированных ячеистобетонных балок прямоугольного сечения армированных инновационной ленточной арматурой, позволяют установить не менее, чем двукратно более равномерное и эффективное распределение напряжений в бетоне у ленточных арматурных элементов, существенно меньшую опасность продергивания арматуры, и, как следствие, большую включенность арматуры в работу балки на предельных нагрузках, обеспечивающей ей большую несущую способность по обоим группам предельных состояний [13]. Данные результаты исследования планируется верифицировать натурным экспериментом, в ходе которого предполагается выполнить экспериментальные нагружения ячеистобетонных балок, схожих исследуемым моделям, двух типов: выполняемых из неавтоклавного бетона D500 B1,5, армированных стандартной стержневой арматурой A500 и ленточных армированием, для устройства которого предполагается использовать доступную монтажную нецинкованную стальную ленту толщиной от 0,5 мм [14]. Реализация экспериментальных исследований в сочетании с численным моделированием позволит утвердить стабильный и ощутимый эффект ленточного армирования в ячеистобетонных конструкциях, параметризовать и формализовать методику проектирования армирования и осуществить рационализацию методических подходов и количественных показателей ленточных арматурных элементов, принимаемых при ресурсоэффективной проектировании изгибаемых конструкций домокомплектов, обеспечивающих полный переход на использование ячеистого бетона в ограждающих и несущих конструкциях и возведение энергоэффективных зданий с замкнутым тепловым контуром экономически конкурентоспособного ценового уровня.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кладиева П.В. Направления совершенствования методических подходов к выбору рациональной теории прочности при проектировании изгибаемых армированных ячеистобетонных конструкций // Аспирант. 2020. № 5 (56). С. 157–160.
2. Kladieva P.V., Koshlich Yu.A. Improvement directions of technical regulations in the field of reinforced cellular concrete structures // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 945. 012059 doi:10.1088/1757-899X/945/1/012059
3. 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
4. Макаричев В.В., Милейковская К.М. Исследование армированных конструкций из ячеистых бетонов. М.: Гостройиздат, 1963. 99 с.
5. Рудкова А.С., Весова Л.М. Использование дисперсного армирования в малоэтажном строительстве из ячеистого бетона // Инженерный вестник Дона. 2019. № 2 (53). С. 43.
6. Сотникова Е.Ю., Абакумов Р.Г., Наумов А.Е. Строительные материалы и технологии, используемые в ИЖС при застройке пригородных территорий г. Белгород // В сборнике: Актуальные проблемы развития социально-экономических систем: теория и практика. сборник научных статей 9-й Международной научно-практической конференции. Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 170–180.
7. Кладиева П.В. Газобетон как перспективный строительный материал // Сборник научных статей 4-ой Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых «Наука молодых – будущее России» [10-11 декабря 2019 г.] / Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 209–212.
8. Кладиева П.В. Направления совершенствования технологии армирования газобетонных несущих конструкций // Проектирование и строительство: Сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистрантов и бакалавров [13 марта 2020 г.] / Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. С. 143–146.
9. Fedjuk R.S., Baranov A.V., Mugahed Amran Y.H. Effect of porous structure on sound absorption of cellular concrete // Construction Materials and Products. 2020. 3 (2). Pp. 5–18. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-2-5-18
10. Аль-хаснави Я.С.Г. Исследование работы балок из ячеистого бетона, армированных легкимистальными тонкостенными конструкциями // В сборнике: Инновационные методы проектирования строительных конструкций зданий и сооружений. сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции. Юго-Западный государственный университет. 2019. С. 11
11. Otsokov K.A. Innovative technologies in construction and their use in organizational and technological events // Construction Materials and Products. 2020. 3 (1). Pp. 7–13. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-1-7-13
12. Martyanov E.I. Optimization of the construction of a two-bladed stirrer to increase the energy efficiency of the apparatus // В сборнике: The

World of Science without Borders. Материалы 7-ой Международной научно-практической конференции молодых учёных. Электронный ресурс. 2020. С. 105–109.

13. Глаголев Е.С., Ермолаева А.Э., Елистраткин М.Ю. Использование ячеистых бетонов в 3d аддитивной индустрии // В сборнике: Теоретические основы создания эффективных композитов. Сборник материалов Российской онлайн-конференции, посвященной Дню науки. 2018. С. 75–82.

*Информация об авторах*

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

**Моисеев Михаил Вадимович**, студент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Мозговой Владислав Михайлович**, студент кафедры экспертизы и управления недвижимостью. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

*Поступила 26.04.2021 г.*

© Кладиева П.В., Моисеев М.В., Мозговой В.М., 2021

*\*Kladieva P.V., Moiseev M.V., Mozgovoy V.M.*

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

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

## THEORETICAL JUSTIFICATION OF INCREASING THE EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF FLEXIBLE CELLULAR CONCRETE STRUCTURES

**Abstract.** *Aerated concrete is actively used in energy efficient construction, mainly as a masonry material for vertical load-bearing structures. At the same time, the creation of a closed thermal contour of the building, which is the basis of modern energy saving requirements, is rational by the use of aerated concrete in load-bearing horizontal structures that require reinforcement. Traditionally bar reinforcement is ineffective in aerated concrete due to low specific adhesion at the contact of the reinforcement with concrete and significantly less than that of heavy concrete, the distribution capacity of concrete around a rod, which evenly transforms concrete stress to bar extension, the consequence of which is the significant bar understress while pulling it in concrete. The authors' research in the field of rationalization of reinforcing elements that are effective in cellular concrete, aimed at increasing the contact surface of the reinforcing element with concrete while maintaining the original steel consumption, makes it possible to recommend tape reinforcement for use in reinforced aerated concrete structures. Punched steel tapes equal to the bar reinforcement of the cross-sectional area, but having developed lateral surface, provide an increase in the adhesion strength of the reinforcement and preventing its pulling. The article presents the results of a numerical study of stress-strain state in reinforced aerated concrete beam with rectangular section, reinforced with the proposed tape reinforcement in comparison with traditional bar reinforcement.*

**Keywords:** *reinforced aerated concrete, aerated bent reinforced structures, aerated concrete beam, aerated concrete slab, tape reinforcement, punched steel tapes.*

### REFERENCES

1. Kladieva P.V. Directions for improving methodological approaches to the choice of a rational theory of strength in the design of bent reinforced cellular concrete structures [Napravleniya sovershenstvovaniya metodicheskikh podhodov k vyboru racional'noj teorii prochnosti pri proektirovanii

izgibaemyh armirovannyh yacheistobetonnyh konstrukcij]. Post-graduate student. 2020. No. 5 (56). Pp. 157–160. (rus)

2. Kladieva P.V., Koshlich Yu.A. Improvement directions of technical regulations in the field of reinforced cellular concrete structures. IOP Conf.

Series: Materials Science and Engineering. 2020. 945. 012059 doi:10.1088/1757-899X/945/1/012059

3. Naumov A.E., Shevchenko A.V., Dolzhenko A.V., Bodyakov S.N., Gvasalia Kh.D. Investigation of the contact strength of plastic pipe and concrete in the calculation of plastic-tube concrete structures [Issledovanie prochnosti kontakta plastikovoj truby i betona pri raschete plastikotrubobetonnykh konstrukcij]. Bulletin of the BSTU named after V. G. Shukhov. 2019. No. 9. Pp. 38–45. (rus)

4. Makarichev V.V., Mileikovskaya K.M. Research of reinforced structures made of cellular concrete. [Issledovanie armirovannykh konstrukcij iz yacheistykh betonov]. M.: Gostroizdat, 1963. 99 p. (rus)

5. Rudkova A.S., Vesova L.M. The use of dispersed reinforcement in low-rise construction of cellular concrete [Ispol'zovanie dispersnogo armirovaniya v maloetazhnom stroitel'stve iz yacheistogo betona]. Engineering Bulletin of the Don. 2019. No. 2 (53). 43 p. (rus)

6. Sotnikova E.Yu., Abakumov R.G., Naumov A. E. Construction materials and technologies used in residential housing in the development of suburban territories of Belgorod [Stroitel'nye materialy i tekhnologii, ispol'zuemye v izhs pri zastroyke prigorodnykh territorij g. Belgorod]. In the collection: Actual problems of the development of socio-economic systems: theory and practice. collection of scientific articles of the 9th International Scientific and Practical Conference. Southwestern State University. 2019. Pp. 170–180. (rus)

7. Kladieva P.V. Aerated concrete as a promising building material [Gazobeton kak perspektivnyj stroitel'nyj material] Collection of scientific articles of the 4th International Scientific Conference of promising developments of young scientists "Science of the young – the future of Russia" [December 10-11, 2019]. Kursk: South-Western State University, 2019. Pp. 209–212. (rus)

8. Kladieva P.V. Directions for improving the technology of reinforcement of aerated concrete load-bearing structures [Napravleniya sovershenstvovaniya tekhnologii armirovaniya gazobetonnykh nesushchih konstrukcij]. Collection of scientific papers of the 4th International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Post-graduates, Undergraduates and Bachelors [March

13, 2020]. Kursk: South-Western State University, 2020. Pp. 143–146. (rus)

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

10. Al-hasnavi Ya.S.G. Investigation of the work of beams made of cellular concrete reinforced with light-steel thin-walled structures [Issledovanie raboty balok iz yacheistogo betona, armirovannykh legkimistal'nymi tonkostennymi konstrukciyami]. In the collection: Innovative methods of designing building structures of buildings and structures. collection of scientific papers of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Southwestern State University. 2019. 11 p. (rus)

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

12. Martynov E.I. Optimization of the construction of a two-bladed stirrer to increase the energy efficiency of the apparatus. In the collection: The World of Science without Borders. Materials of the 7th International Scientific and Practical Conference of Young Scientists. Electronic resource. 2020. Pp. 105–109.

13. Glagolev E.S., Ermolaeva A.E., Elistratkin M.Yu. The use of cellular concrete in the 3d additive industry [Ispol'zovanie yacheistykh betonov v 3d additivnoj industrii]. In the collection: Theoretical foundations of creating effective composites. Collection of materials of the Russian online Conference dedicated to the Day of Science. 2018. Pp. 75–82 (rus)

14. Vesova L.M. Influence of reinforcing fibers on the structure of cellular concrete [Vliyanie armiruyushchih volokon na strukturu yacheistogo betona]. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2020. No. 2 (79). Pp. 107–112. (rus)

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

#### Information about the authors

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

**Moiseev, Mikhail V.** Bachelor student. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Mozgovoy, Vladislav M.** Bachelor student. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 26.04.2021*

**Для цитирования:**

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

**For citation:**

Kladieva P.V., Moiseev M.V., Mozgovoy V.M. Theoretical justification of increasing the efficiency of reinforcement of flexible cellular concrete structures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 6. Pp. 27–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-27-35

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-36-44

<sup>1</sup>Орлов П.А., <sup>1,\*</sup>Ильина Т.Н., <sup>2</sup>Орлов К.П.<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова<sup>2</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

\*E-mail: ilina50@rambler.ru

## ВОЗДЕЙСТВИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ОБЛЕДЕНЕНИЕ ИСПАРИТЕЛЕЙ ВОЗДУШНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА

**Аннотация.** Применение тепловых насосов в системах создания микроклимата является актуальной задачей теплоснабжения. Однако распространение воздушных тепловых насосов в странах с холодным зимним периодом ограничивается в связи с проблемой обледенения наружных блоков и снижением эффективности их работы. Рассмотрены существующие методы борьбы с наледью, а также их эффективность с учетом затрат электроэнергии и проблемой утилизации конденсата. Показана возможность удаления наледи с испарителей воздушных тепловых насосов применением метода высокочастотных механических колебаний. Спроектировано лабораторное оборудование для экспериментальных исследований высокочастотных колебаний в конструкциях испарителей, изготовленных промышленным методом, позволяющее оценить различные способы крепления пьезокерамических излучателей к поверхности теплообменника. Установлена низкая эффективность болтовых соединений излучателей с поверхностью теплообменника. Наиболее рационально монолитное исполнение. Проведенные исследования испарителей воздушных тепловых насосов с различными типами теплоносителя показали неэффективность акустических методов удаления наледи для жидких теплоносителей. Даны рекомендации по подбору материала теплообменника для повышения эффективности разрушения льда с поверхности испарителей. По совокупности акустических свойств и теплопроводности материалов, применяемых в конструкции испарителей, наиболее эффективным является дюралюминий. Выявлены пути повышения степени очистки испарителей от наледи, даны рекомендации для последующих исследований применения механических колебаний для борьбы с обморожением теплообменников в воздушных тепловых насосах в условиях работы при низких температурах окружающего воздуха.

**Ключевые слова:** испаритель, воздушный тепловой насос, обморожение, ультразвук, пьезокерамические излучатели.

**Введение.** Поддержание комфортной температуры внутри зданий является одной из самых затратных статей коммунальных расходов в России и за рубежом. Помимо этого, Россия и другие развитые страны ужесточают требования к предельно допустимым выбросам CO<sub>2</sub> в атмосферный воздух (Постановление Правительства РФ от 9 декабря 2020 г. № 2055 О предельно допустимых выбросах, временно разрешенных, предельно допустимых нормативах вредных физических воздействий на атмосферный воздух и разрешениях на выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух). Поэтому в настоящее время большое внимание уделяется энергосберегающим мероприятиям в строительстве. Как показали исследования [1–5], наиболее эффективно снижает расходы на отопление жилых, общественных и производственных зданий следующие мероприятия: устройство рекуперации воздуха, снижение теплотерь через наружные ограждающие конструкции, повышение энергоэффективности отопительных приборов, переход на низкотемпературные системы обогрева. Тепловые насосы являются наиболее экономичными источниками для отопления, т. к. для производства тепла в количестве 1 кВт·ч тепловые

насосы потребляют 0,2–0,4 кВт·ч электроэнергии, используя низкопотенциальные источники энергии, такие как грунт, вода, воздух по сравнению с энергозатратами для других теплоносителей [6, 7]. Наибольшее распространение в странах с холодным климатом получили земляные тепловые насосы, несмотря на их высокую стоимость и потребности в производстве земляных работ для прокладки коллектора [8]. В России в районах с вечной мерзлотой устройство земляных насосов осуществить крайне сложно. Воздушные тепловые насосы так же используются для поддержания температурно-влажностного режима внутри помещений и работают по тем же термодинамическим циклам. При работе в режиме обогрева наружный блок, включающий в себя теплообменник, подвергается обморожению [9]. Слой льда и инея, возникающий на рабочих поверхностях, снижает теплопередающую способность испарителя.

**Материалы и методы.** Существующие методы борьбы с этим нежелательным явлением в конечном счете сводятся к прогреву испарителя до положительных температур (примерно +4 °С), кроме того, чтобы осуществить прогрев испарителя требуется остановка работы теплового

насоса. В этот период времени отопление помещений прекращается. Прогрев испарителя требует затрат электроэнергии не только на оттаивание испарителя, но и на дальнейшую утилизацию конденсата, включая поддон наружного блока, и конденсатоотводящих патрубков. Расходы в совокупности доходят до 1500 Вт за один час работы теплового насоса, что заметно снижает экономическую эффективность применения воздушных тепловых насосов и их конкурентоспособность перед более дорогими и не экологичными геотермальными теплонасосами [5]. Проблема удаления наледи, возникающая в наружных блоках воздушных тепловых насосов, является наиболее актуальной в странах с холодным зимним периодом, к которым так же относится большая часть России. Анализ существующих в России и за рубежом систем борьбы с обморожением испарителей не выявил энергоэффективных методов. В качестве эксперимента был опробован метод ультразвукового воздействия на теплообменник с целью удаления льда с его рабочих поверхностей [10].

**Основная часть.** Испаритель в воздушных тепловых насосах – это устройство, в котором происходит изменение агрегатного состояния хладагента, жидкий хладагент превращается в газ при кипении, хладагент поглощает тепло из окружающей среды для дальнейшего использования в системе отопления здания. Испаритель представляет собой герметичный контур из материала, обеспечивающего высокий коэффициент теплопередачи. Испаритель рассчитывается по формуле:

$$Q=K \cdot A \cdot \Delta t,$$

где  $Q$  – тепловой поток (Вт);  $K$  – коэффициент теплопередачи ( $\text{Вт}/\text{м}^2\text{°C}$ );  $A$  – общая площадь теплообменника (испарителя) ( $\text{м}^2$ );  $\Delta t$  – разница температур теплоносителей.

Из формулы следует, что при определенном значении потока тепла, при увеличении площади  $A$ , происходит уменьшению разницы температур теплоносителей  $\Delta t$ , а при снижении теплового потока  $Q$  происходит снижение  $\Delta t$ . Принимая во внимание, что испарение хладагента происходит при давлении ниже температуры фазового перехода, происходит снижение температуры насыщения. Разница теплосодержания между точкой входа в испаритель и точкой выхода из испарителя создает холодильный эффект. В случае с испарителями передается холодильному агенту больше тепла, чем требуется для кипения (условие вызвать перегрев хладагента), как правило, он должен превышать нескольких градусов, обычно это 5–8 °С. Воздушные испарители в большинстве случаев выполняются из медных трубок с алюминиевыми пластинами. Диаметры труб зависят от рабочего давления, в последнее время преимущественно применяют малые диаметры труб. Пластины в большинстве случаев выполнены из алюминия, профиль гладкий или с изгибами перпендикулярными потоку воздуха, также выпускают пластины с повышенным показателем турбулентности [11]. В работе теплообменника в режиме оттаивания важную роль играют его акустические свойства (скорость распространения продольных, поперечных и поверхностных волн, м/с). Параметры материалов, наиболее распространённых в конструкциях испарителей, представлены в таблице 1.

Таблица 1

#### Характеристики материалов испарителей

| Металл   | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Продольные волны, м/с | Поперечные волны, м/с | Поверхностные волны, м/с | Теплопроводность, Вт/(м <sup>2</sup> °C) |
|----------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--|
| Алюминий | 2,7                          | 6320                  | 3130                  | 2980                     | 175                                      |
| Медь     | 8,9                          | 4660                  | 2260                  | 2160                     | 384                                      |
| Олово    | 7,29                         | 3320                  | 1670                  | 1560                     | 65                                       |

В эксперименте были использованы испарители промышленного исполнения из профилированных алюминиевых труб с закрепленными на них охлаждающими алюминиевыми пластинами, но ввиду особенности распространения ультразвуковых колебаний в местах соединения пластин и труб возникнут препятствия для их прохождения [11]. Поэтому был спроектирован испаритель из медных труб с паянными соединениями всех теплопроводящих элементов конструкции. В качестве источника механических колебаний были применены пьезоэлектрические излу-

чатели [12], работа которых основана на обратном пьезоэлектрическом эффекте [13]. При воздействии электрического напряжения, подведенного к пьезоэлектрическому кристаллу, происходит линейное изменение его размеров, то есть механическая деформация. В эксперименте были применены пьезокерамические ультразвуковые преобразователи суммарной мощностью 900 Вт. Для передачи механических колебаний в эксперименте с промышленным алюминиевым испарителем был использован алюминиевый профиль, соединенный при помощи припоя к коллатору (рис. 1).



Рис. 1. Метод крепления излучателя

Во втором варианте в медном паянном теплообменнике акустическая связь с испарителем обеспечивается за счет болтовых соединений, плотно притянутых к пьезоэлектрическим излучателям через распределитель колебаний, кото-

рый представляет собой металлическую пластину с отверстиями для крепления пьезоэлектрических излучателей и резьбовыми соединениями для крепления с испарителем через припаянные к нему отверстия с резьбой (рис. 2).

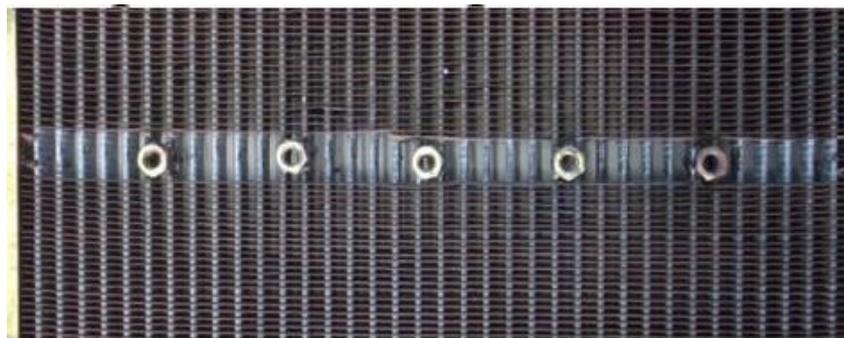


Рис. 2. Места крепления для пьезоэлектрических излучателей

В качестве источника механических колебаний был использован генератор электрических колебаний. Он выполняет следующие задачи: преобразование напряжения бытовой сети (220 V, 50 Гц) в напряжение, требуемое для пьезоэлектрических излучателей, поддержание частоты выходного напряжения, управление амплитудой

механических колебаний. Амплитуда колебаний пропорциональна приложенному напряжению и силе тока воздействия, а частота колебаний обеспечивается частотой переменного напряжения, приходящего на контакты пьезоэлектрического генератора механических колебаний. Общая схема подключения изображена на рис. 3.

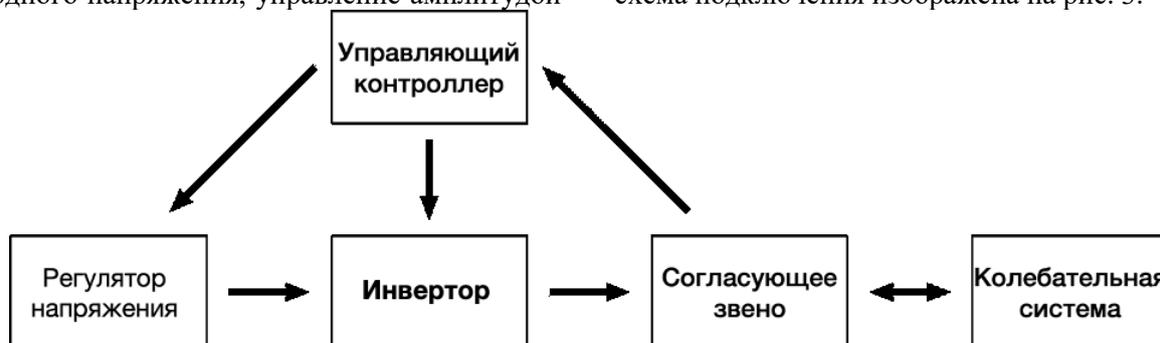


Рис. 3. Общая структурная схема ультразвукового генератора

Также для проведения экспериментов была изготовлена холодильная камера. Ее внутренние поверхности стен покрыты влагозащищенным

составом, в качестве теплоизоляционного материала был использован пеноплекс, подсветка

внутреннего пространства осуществлена при помощи четырех светодиодных светильников, расположенных по периметру квадратного корпуса

камеры. Для наблюдения за прохождением экспериментов в верхней части холодильной камеры смонтировано смотровое окно (рис.4).

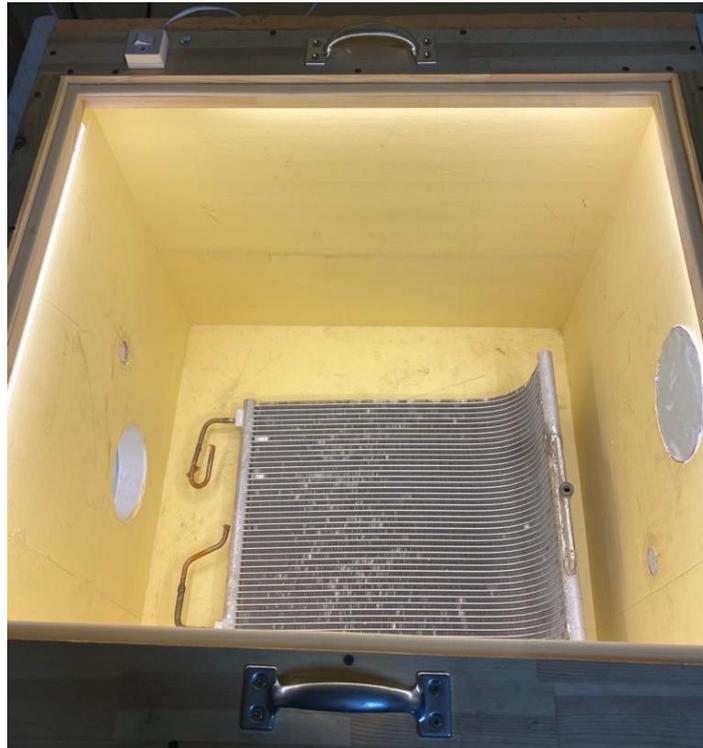


Рис. 4. Холодильная камера

Для инициирования процесса обморожения была спроектирована и изготовлена система

охлаждения азотом методом вторичного потока в теплообменнике, представленная на рис. 5.

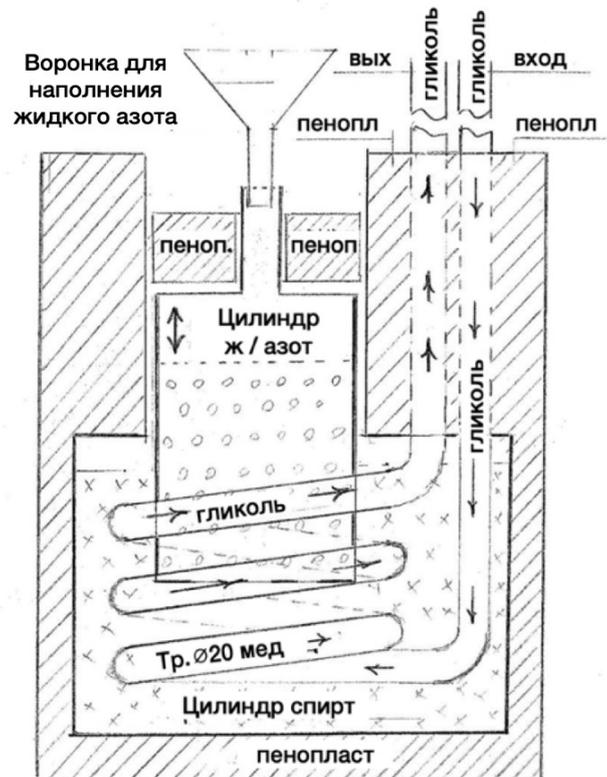


Рис. 5. Схема работы лабораторного генератора холода



Жидкий азот, находящийся в резервуаре, охлаждает воздух в медных трубках, помещенных в раствор пропиленгликоля, также система охлаждения обладает способностью охлаждать гликоль [14]. Для этого требуется заменить насос газа жидкостным насосом и произвести заполне-

ние теплообменника и системы охлаждения пропиленгликолем. Регулировка температуры испарителя происходит путем изменения положения цилиндра с жидким азотом относительно цилиндра со спиртом. Схема подключения системы искусственного обморожения показана на рис. 6.

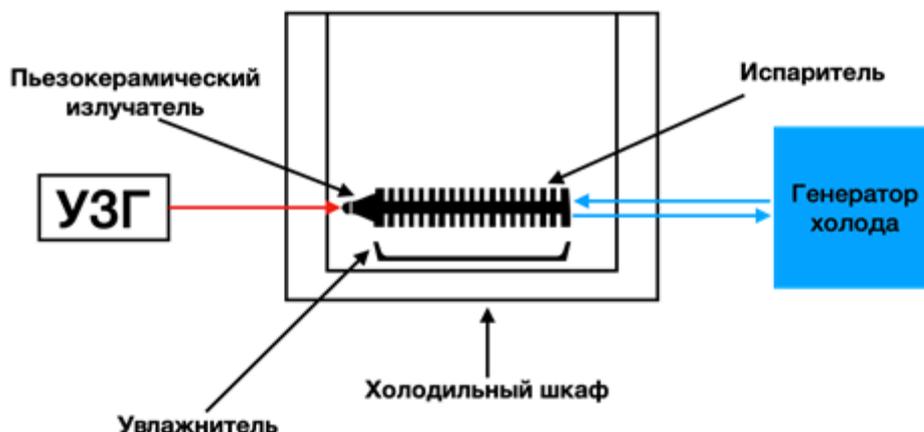


Рис. 6. Схема подключения лабораторного оборудования

Эксперименты проводились в два этапа: первый этап - апробация системы удаления льда, где теплоносителем является газообразный азот; второй этап - апробация системы с жидкостным теплоносителем (пропиленгликоль). Для создания влажности в холодильной камере поместили емкость, имеющую большую площадь поверхности, и залили в нее доведенную до кипения воду.

Этап первый: алюминиевый теплообменник был заполнен пропиленгликолем при температуре  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  и подвергнут ультразвуковому воздействию на различных частотах  $20\text{ кГц}$ – $38\text{ кГц}$ . Результаты эксперимента показали, что лед с поверхности удалить не получилось. При испытании теплообменника, изготовленного из меди, лед также остался на поверхности теплопередающих элементов. Это подтверждает неэффективность использования пьезометрических излучателей для удаления льда, а также других отложений с поверхности теплообменника при использовании жидких теплоносителей.

Этап второй: алюминиевый теплообменник промышленного изготовления был подвергнут обморожению до  $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в результате на его поверхности возник конденсат в виде слоя инея, было применено ультразвуковое воздействие от  $21\text{ кГц}$  до  $40\text{ кГц}$  [14–16]. Время воздействия 1–3 с. Лед удалился уже через 1 секунду. Дальнейшее воздействие не дало каких-либо заметных изменений в степени обморожения. Иней удалился с изогнутой поверхности испарителя по направлению крепления алюминиевой пластины. Вероятно, в процессе изготовления теплообменника с технологией придания Г - образной формы, в местах примыкания теплосъемных пластин с профилированными патрубками испарителя возникло более плотное соединение, что способствовало наилучшей передаче механических колебаний (рис. 7, а).

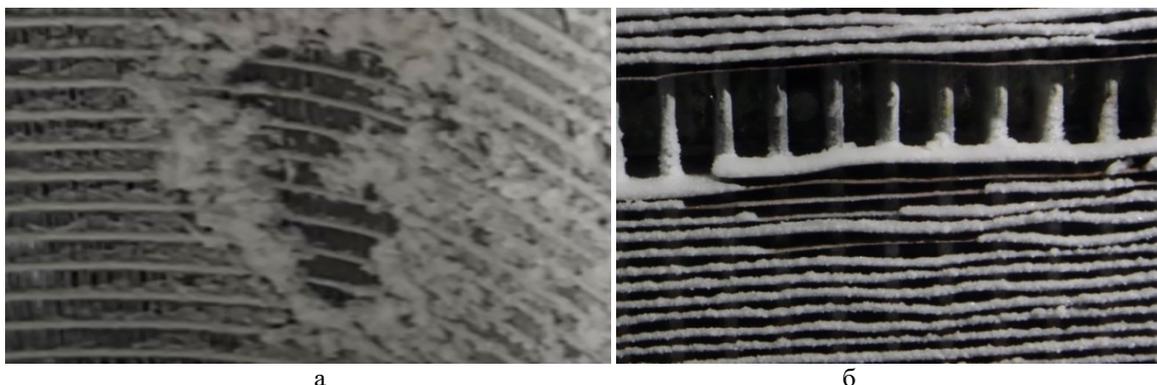


Рис. 7. Влияние формы пластин на удаление льда:  
а – изогнутые пластины, б – горизонтальные

Испытания теплообменника собственной конструкции производились по той же схеме, что и промышленного радиатора. Исследования показали, что в процессе воздействия механических колебаний была нарушена целостность части паянных соединений, что свидетельствует о недостаточной надежности рассмотренного способа крепления излучателей. Это объясняется возникновением термических деформаций в месте припоя излучателя на границе материалов с различными теплофизическими и механическими свойствами. Установлена также низкая эффективность болтовых соединений за счет недостаточного контакта волновода с поверхностью теплообменника, что при эксплуатации также усугубляется воздействием механических колебаний.

Как видно из рис. 7, механические колебания привели к частичному удалению льда с металлических поверхностей, подвергнутых обморожению. Исследования показали также, что следует обратить внимание на форму пластин теплообменника, что влияет на способ передачи колебаний и эффективность снятия наледи, возможно и других отложений, с поверхности пластин.

Следует отметить также необходимость продолжения исследований по выбору более эффективных видов излучателей, способов их соединения с поверхностью испарителей, а также материала теплообменника с целью удаления не только наледи, но и других отложений в виде накипи, что является актуальной задачей в системах теплоснабжения инженерных сетей.

**Выводы.** Исследования показали, что под действием механических колебаний на теплообменник возможно удаление льда с его поверхности. Одной из проблем, выявленной в ходе экспериментов, явилась слабая акустическая связь между теплопередающими элементами конструкции. Решение этой проблемы обеспечит конструкция радиатора, выполненная в монолитном исполнении с излучателем без паянных, сварных и болтовых соединений.

Время воздействия колебаний не имеет принципиального значения, для удаления льда достаточно нескольких секунд. Пьезокерамические излучатели не могут обеспечить большой амплитуды колебаний, необходим подбор другого вида излучателей, а именно излучателей, основанных на эффекте магнитоstriction, где материалом для источника ультразвуковых колебаний являются магнитомягкие прецизионные сплавы, имеющие в своем составе железо, никель, кобальт.

Для изготовления теплообменника по совокупности акустических и теплопроводящих свойств наиболее подходящими материалами являются дюралюминий или алюминий. Метод

удаления льда воздействием на теплообменник высокочастотными колебаниями, где теплоносителем является жидкость, бесперспективен по причине затухания ультразвуковых волн в вязкой среде.

Исследования в области борьбы с обледенением имеют большие перспективы для развития воздушных тепловых насосов, повышения их производительности и расширения диапазона рабочей температуры.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сериков С.В., Ильина Т.Н. Утилизация тепла уходящих газов котельной установки в системе воздушного отопления // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №4. С. 53–55.
2. Ильина Т.Н., Бельмаз Д.Н. Анализ и способы утилизации вторичных энергоресурсов нефтеперерабатывающего предприятия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №3. С. 170–173.
3. Ильина Т.Н., Мухамедов Р.Ю., Веревкин О.В. Перспективы использования тепловых насосов в системах отопления малоэтажных жилых домов Белгородской области // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. №3. С. 142–146.
4. Минко В.А., Ильина Т.Н., Потапова О.Н. Анализ способов утилизации тепла от технологического оборудования в системах создания микроклимата производственных цехах молочных комбинатов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. №4. С. 109–112.
5. Орлов П.А., Уваров В.А., Ильина Т.Н., Орлова В.А., Орлов К.П., Орлов С.П. Влияние установки и использования геотермальных тепловых насосов на экологию: Межвузовский международный конгресс. Высшая школа: научные исследования, Москва, 10 декабря 2020. Москва: Издательство Инфинити. 2020. Т.1. С. 136–147.
6. Копп О.А., Семенов Н.М. Геотермальное отопление. Тепловые насосы // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2017. Т. 1. С. 84–88. URL: <http://e-koncept.ru/2017/571018.htm>.
7. Васильев Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоёв Земли: Монография. Издательский дом «Граница». М.: Красная звезда. 2006. 220 с.
8. Sayegh M.A. [et al.] Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating // Energy and Buildings. (2018). Vol. 166. Pp 122–144.
9. Yigiang J., Huiying F.U., Yang Yao, Ling Y., Qiang G. Experimental study on concentration change of spray solution used for a novel non-frosting air source heat pump system // Energy and Buildings. 2014. Vol. 68. Pp. 707–712.

10. Патент на изобретение 2724661, Российская Федерация. Способ защиты от обледенения холодильных и вентиляционных установок. Орлов К. П.; заявка от 19.06.2019, № 2019119135.

11. Бригантини Антонио. Руководство по техническому обслуживанию холодильных установок и установок для кондиционирования воздуха. М: Евроклимат. 2004. 312 с. (Библиотека климатотехники).

12. Tressler J.F. Piezoelectric Transducer Designs for Sonar Applications. In: Safari A., Akdoğan E.K. (eds) Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications. Springer, Boston, MA. 2008. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-76540-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-0-387-76540-2_11)

13. Бойцов А.А. Бойков В.И. Быстров С.В. Григорьев В.В. Караев П.В. Исполнительные

устройства и системы для микроперемещений. Университет ИТМО. Санкт-Петербург, 2017, 8 с.

14. Галкин М.Л. Пропиленгликоль как основной компонент хладоносителя // Холодильная техника. 2009. №9.

15. Хмелев В.Н. Проектирование и моделирование ультразвуковых колебательных систем // Измерение, автоматизация и моделирование в промышленных и научных исследованиях: межвузовский сборник / под ред. Г.В. Леонова. Бийск, 2003. С. 211–216.

16. Физические свойства и особенности распространения ультразвука. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20060518012131/http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/114/006.htm>

#### Информация об авторах

**Орлов Павел Анатольевич**, соискатель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. Email: orlov Pavel67@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Ильина Татьяна Николаевна**, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. Email: ilina50@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Орлов Кирилл Павлович**, студент. Email: 2orlovkirill3@gmail.com. Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». Россия, 119049 г. Москва, Ленинский пр. 4

Поступила 11.03.2020 г.

© Орлов П.А., Ильина Т.Н., Орлов К.П., 2021

**<sup>1</sup>Orlov P.A., <sup>1,\*</sup>Il'ina T.N., <sup>2</sup>Orlov K.P.**

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

<sup>2</sup>National Research Technological University "MISiS"

\* E-mail: ilina50@rambler.ru

## EFFECTS OF MECHANICAL VIBRATIONS ON ICE FORMATION ON EVAPORATOR OF AIR HEAT PUMP

**Abstract.** The analysis of the reasons for the insignificant spread of air heat pumps in countries with a cold winter period is carried out. Problems arising in the heat exchanger of the outdoor unit of the heat pump during operation in heating mode are indicated. The existing methods of anti-icing of outdoor units are considered, and their effectiveness is demonstrated, taking into account the cost of electricity and the problem of utilizing condensate. The possibility of removing ice from evaporators of air heat pumps using the method of high-frequency mechanical vibrations has been investigated. Laboratory equipment has been designed and tested for experimental research of high-frequency oscillations in the structures of evaporators manufactured by an industrial method. The possibility of their use in heat pumps, where the fight against frostbite is carried out by the method of mechanical vibrations, is considered. Investigations of evaporators of air heat pumps with different types of coolant for removing ice by means of mechanical vibrations on the surface of the heat exchanger have been carried out. Methods of fastening piezoceramic emitters to evaporators of various designs are considered. A comparative analysis of the materials used in the design of evaporators, a comparison of their acoustic properties and thermal conductivity, and recommendations on the selection of material for further research to improve the efficiency of ice destruction from the surface of evaporators are given. Ways of increasing the degree of cleaning of evaporators from ice are identified, recommendations are given for further research on the use of mechanical vibrations to combat frostbite of heat exchangers in air heat pumps under conditions of operation at low ambient temperatures.

**Keywords:** evaporator, air heat pump, frostbite, ultrasound, piezoceramic emitters.

## REFERENCES

1. Serikov S.V., Il'ina T.N. Disposal heat of the outgoing gases of the boiler installation in the air heating system [Utilizatsiya tepla ukhodyashchikh gazov kotelnoy ustanovki v sistemt vozdushnogo otopeniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No. 4. Pp. 53–55. (rus)
2. Il'ina T.N., Belmaz D.N. Analysis and methods of utilization of secondary energy resources of an oilrefinery [Analiz i sposoby utilizatsii vtorichnykh energoresursov nftfepererabatyvayvayshchhego predpriyatiya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2014. No. 4. Pp. 170–173. (rus)
3. Il'ina T.N., Mukhamedov R.Yu., Verevkin O.V. Prospects for the use of heat pumps in heating systems of low-rise residential buildings in the Belgorod region [Perspektivy ispolzovaniya teplovykh nasosov v sistmakh otopeniya maloetazhnykh zhi-lykh domov Btgorodskoy oblasti]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2009. No. 3. Pp. 142–146. (rus)
4. Minko V.A., Il'ina T.N., Potapova O.N. Analysis of methods of heat recovery from technological equipment in systems for creating a microclimate in production shops of dairy plants. [Analiz sposobov utilizatsii tepla ot tekhnologicheskogo oborudovaniya v sistemakh sozdaniya mikroklimata proizvodstvennykh molochnykh kombinatov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2009. No. 4. Pp. 109–112 (rus)
5. Orlov P.A., Uvarov V.A., Il'ina T.N., Orlova V.A., Orlov K.P., Orlov S.P. The impact of the installation and use of geothermal heat pumps on the environment: Interuniversity [Vlianiye ustanovki i ispolzovaniya geotermalnykh teplonasosov na ekologiyu]. International Congress. Graduate School: Research, (Moscow December 10, 2020) M.: Infinity Publishing House. 2020. Vol. 1. Pp. 136–147. (rus)
6. Kopp O.A., Semenenko N.M. Geothermal heating. Heat pumps [Geotermalnoye otopeniye. Teplovyye nasosy]. Scientific-methodical electronic journal "Concept". 2017. No. 1. Pp. 84–88. URL: <http://e-koncept.ru/2017/571018.htm>. (rus)
7. Vasiliev G.P. Heat supply of buildings and structures with the use of low-potential thermal energy of the surface layers of the Earth [Teplogaz-osnabzheniye zdaniy i sooruzheniya s ispolzovaniyem nizkopotentsialnoy teplovyoy energii poverkhnostnykh sloyv zemli]. Monograph. Publishing House "Border". M.: Krasnaya Zvezda. 2006. 220 p. (rus)
8. Sayegh M.A. [et al.] Heat pump placement, connection and operational modes in Europeandistrict heating". Energy and Buildings. 2018. Vol. 166. Pp. 122–144.
9. Yigiang J., Huiying F.U., Yang Y., Ling Y., Qiang G. Experimental study on concentration change of spray solution used for a novel non-frosting air source heat pump system. Energy and Buildings. 2014. Vol. 68. Pp. 707–712.
10. Patent for invention 2724661, Russian Federation. Anti-icing method for refrigeration andventilation units. Orlov K.P. [Sposob zashity ot obledentyiyt kholodilnykh i ventilyftsiyonnykh ustanovok]. Zayvka 19.06.2019. No. 2019119135. (rus)
11. Brigantini Antonio. Refrigeration and Air Conditioning Maintenance Manua [Rukovodstvo po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu kholodilnykh ustanovor dlya konditsianirovaniyu vozdukha]. - M: Euroclimate. 2004.312 p. (Library of climate technology). (rus)
12. Tressler J.F. Piezoelectric Transducer Designs for Sonar Applications. In: Safari A., Akdoğan E.K. (eds) Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications. Springer, Boston, MA. 2008. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-76540-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-0-387-76540-2_11)
13. Boytsov A.A. Boykov V.I. Bystrov S.V. Grigoriev V.V., Karaev P.V. Actuators and systems for micromovements [Ispolzuemye ustroystva i sistemy dlya mikroperemeshchenie]. ITMO University St. Petersburg, 2017. 8 p. (rus)
14. Galkin M.L. Propylene glycol as the main component of a refrigerant [Propylenglikol kak osnovnoy component khladonositelea]. Refrigeration technology. 2009. No. 9.
15. Khmelev V.N. Design and modeling of ultrasonic vibrational systems [Proektirovanie i modulirovanie ultrozvukovykh kolebatelnykh sistem]. Measurement, automation and modeling in industrial and scientific research: interuniversity collection. Ed. G.V. Leonova. Biysk, 2003. Pp. 211–216. (rus)
16. Physical properties and features of ultrasound propagation [Fizicheskie svoystva i osobennosti raspostraneniya ultrozvuka]. Access mode: <https://web.archive.org/web/20060518012131/http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/114/006.htm>. (rus)

*Information about the authors*

**Orlov, Pavel A.** Postgraduate student. Email: [orlovpavel67@gmail.com](mailto:orlovpavel67@gmail.com). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Il'ina, Tatyana N.** DSc, Professor. Email: [ilina50@rambler.ru](mailto:ilina50@rambler.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Orlov, Kirill P.** Bachelor student. Email: 2orlovkirill3@gmail.com. National research Technological University "MISiS". Russia. 119049, Moscow, Leninsky pr. 4,

---

*Received 11.03.2021*

**Для цитирования:**

Орлов П.А., Ильина Т.Н., Орлов К.П. Воздействие механических колебаний на обледенение испарителей воздушного теплового насоса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 6. С. 36–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-36-44

**For citation:**

Orlov P.A., Il'ina T.N., Orlov K.P. Effects of mechanical vibrations on ice formation on evaporator of air heat pump. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 6. Pp. 36–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-36-44

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-45-51

**Савина И.И.**

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: iikostikova@gmail.com

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЗДАНИЙ И КОМПЛЕКСОВ ИННОВАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**Аннотация.** Объекты инновационного назначения в своем становлении и формировании прошли огромный путь, вследствие чего существующая инновационная инфраструктура разнообразна и обширна. Несмотря на огромное количество различных типов архитектурных сооружений инновационной направленности можно отследить и выявить схожие направления создания и эксплуатации таких объектов. Здания и комплексы инновационной деятельности представляют собой объединение наукоемких фирм с целью их экономического роста в научно-производственные объекты, которые располагаются на одной территории. Главными функциями вновь образованных научно-производственных объектов становятся: развитие технологии трансфера информации между компаниями-резидентами научно-производственных объектов; содействие в создании и развитии новых форм и видов инновационных объектов; предоставление во временное владение и пользование помещений и территорий для субъектов малого и среднего бизнеса; организация взаимодействия между образовательными учреждениями и бизнес сообществом с целью осуществления мероприятий по совместной научно-исследовательской деятельности, необходимой для технологического развития.

Рассматриваются современные тенденции развития и формирования зданий и комплексов инновационного назначения в контексте технологического прогресса и социально-экономических изменений, основанные на анализе опыта проектирования и строительства данного типа объектов, а также изучения научной литературы. Сделаны выводы о том, что, выявленные тенденции могут носить рекомендательный характер при совершенствовании инновационной инфраструктуры в регионе.

**Ключевые слова:** современные тенденции, развитие и формирование, комплекс инновационного назначения, объект инновационной направленности, инновационная инфраструктура, опыт проектирования.

**Введение.** В информационный век тенденция инновационного развития во всем мире, которая началась много лет назад, набирает самые высокие обороты. Инновации стали главной движущей силой социального и экономического развития повсеместно. Согласно Глобальному исследованию и сопровождающего его Рейтингу стран мира по индексу инноваций 2020 года (Global Innovation Index) успешность экономики страны связана, с наличием инновационного потенциала и условий для его воплощения: институты; человеческий капитал и исследования; инфраструктура для ведения инновационной деятельности; развитие внутреннего рынка и бизнеса [1]. Ежегодно в Глобальном инновационном индексе оценивается деятельность более чем 130 стран и территорий мира, которые соревнуются между собой за мировое первенство (рис. 1) [2].

В связи с этим, огромное внимание уделяется созданию новых и модернизации уже существующих архитектурных сооружений, предназначенных для совместной интеграции научно-исследовательской, производственной и деловой функций. Эволюция таких комплексов приводит к сформировавшейся и устойчивой инфраструктуре инновационной деятельности, главными

объектами которой являются различные типы архитектурных сооружений инновационной направленности.

Автором проведен анализ отечественного и зарубежного опыта проектирования и строительства объектов инновационного назначения для выявления специфики формирования и тенденций их развития. Обобщение опыта выявило, что существует множество зданий и комплексов инновационного назначения различных по своей типологии, размерам и характеристикам. Специфичность их направленности - инновационная, показала, что маленькие комплексы могут существовать как отдельные самостоятельные объекты, могут включаться в структуру больших комплексов с расширенным функциональным составом, а также могут относиться и находиться в составе других базовых учреждений. Подобное множество сочетаний благоприятно влияет на процесс появления новых архитектурных решений организации пространств, а также способствует формированию широкого спектра разнообразных архитектурных решений. Однако при всем многообразии таких объектов, имеются общие тенденции, присущие всем их типам.

**Материалы и методы.** Методика исследования основывается на системном анализе, который предполагает: рассмотрение отечественного и зарубежного опыта проектирования и строительства комплексов и зданий инновационного

назначения; изучение научной литературы, в которой наблюдаются ключевые процессы формирования, развития, организации и создания инновационных объектов [3].



Рис. 1. Три страны, лидирующие в области инноваций в каждом регионе [2]

Инновационные центры рассматриваются в трудах А.В. Антонова [4], в которых он освещает принципы организации инновационных центров, в исследованиях С.В. Валдайцева [5], О.В. Лилуевой [6], В.П. Мироненко [7], А.В. Почтовой [8], Д.С. Трифонкиной [9], где поднимаются вопросы градостроительной организации инновационных центров, системы инновационного развития подобных учреждений, а также вопросы типологических особенностей инновационных объектов [3].

Однако современные тенденции развития для существующих и вновь спроектированных зданий и комплексов инновационного назначения однозначно не сформулированы, что позволяет выявить и систематизировать основные из них.

**Основная часть.** В ходе исследования и систематизации объектов были выявлены основные тенденции развития и специфика их формирования, которые можно рассматривать с точки зрения: развития генерального плана, функционально-планировочной структуры и архитектурных решений, инженерных и строительных технологий.

1. Расположение инновационных комплексов в структуре города и организация генерального плана.

- При определении местонахождения будущего инновационного комплекса, основополагающим фактором является доступная и развитая транспортная инфраструктура: транспортные магистрали, метрополитен, городской наземный транспорт, железнодорожный транспорт и т.д.

- Анализ опыта проектирования показал, что размещение инновационных объектов может осуществляться, как в структуре города, так и за его пределами. Маленькие по величине комплексы обычно концентрируются в центральной части города, в то время как большие комплексы тяготеют к периферийным зонам и загородным территориям.

- В настоящее время активно используются и обладают высоким архитектурным потенциалом территории промышленных зон. Такие территории имеют привлекательные характеристики не только для всестороннего развития объектов, располагающихся на них, но и в целом имеют положительное влияние на социально-экономическое развитие региона.

- «Престиж» территории и возможность дальнейшего территориального развития комплекса, для модернизации объекта, поскольку инновационные комплексы по своей природе являются динамическими [10].

- Анализ опыта проектирования выявил особенность к расположению крупнейших комплексов за пределами городской агломерации и тяготению к уникальному природному окружению. Наличие природной и погодной составляющей имеет огромное значение для формирования инновационного роста комплекса и его сотрудников.

Наглядно вышеперечисленные градостроительные тенденции можно отследить на примерах разных городов мира, например, таких как:

Санкт-Петербург – «является центром инноваций и высокотехнологичных производств мирового уровня, а благоприятное географическое положение создает предпосылки для интернационализации инновационной деятельности» [11] (рис. 2), Роттердам – «это крупнейший порт Европы и место размножения инноваций, имеющий яркую международную стартап-экосистему» [12] (рис. 3).

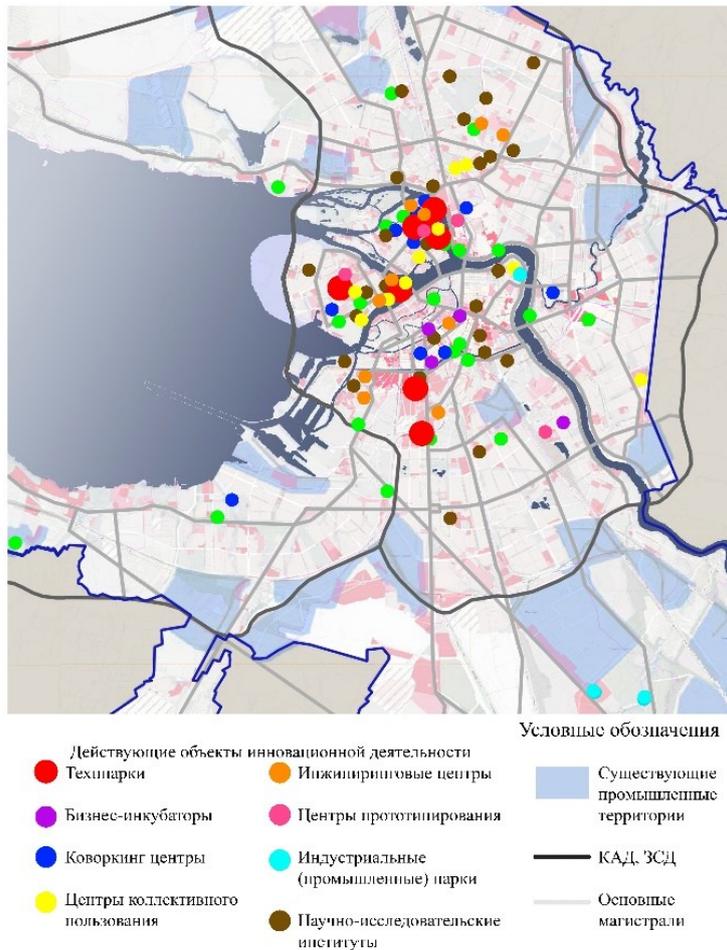


Рис. 2. Карта инновационной инфраструктуры Санкт-Петербурга

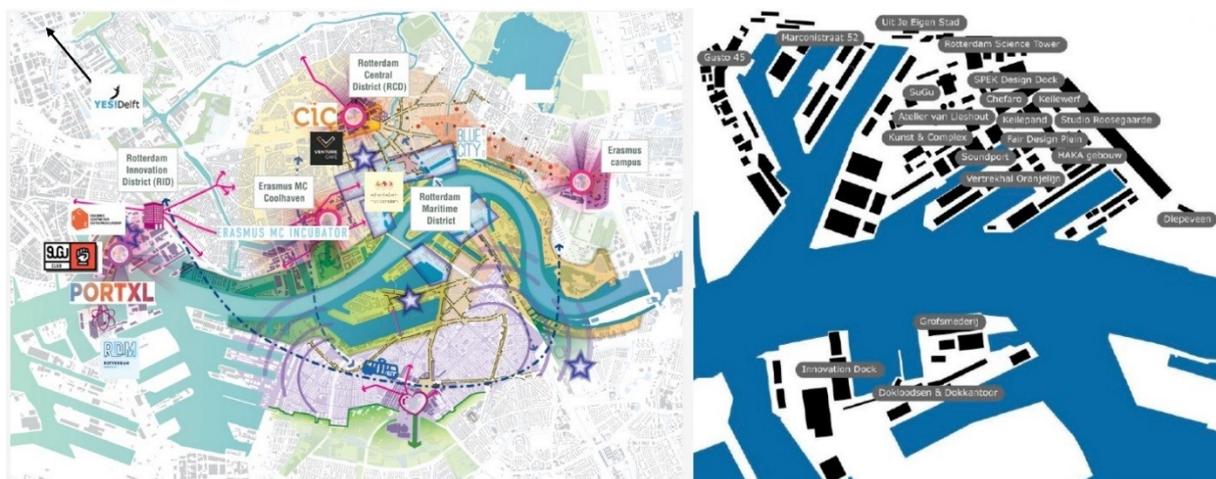




Рис. 3. Карта инновационной среды Роттердама. Инновационный район в Роттердаме [13]

2. Формирование архитектурных решений и функционально-планировочной структуры инновационных комплексов.

- Формирование архитектурных решений и функционально-планировочной структуры инновационных комплексов базируется на удобной и эргономичной связи между основными функциональными блоками комплексов (исследовательский, производственный, деловой, образовательный, технический, вспомогательный [8]), а также на составе помещений, находящихся в этих блоках.

- Для крупных комплексов характерной тенденцией их образования является естественное формирование (постепенно, со временем, как следственно динамическая система), в то время как мелкие инновационные объекты, такие как бизнес-инкубаторы, коворкинг центры и другие, создаются чаще всего искусственно (специально созданные для решения конкретных задач).

- Определенная функциональная зона отвечает за соответствующую ей стадию инновационного процесса и может работать как автономно, так и совместно с остальными зонами.

- Тенденция кооперации научно-производственной составляющей с другими структурными элементами с концентрацией прикладной и исследовательской деятельности. Так появляются инновационные объекты, интегрированные в базовые учреждения: при университете, при промышленном предприятии, при научном учреждении, при деловом центре. Возможность использования совместной инфраструктуры в таких объектах приводит к мобильности, коммуникационной и планировочной гибкости рабочего пространства.

- Формирование крупных объектов происходит по средствам включения в их функционально-планировочную структуру более мелких самостоятельных объектов инновационной деятельности. Так, например, в состав технопарка может входить бизнес-инкубатор и коворкинг центр.

- Многие комплексы для увеличения спектра предоставляемых услуг предусматривают универсальное использование помещений.

3. Современные инновационные комплексы и центры уже являются инновационными проектами и предполагают наличие самых передовых инженерных и строительных технологий.

- Применение энергосберегающих технологий в эксплуатации инновационных комплексов.

- Использование современного технического оборудования и экспериментальных систем, требует гибкого решения, которое отвечает потребностям исследователей. В результате требования

к технологической инфраструктуре имеют тенденцию к увеличению [14].

- Применение универсальных трансформируемых пространств, для достижения наилучшего результата.

Тенденции применения новых технологий в проектировании и строительстве инновационных комплексов, позволяют эффективно использовать и менять планировочные и технологические характеристики помещений объекта, а также отвечают за качество выпускаемого продукта [15].

**Выводы.** Территориальное развитие городов, повышение уровня требований общества к удобству, комфорту и функциональности, ежедневное совершенствование информационного и технического прогресса находят непосредственное отражение в формировании современной архитектуры. Проектные решения инновационных комплексов постоянно совершенствуются и модернизируются в соответствии с актуальными тенденциями своего времени. В связи с чем, каждый раз такой объект имеет свой уникальный образ с индивидуальным градостроительным, функциональным, архитектурным и планировочным решением. Настоящее исследование показало, что выявленные современные тенденции развития и формирования комплексов и зданий инновационного назначения, могут помочь в проектировании, строительстве и эксплуатации объектов данного типа, а также несут рекомендательный характер при дальнейшем совершенствовании инновационной инфраструктуры в регионе.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глобальный индекс инноваций // Гуманитарный портал: Исследования [Электронный ресурс]. URL: <https://gtmarket.ru/ratings/global-innovation-index> (дата обращения 16.04.2021)
2. Глобальный инновационный индекс 2020 г. Кто будет финансировать инновации. Главные выводы // Международная бизнес-школа INSEAD. Корнельский университет (Cornell University). Всемирная организация интеллектуальной собственности (World Intellectual Property Organization) [Электронный ресурс]. URL: [https://www.globalinnovationindex.org/userfiles/file/reportpdf/GII\\_2020\\_KeyFindings\\_RU\\_web.pdf](https://www.globalinnovationindex.org/userfiles/file/reportpdf/GII_2020_KeyFindings_RU_web.pdf) (дата обращения 20.04.2021)
3. Радионов Т.В., Поветкина Н.Н. Концепция архитектурной организации зданий научно-исследовательских инновационных центров при реконструкции объектов городской застройки // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2018. №2 (130). С. 15–20.

4. Антонов А.В. Принципы формирования архитектуры зданий инновационных центров: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. архитектуры: 18.00.02. М., 2007. 24 с.
5. Валдайцев С.В. Социально-экономическое обоснование проектов инновационных центров // Инновационная экономика. 2011. № 9. С. 122–127.
6. Лилуева О.В. Архитектурное формирование технопарков на базе наукоградов / О. В. Лилуева: дис. на соиск. учен. степ. канд. арх.: 05.23.21. Нижний Новгород, 2011. 185 с.
7. Мироненко В.П. Аспекты формирования технопарка как многофункционального комплекса // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2014. №2(106). С. 131–137.
8. Почтовая А.В. Типологические аспекты архитектурного формирования зданий и комплексов инновационного назначения // Фундаментальные исследования. 2016. № 11. С. 74–79. URL: <https://www.fundamental-research.ru/pdf/2016/11-1/40930.pdf> (дата обращения 20.04.2021)
9. Трифонкина Д.С. Научно-исследовательские объекты как инновационные градостроительные комплексы в истории архитектуры // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Том 17, № 1. С. 274–277.
10. Назарова Я.А., Барабаш М.В. Особенности функционирования и архитектурного формирования детских технопарков в России и за рубежом // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №8. С. 40–47. DOI: 10.34031/article\_5d4946a0401ca1.08904398
11. Инновации // Правительство Санкт-Петербурга. Комитет по промышленной политике, инновациям и торговле Санкт-Петербурга [Электронный ресурс] URL: <https://cipit.gov.spb.ru/innovations/> (дата обращения 21.04.2021)
12. Role in the Innovation Ecosystem. Regional // Erasmus Centre for Entrepreneurship [Электронный ресурс] URL: <https://ece.nl/about/role-innovation-ecosystem-2/> (дата обращения 21.04.2021)
13. Gert-Joost Peek, Kees Stam City-Level Strategies for Planning, Placemaking, and Promotion. Case study: Rotterdam // Building the Innovation Economy. London. 2016. 24 p.
14. Кыргызбай А.А. Особенности инфраструктуры инновационных научных центров [Электронный ресурс] // Высшая школа: научные исследования. Материалы Межвузовского научного конгресса. М. 2020. Том 1. С. 153–163. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_42910329\\_78062722.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42910329_78062722.pdf) (дата обращения 21.04.2021)
15. Инновации в строительном кластере: барьеры и перспективы // Аналитика [Электронный ресурс] URL: [https://raex-a.ru/researches/city/inno\\_r\\_db](https://raex-a.ru/researches/city/inno_r_db) (дата обращения 24.04.2021)

*Информация об авторах*

**Савина Ирина Игоревна**, старший преподаватель кафедры архитектурного проектирования. E-mail: [iikostikova@gmail.com](mailto:iikostikova@gmail.com). Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4.

Поступила 25.04.2020 г.

© Савина И.И., 2021

**Savina I.I.**

*Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*

*E-mail: [iikostikova@gmail.com](mailto:iikostikova@gmail.com)*

## MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF INNOVATIVE BUILDINGS AND COMPLEXES

**Abstract.** *The establishment of innovative facilities took a long way, therefore the existing innovative infrastructure is diverse. Despite the huge number of different types of architectural structures of innovative orientation, it is possible to track and identify similar areas of creation and operation of such objects. Buildings and complexes of innovative activity represent the association of high-tech firms for the purpose of their economic growth in research and production facilities, which are located on the same territory. The main functions of the newly formed research and production facilities are: the development of information transfer technology between companies-residents of research and production facilities; assistance in the creation and development of new forms and types of innovative facilities; provision of temporary ownership and use of premises and territories for small and medium-sized businesses; organization of interaction between educational institutions and the business community in order to implement joint research activities necessary for*

*technological development. The article considers the current trends in the development and formation of buildings and complexes of innovative purpose in the context of technological progress and socio-economic changes, based on the analysis of the experience of design and construction of this type of objects, as well as the study of scientific literature. It is concluded that the identified trends can be recommended for improving the innovation infrastructure in the region.*

**Keywords:** *modern trends, development and formation, innovative complex, innovative focus, innovative infrastructure, design experience.*

## REFERENCES

1. Global Innovation Index. Gumanitarnyj portal: Issledovaniya [Global'nyj indeks innovacij. Gumanitarnyj portal: Issledovaniya]. URL: <https://gtmarket.ru/ratings/global-innovation-index> (date of treatment: 16.04.2021) (rus)
2. Global Innovation Index 2020. Who will fund innovation. Key findings. International Business School INSEAD. Cornell University. World Intellectual Property Organization [Global'nyj innovacionnyj indeks 2020 g. Kto budet finansirovat' innovacii. Glavnye vyvody. Mezhdunarodnaya biznes-shkola INSEAD]. URL: [https://www.globalinnovationindex.org/userfiles/file/reportpdf/GII\\_2020\\_KeyFindings\\_RU\\_web.pdf](https://www.globalinnovationindex.org/userfiles/file/reportpdf/GII_2020_KeyFindings_RU_web.pdf) (date of treatment: 20.04.2021) (rus)
3. Radionov T.V., Povetkina N.N. The concept of the architectural organization of buildings of research and innovation centers during the reconstruction of urban development facilities [Konceptiya arhitekturnoj organizacii zdaniy nauchno-issledovatel'skih innovacionnyh centrov pri rekonstrukcii ob"ektov gorodskoj zastrojki]. Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture. 2018. No. 2 (130). Pp. 15–20. (rus)
4. Antonov A.V. Principles of formation of architecture of buildings of innovation centers [Principy formirovaniya arhitektury zdaniy innovacionnyh centrov].: dissertation abstract for the degree of candidate of architecture: 18.00.02. A. V. Antonov. M., 2007. 24 p. (rus)
5. Valdaitsev S.V. Socio-economic rationale for projects of innovation centers [Social'no-ekonomicheskoe obosnovanie proektov innovacionnyh centrov]. Innovative Economy. 2011. No. 9. Pp. 122–127. (rus)
6. Lilueva O.V. Architectural formation of technoparks based on science cities [Arhitekturnoe formirovanie tekhnoparkov na baze naukogradov]. O.V. Lilueva: dissertation for the degree of candidate of architecture.: 05.23.21. Nizhny Novgorod, 2011. 185 p. (rus)
7. Mironenko V.P. Aspects of the formation of a technopark as a multifunctional complex [Aspekty formirovaniya tekhnoparka kak mnogofunkcional'nogo kompleksa]. Bulletin of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture. 2014. No. 2(106). Pp. 131–137. (rus)
8. Pochtovaya A.V. Typological aspects of the architectural formation of buildings and complexes for innovative purposes [Tipologicheskie aspekty arhitekturnogo formirovaniya zdaniy i kompleksov innovacionnogo naznacheniya]. Fundamental research. 2016. No. 11. Pp. 74–79. URL: <https://www.fundamental-research.ru/pdf/2016/11-1/40930.pdf> (date of treatment: 20.04.2021)
9. Trifonkina D.S. Research objects as innovative urban planning complexes in the history of architecture [Nauchno-issledovatel'skie ob"ekty kak innovacionnye gradostroitel'nye komplekсы v istorii arhitektury]. News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2015. Vol. 17, No. 1. Pp. 274–277. (rus)
10. Nazarova Ya.A., Barabash M.V. Features of the functioning and architectural formation of children's technoparks in Russia and abroad [Osobennosti funkcionirovaniya i arhitekturnogo formirovaniya detskih tekhnoparkov v Rossii i za rubezhom]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 8. Pp. 40–47. DOI: 10.34031/article\_5d4946a0401ca1.08904398 (rus)
11. Innovations [Innovacii]. Government of St. Petersburg. Committee for Industrial Policy, Innovation and Trade of St. Petersburg. URL: <https://cipit.gov.spb.ru/innovations/> (date of treatment: 21.04.2021) (rus)
12. Role in the Innovation Ecosystem. Regional. Erasmus Centre for Entrepreneurship. URL: <https://ece.nl/about/role-innovation-ecosystem-2/> (date of treatment: 21.04.2021)
13. Gert-Joost Peek, Kees Stam City-Level Strategies for Planning, Placemaking, and Promotion. Case study: Rotterdam. Building the Innovation Economy. London. 2016. 24 p.
14. Kyrgyzbai A.A. Features of the infrastructure of innovative research centers [Osobennosti infrastruktury innovacionnyh nauchnyh centrov]. Higher school: scientific research. Materials of the Interuniversity Scientific Congress. M. 2020. Vol. 1. Pp. 153–163. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_42910329\\_78062722.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42910329_78062722.pdf) (date of treatment: 21.04.2021)
15. Innovations in the construction cluster: barriers and prospects. Analytics [Innovacii v stroitel'nom klasterere: bar'ery i perspektivy. Analitika]. URL: [https://raex-a.ru/researches/city/inno\\_r\\_db](https://raex-a.ru/researches/city/inno_r_db) (date of treatment: 24.04.2021) (rus)

*Information about the authors*

**Savina, Irina I.** Senior Lecturer. E-mail: iikostikova@gmail.com. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 4.

---

*Received 25.04.2021*

**Для цитирования:**

Савина И.И. Современные тенденции развития зданий и комплексов инновационного назначения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 6. С. 45–51. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-45-51

**For citation:**

Savina I.I. Modern trends in the development of innovative buildings and complexes. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 6. Pp. 45–51. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-45-51

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-52-62

**Аль Савафи М.Х.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: Abokharima@gmail.com

## ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

**Аннотация.** Процесс развития территорий подразумевает вовлечение в него исследований землепользования и земной поверхности. Они в значительной степени необходимы по целому ряду тем и вопросов. Устойчивое развитие во многом зависит от контроля над последствиями изменений. ГИС может достичь этого благодаря своим различным способностям, которые могут использоваться градостроителями и лицами, принимающими решения. ГИС может работать как инструмент и как система или даже группа систем, которые работают одновременно или последовательно. ГИС является одним из наиболее важных приложений градостроительства. Данное исследование посвящено особенностям использования геоинформационных технологий в градостроительном планировании. Выявлены проблемы ограничения использования ГИС в градостроительстве. Рассмотрены основные виды ГИС в градостроительстве, которыми являются управление базами данных, визуализация, пространственный анализ и пространственное моделирование, а также наиболее часто используемые функции (интерполяция, наложение карты, буферизация и измерение связности) и варианты их использования в зависимости от различных задач и этапов градостроительства, а также преимущества растровых и векторных данных. Также в статье отражено возникновение и развитие системы поддержки территориально-пространственных решений (СДСО) и системы поддержки планирования (ПСО) в градостроительстве. Сформулирована роль ГИС в анализе пространственного планирования.

**Ключевые слова:** градостроительство, геоинформационные технологии, землепользование, системы поддержки планирования.

**Введение.** Геоинформационные технологии (далее ГИС) играют большую роль в градостроительных приложениях и процессах планирования. Тенденции роста городов и расширения их масштабов можно анализировать с помощью технологий ГИС и применять их при изучении пригодности городских пространств для развития градостроительства (рис. 1). Для определения районов, пригодных для роста городов, необходимо учитывать некоторые факторы. Городские планировщики используют пространственную базу данных ГИС в качестве инструмента оценки и моделирования. ГИС – это онлайн-овая и автономная информационная система планирования, имеющая множество программ, доступных и бесплатных для использования, например, QGIS. Снижение цен на ее оборудование является одной из основных причин того, что ГИС становится все более важным элементом систем поддержки планирования. Доступность информации и данных является одним из основных препятствий для внедрения ГИС в градостроительстве. Другим препятствием является образование людей, участвующих в процессе принятия решений. Несмотря на то, что ГИС были созданы в конце 1960 года, до последнего времени она не применялась интенсивно. Это произошло из-за высокой стоимости оборудования, которое может работать в системе. Именно поэтому несколько отделов планирования установили его в первые

дни, в основном в университетских лабораториях [1]. На картографических компьютерах основной массой ранних систем были программные системы с ограниченным количеством аналитических задач. В то время самое мощное программное обеспечение было основано на сетке. В результате снижение стоимости оборудования, компьютеров и периферийных устройств сопровождается повышением производительности аппаратного и программного обеспечения, особенно производительности процессора компьютера [2]. ГИС стала более доступной, менее трудоемкой и оперативной благодаря достижениям в области структур данных и связанных с ними векторных алгоритмов ГИС. С начала 1980-х годов число пользователей ГИС в развитых странах, особенно в Европе и Северной Америке, значительно возросло на многих уровнях, а также в муниципальных и региональных учреждениях [3]. В 1990-х годах стоимость компьютерного оборудования и программного обеспечения еще более снизилась, и развивающиеся страны начали использовать ГИС в городском планировании. Многие страны, независимо от того, являются ли они развитыми или развивающимися, активно используют инструменты ГИС при принятии решений. Вместе с тем в развитых странах более эффективно содействуют принятию решений [4]. ГИС имеет возможность комбинировать

несколько типов данных и извлекать информацию, которая может использоваться при принятии решений. Пространственные и табличные данные обрабатываются и увязываются с координатным местом в системе ГИС. Это делает изучаемые области более реалистичными для анализа и в конечном итоге для оказания помощи директивным органам в принятии решения. ГИС

использует систему запросов для предоставления и визуализации данных и их обработки [5].

Планировщики могут проводить оценку пространства с помощью таких гео-обрабатывающих артефактов, как картографирование, расчет полосы пропускания и буферизация в среде ГИС.



Рис. 1. Общая схема градостроительства и ГИС

Из всех функций геообработки наложение карты, пожалуй, наиболее полезно [6]. Картография является важным инструментом, который городские планировщики используют при оценке землепользования, особенно для составления карт кадастров. Это объясняется высокой точностью программного обеспечения ГИС в сравнении с обычными методами. В городском планировании используется множество методов ГИС, которые варьируются в зависимости от сферы охвата, целей и размера исследуемого района. Однако можно сказать, что управление базой данных и визуализация, помимо пространственного анализа и моделирования, являются ключевыми элементами прикладных программ ГИС в области городского планирования [3]. Поэтому она может использоваться для изучения распределения социально-экономических и экологических данных, а также для визуализации результатов пространственного анализа и моделирования, которые должны контролироваться директивными органами [7]. Помимо различных видов использования ГИС существуют функции пространственного анализа, которые включают моделирование и интерполяцию, наложение карт, буферизацию и пространственную координацию. Конечно, это во многом зависит от цели использования этих функций [8].

В городском планировании городские застройки варьируются в зависимости от различных этапов и уровней, которые могут повлиять на район, который будет развиваться. И наиболее распространенными ролями ГИС в городском планировании являются управление городскими данными и стратегическое планирование [9]. Планирование может варьироваться от всего города до суб-региона города, районов или даже дорог. Чаще всего к районам городского развития относятся все объекты, находящиеся под навесом городских районов [10]. Для каждого уровня планирования существует несколько этапов: определение целей; моделирование и прогнозирование; осуществление оценки альтернативных вариантов планирования; мониторинг; подготовка и осуществление новых изменений в планах [10]. Пространственный анализ и управление данными более распространены в повседневной городской планировке. Пространственное моделирование все шире используется в стратегическом планировании. Управление данными и их визуализация широко используются в системе общего управления (рис. 2). Наконец, большинство функций ГИС используются при планировании управления для визуализации и пространственного анализа, а также учета землепользования:

- картографирование;

- прикладной обработки планирования;
- процессов приложений для управления построением;
- землепользование;
- промышленных и коммерческих отчетов;
- организации отдыха и сельских объектов;
- оценка экологического и экономического воздействия;

- стратегическое планирование землепользования / транспорта;
- анализ водосборной площади и наличия общественных объектов;
- анализ социальной сферы.

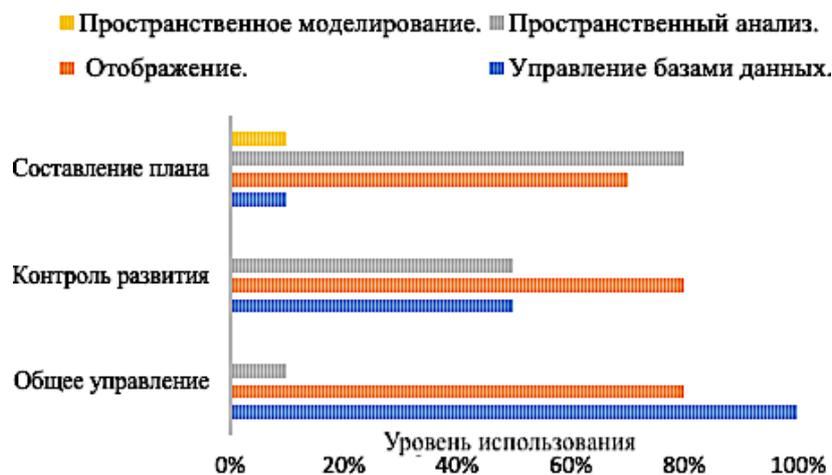


Рис. 2. Использование функций ГИС в градостроительстве

**Основная часть.** Наиболее часто используемые функции ГИС при планировании — это пространственный анализ и пространственное моделирование, визуализация. В рассматриваемом исследовании Вебстер К.Дж. и Гудчайлд М.Ф. рассказали о том, каким образом теоретический вклад в градостроительстве сосредоточен на управлении данными ГИС, визуализации, пространственном анализе и моделировании [11, 12]. Вебстер показывает, что использование ГИС в процессе описания, прогнозирования и планиро-

вания является существенно иным (рис. 3). В общем управлении чаще используется описание, в то время как предсказание и предписание чаще используются при подготовке планов. На различных этапах подготовки используются различные знания и методики. При стратегическом планировании города использовать растровые данные проще, чем векторные. В связи с тем, что растровые данные не требуют высокого разрешения, покрывают большие области, и это легче для участия в расчетах.

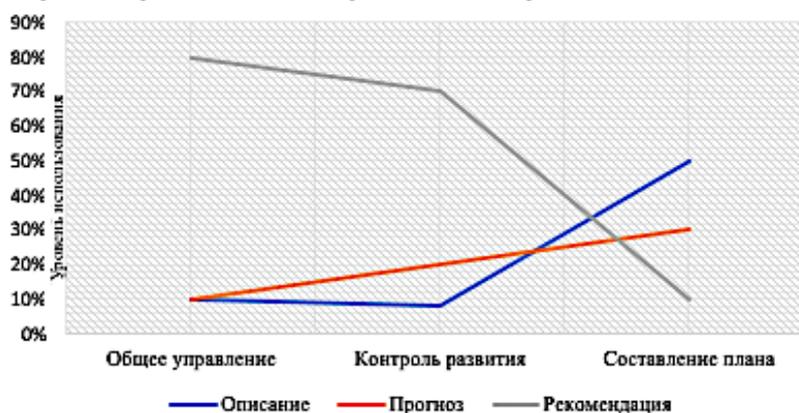


Рис. 3. Характеристика функций ГИС в градостроительной деятельности

При необходимости оценки высокого разрешения лучше использовать векторные данные. Именно поэтому он используется для регионального планирования. Например, векторные данные меньше используются при анализе пригодности территорий. Векторные данные наиболее

применимы при анализе транспортной сети, в том числе маршрутной [13].

Функции ГИС различны и имеют различное применение при изучении роста городов и его этапов. Моделирование с помощью ГИС и разработка альтернативных сценариев являются более

надежными, чем простое определение целей для процесса планирования. Для каждого этапа роста городов ГИС может предоставлять, обрабатывать и анализировать данные из различных ресурсов и типов. И может извлечь достоверную информацию из этих данных [9].

**Инвентаризация ресурсов.** ГИС обеспечивает экономию времени, когда базы данных других систем обрабатываются в рамках ГИС. ГИС обеспечивает экономию времени, когда базы

данных других систем, например, данные дистанционного зондирования о землепользовании и окружающей среде обрабатываются в рамках ГИС.

Дистанционное зондирование является идеальным источником данных для ГИС [14, 15]. ДЗЗ может помочь определить изменения в землепользовании и их временные различия (рис. 4) [9].

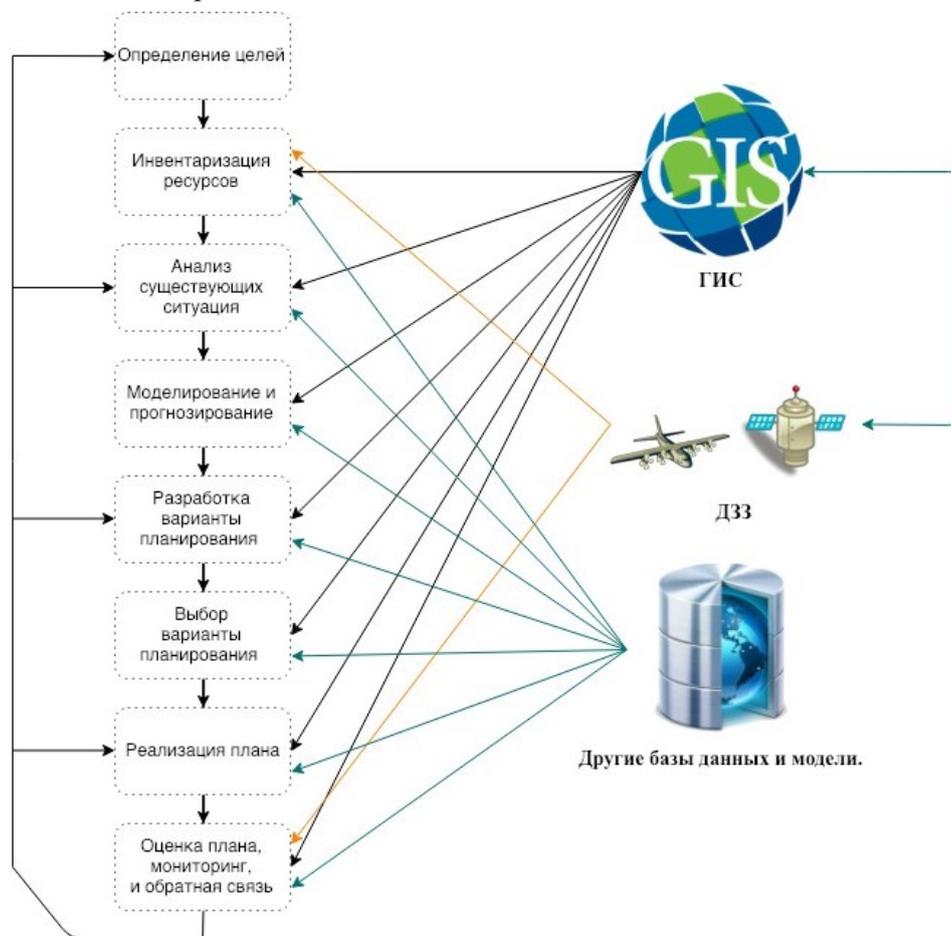


Рис. 4. Интеграция ГИС, ДЗЗ и других баз данных

**Текущая ситуация.** Города, данные по которым получены в ходе обследования, могут обрабатываться, храниться и оцениваться в рамках ГИС. Будь то физические данные, такие как карты склонов и местности, экономические данные, такие как карта распределения ВВП, социальные данные, такие как карта распределения населения и т.д. Эти данные и информация играют важную роль в принятии решения, когда они используются должным образом. Ядра природной системы могут быть обнаружены с помощью дистанционного зондирования и других экологических данных [10].

**Прогнозы и их моделирование.** Экономический рост и прирост населения можно также прогнозировать с помощью ГИС. Современные демографические модели, а также изменения в

экономике и климате или населении, можно моделировать с помощью пространственного моделирования распределения [17]. Например, с использованием социально-экономических и экологических данных, хранящихся в ГИС, были разработаны модели городской окружающей среды для выявления областей, представляющих экологический интерес, и конфликтов до и после развития [18]. С помощью ГИС можно также моделировать различные сценарии роста. Эффекты моделирования можно визуализировать графически, облегчая взаимодействие с лицами, принимающими решения [7, 19]. Разработчики планов могут использовать эту информацию для выработки альтернативных подходов к планированию и руководству будущим ростом, что позволит избежать таких конфликтов.



Стратегии планирования могут быть разработаны при всестороннем использовании информации городских карт и слоев. Кроме того, можно изменить модель, чтобы ответить на вопрос, на который необходимо ответить для решения вопроса и принятия решения [9]. Сочетание ГИС и ее возможностей пространственного анализа и пространственных моделей может оптимизировать разработку альтернативных планов [20].

Несмотря на то, что процесс принятия решений носит политический характер, участие ГИС может способствовать принятию решения путем предоставления информации, которая может

прояснить изучаемый вопрос. И это может способствовать оценке сценариев планирования [20]. Техническая обратная связь по выбору альтернативных решений может быть обеспечена с помощью ГИС с многокритериальной оценкой выбора [21].

**Реализация планов.** Для обеспечения устойчивости городских территорий ГИС может использоваться для измерения и смягчения последствий роста для района. После этой работы могут быть предложены коррективные меры по уменьшению антропогенного воздействия и последствий экономической деятельности [20].

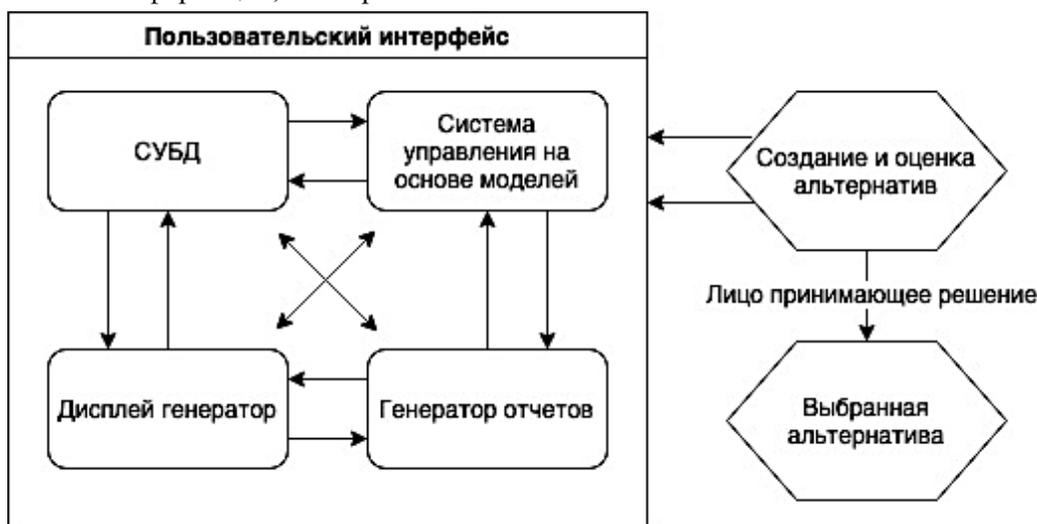


Рис. 5. Взаимодействия ГИС, СДСО и ПСО в градостроительной деятельности

**Оценка плана, мониторинг и обратная связь.** Сочетание ГИС и дистанционного зондирования способствует экологическому мониторингу исследуемого района. ГИС может также использоваться для проверки сложности экологического воздействия того или иного действия и его последствий для окружающей среды [9]. Для градостроительства, в рамках ГИС, задействованы системы поддержки пространственных решений (СДСО) и системы поддержки планирования (ПСО).

Системы поддержки принятия решений были разработаны в конце 1960-х – начале 1970-х годов в ответ на недостатки систем управления информацией (ИСМ) [22]. Однако, оказалось достаточно сложно обеспечить аналитическое моделирование и вовлечь участников градостроительной деятельности (региональную и местную власть) в процесс принятия решений.

СДСО обеспечивает основу для использования систем управления базами данных, аналити-

ческих моделей и графиков. Эта рамочная программа призвана содействовать укреплению процессов принятия решений путем удовлетворения просьб, которые плохо описаны, частично качественны или полу структурированы. Определение рамок принятия решений было применено к пространственному контексту при разработке уровней защиты доступа (рис. 5), которые описывают архитектуру СДСО. Эта система позволяет лицам, принимающим решения, выбирать из множества вариантов на местном уровне, таких как идеальное расположение школы [23]. Принцип системы поддержки планирования заключается в разработке параллельного планирования (ППС). ППС, как впервые предложил Харрис, представляет собой набор компьютерных методов и моделей, которые помогают функции планирования (1989 год) [24]. Эта система содержит множество элементов информационных технологий с различными реализациями на различных этапах процесса планирования [26].

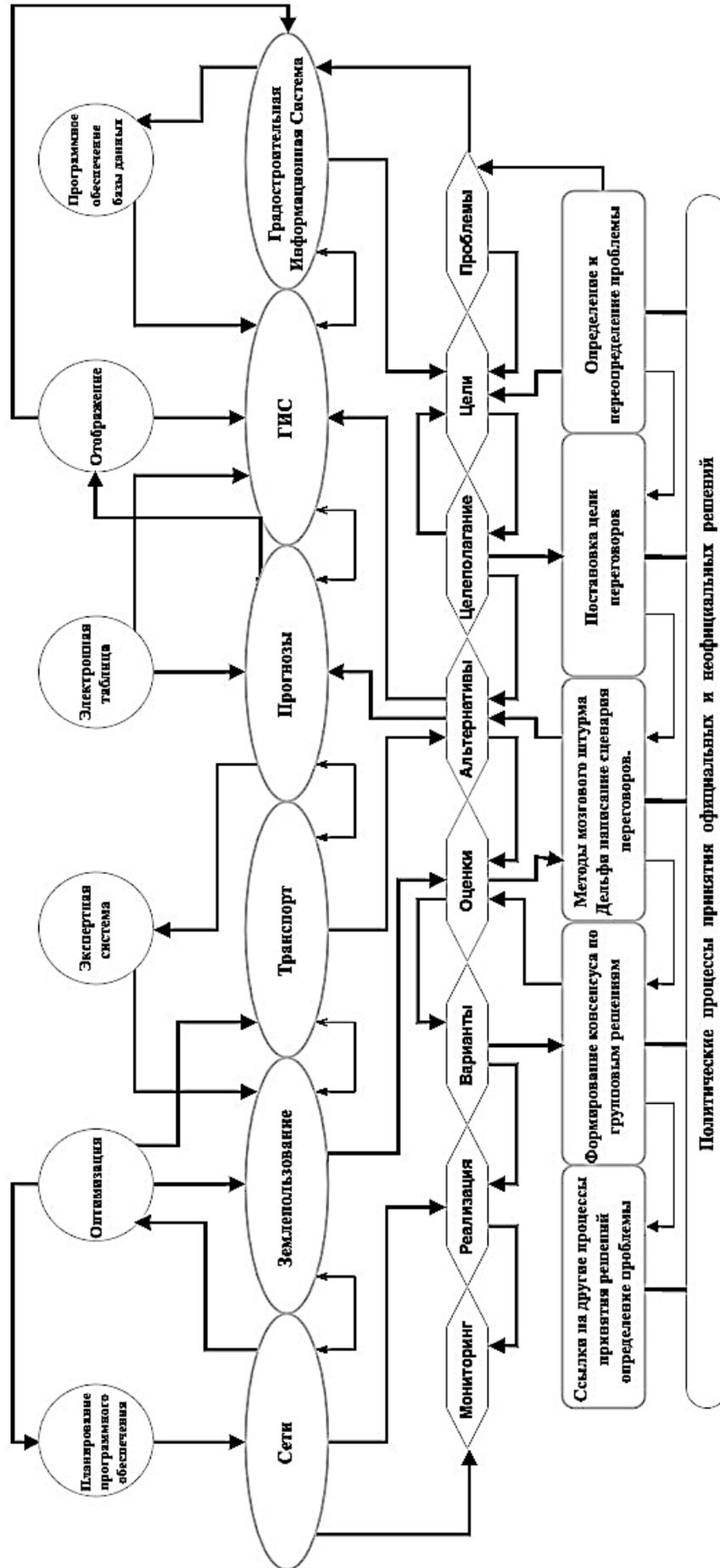


Рис. 6. Схема структуры планирования, которая помогает процессу планирования

Что касается другой информации, то она должна также включать полный спектр обычных методов планирования. Следует рассмотреть экспертные системы, системы поддержки принятия решений (например, многокритериальный анализ решений), гипер-системы и системы групповой поддержки принятия решений. Как отмечалось ранее, снижение цен сделало ее открытой для всех слоев общества, а не только для лабораторий университетов и крупных компаний. Использование географических информационных систем (ГИС) имеет важное значение для обеспечения устойчивого роста, укрепления территориального планирования и управления территорией системы региональных поселений. Именно поэтому муниципалитеты прекрасно подходят для использования в своей деятельности в области устойчивого развития [20].

**Тенденции, влияющие на использование, ГИС.** ГИС в моделях градостроительства варьируется от слабо связанных архитектур до тесно связанных и интегрированных архитектур (рис. 6). Экспорт/импорт данных между ГИС и другими системами планирования является частью интеграции, основанной на взаимосвязанной архитектуре систем (рис. 7). Данные экспортируются из ГИС и направляются во внешнюю программу и наоборот. Результаты моделирования можно вернуть в ГИС для отображения, оценки и манипуляций. Этот подход часто используется при принятии решений по ряду факторов. Все большую популярность приобретает создание полностью интегрированных моделей планирования ГИС. Использование непрограммных моделей экономит время пользователя. По-прежнему необходимы слабо связанные и тесно взаимосвязанные архитектуры, если наиболее часто используемые модели планирования не полностью интегрированы в ГИС. Для целей планирования визуализация данных является чрезвычайно полезной. Это поможет планетологам понять и выверить результаты [1]. Полезно представить результаты сложных позиционных моделей. Поэтому визуализация данных в поддержку процесса принятия решений по вопросам планирования является весьма полезным инструментом ГИС, а удобные для пользователей функции просмотра сделали ГИС более полезными для планирования. Одним из последних достижений в области ГИС, оказавших существенное воздействие на градостроительство, является объединение различных типов мультимедийных данных и использование ГИС в среде Интернета/интранета. Использование фотографий, видео, аэрофотоснимков и звука в ГИС может помочь проекти-

ровщикам лучше понять проблему планирования, над которой они работают. Планировщики смогут получить более точный вид на планируемое помещение, объединив ГИС и виртуальную реальность [9].

Программное обеспечение ГИС может быть важной частью его применения в градостроительстве, но вполне справедливо сказать, что это нечто большее. Эти факторы могут быть одними из наименее существенных, когда речь идет о влиянии ГИС на рост городов. Если лица, принимающие решения, не используют систему поддержки принятия решений, то она бесполезна, независимо от того, насколько она сложна или проста. Для успешного внедрения ГИС более важны ГИС, людские ресурсы и организационные переменные, чем технология. Для обеспечения эффективности ГИС наиболее всего рассматриваются три набора условий:

- 1) определение ожиданий клиентов и учет ресурсов организации является частью плана управления информацией;
- 2) вовлечение людей на всех уровнях организации во все виды информационных технологий;
- 3) повышенные уровни организационной и экологической стабильности.

В развитых странах запланированные организации, имеющие незначительное влияние на учреждение, собирают большое количество данных, которые используются для планирования. Кроме того, отсутствуют механизмы обеспечения точности собранных данных. Когда-то считалось, что ключевыми препятствиями на пути использования ГИС в процессе роста городов в развивающихся странах являются оборудование, программное обеспечение и людские ресурсы. В действительности отсутствие обновленных данных является самым серьезным препятствием для успешного использования ГИС в развивающихся странах. Срочно требуется институциональная структура для обеспечения регулярного сбора и обновления соответствующих данных.

**Заключение.** Современное планирование в развивающихся странах не продвинулось далеко за пределы ГИС. Возможно, что планировщик и средства подготовки еще не готовы к использованию данных и архивов ГИС. Несмотря на это, преимущества и потенциальные области применения ГИС по-прежнему неизвестны большинству планировщиков в развивающихся странах. Кроме того, хотя на сбор данных было затрачено много усилий, на преобразование данных в информацию для принятия решений по планированию было затрачено относительно мало.

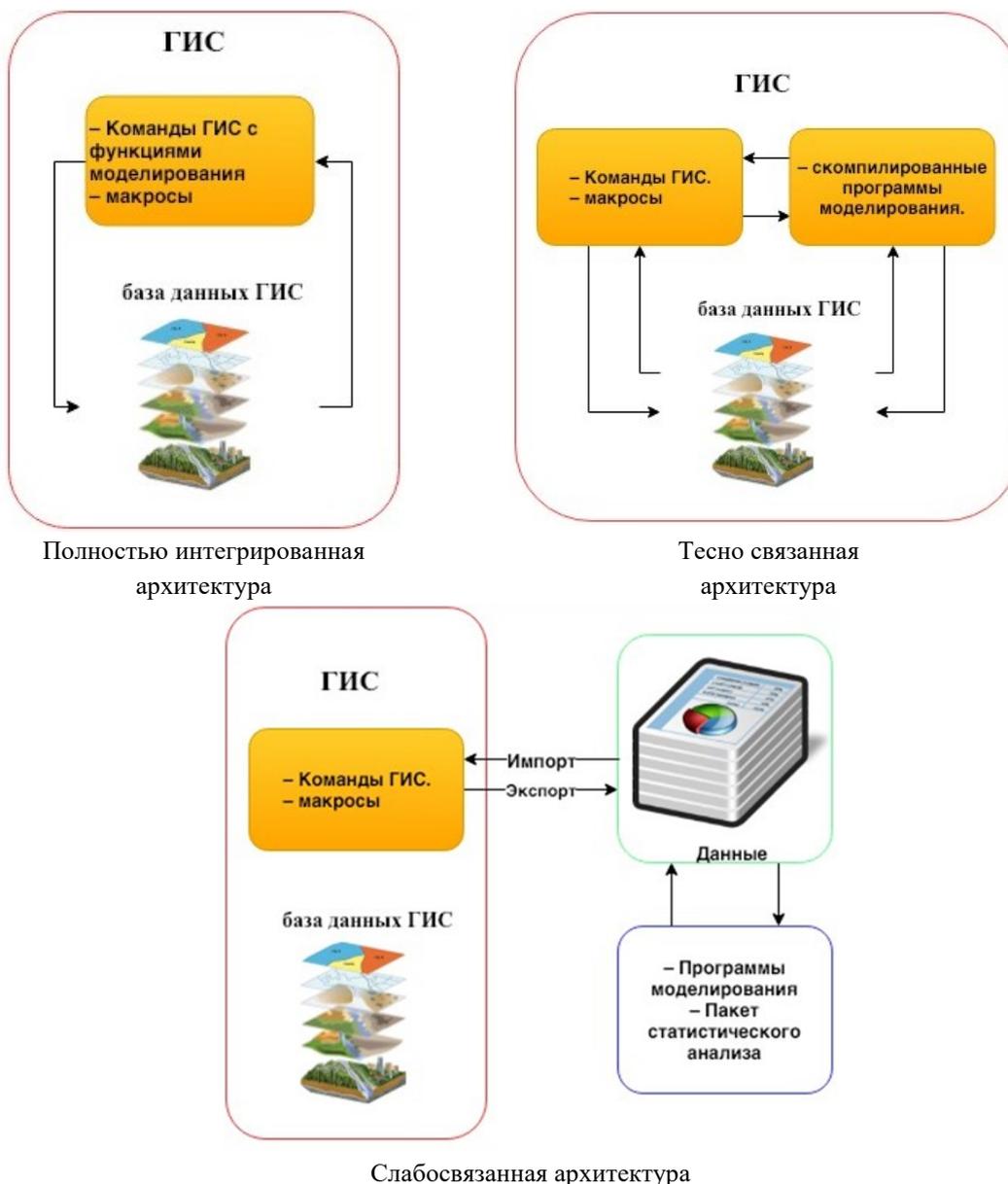


Рис. 7. Виды архитектур интеграции ГИС

Наиболее полезными инструментами развития городов являются дистанционное зондирование и ГИС. Можно сделать вывод о том, что ГИС может помочь в анализе пространственного планирования. Это показывает, что область применения ГИС пытается преодолеть аналитические ограничения, например, долгосрочные расчеты. ГИС все шире используется в учреждениях планирования в развитых и развивающихся странах. Поэтому многие департаменты планирования перешли на ГИС, а не программное обеспечение для составления карт. В настоящее время ГИС представляет собой функциональную и доступную информационную систему планирования, повышающую удобство использования и функциональность программного обеспечения, ГИС и позволяющую значительно снизить стоимость аппаратного обеспечения ГИС, что сделало его

весьма полезным на различных уровнях. Недавние изменения, связанные с включением ГИС в модели планирования, просмотра и Интернета, способствовали анализу ГИС роста городов. Основные ограничения в использовании ГИС сегодня в городском планировании связаны не с техническими аспектами, а с наличием данных, организационными изменениями и профессионализмом пользователей. ГИС находит свое применение в градостроительстве как аналитический и моделирующий инструмент. Он может быть применен к широкому кругу задач. ГИС также помогает проводить технико-экономическое обоснование объекта, например, для определения того, пригоден ли участок для конкретного функционального здания. ГИС в экологическом планировании все чаще применяется для решения проблем пространственного моделирования, где она оказалась весьма ценной и полезной. Кроме того,

ГИС помогает предоставлять информацию об экологической пригодности земли, ее уровне и характере загрязнения. Она также может быть использована для определения целесообразности создания зоны для удаления и обработки отходов. Следует изучить и принять во внимание такие факторы, как химические, биологические, топографические и физические свойства района. Широко распространенные проблемы, такие как водно-болотные угодья, могут быть легко решены с помощью ГИС и технологий дистанционного зондирования. ГИС аккумулирует и предоставляет различные аспекты пространственной информации в рамках одной системы. Географические данные могут быть с легкостью проанализированы и обработаны. Это позволяет более объективно изображать различные варианты цифровой информации. ГИС и дистанционное зондирование применяются совместно как инструменты градостроительства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., Rhind D.W. Geographic information systems and science.: John Wiley & Sons, 2005. 404 p.
2. Burrough P.A., McDonnell R., McDonnell R.A., Lloyd C.D. Principles of geographical information systems.: Oxford university press, 2015. 329 p.
3. Cullingworth B., Nadin V. Town and Country Planning in the UK.: Routledge, 2003. 481 p.
4. Rajabifard A., Binns A., Masser I., Williamson I. The role of sub-national government and the private sector in future spatial data infrastructures // International Journal of Geographical Information Science. 2006. № 7. P. 727–741.
5. Haklay M. How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets // Environment and planning B: Planning and design. 2010. № 4. Pp. 682–703.
6. Scholten H.J., Stillwell J. Geographical information systems for urban and regional planning.: Springer Science & Business Media, 2013. 276 p.
7. Lonshakov D.A., Perkova M. V., Bolshakov A. G., Tribuntseva K. M. Creating conception of recreational areas development on the example of small urban settlements // Research Journal of Applied Sciences. 2014. № 11. Pp. 887–892.
8. Perkova M., Kolesnikova L., Korotun E. Formation of Engineering Thinking in Multilevel Architectural Education // Key Engineering Materials. 2018. Pp. 24–30.
9. Аль-Савафи М.Х., Перькова М.В., Аль-Джабери А.А.Х. Изучение изменений в землепользовании территории г. Белгорода с использованием дистанционного зондирования и ГИС методов // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2019. №1. С. 103–111.
10. Аль-Савафи М., Перькова М. Rayman и Skyhelios как инструменты моделирования городской климатологии [interactive-plus.ru] editor. Чебоксáры. URL:https://interactive-plus.ru/e-articles/507/Action507-472891.pdf, (дата обращения: 01.08.2018).
11. M. F. Goodchild. Two decades on: Critical GIScience since 1993 // The Canadian Geographer/Le Géographe canadien. 2015. № 1. Pp. 3–11.
12. Webster C. Emergence, spatial order, transaction costs and planning.: Asghate Publishers Ltd Farnham. 2010. 336 p.
13. Brotchie J., Hall P., Newton P., Nijkamp P. The future of urban form: the impact of new technology.: Routledge. 2017. P. 390.
14. Pradhan B., Abokharima M. H., Jebur M.N., Tehrany M.S. Land subsidence susceptibility mapping at Kinta Valley (Malaysia) using the evidential belief function model in GIS // Natural hazards. 2014. № 2. Pp. 1019–1042.
15. Замятин А., Марков Н. Анализ динамики земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли.: Litres. 2018. 175 с.
16. Wegmann M., Leutner B., Dech S. Remote sensing and GIS for ecologists: using open source software.: Pelagic Publishing Ltd, 2016. 178 p.
17. Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., Rhind D.W. Geographic information science and systems.: John Wiley & Sons, 2015. 133 p.
18. Alshuwaikhat H., Abubakar I., Aina Y., Adenle Y., Umair M. The development of a GIS-based model for campus environmental sustainability assessment // Sustainability. 2017. № 3. 439 p.
19. Perkova. M.V. Methods of Identification and Resolution of Urban Conflicts and Contradictions of Development at the Level of Municipal Area // Academia. Architecture and Construction. 2018. № 4. С. 74–83.
20. Perkova M., Baklazhenko E., Vaytens A. Urban Conflicts of the Belgorod Regional Settlement System and its Elements // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. P. 032014.
21. Veronesi F., Schito J., Grassi S., Raubal M. Automatic selection of weights for GIS-based multicriteria decision analysis: site selection of transmission towers as a case study // Applied geography. 2017. Pp. 78–85.

22. Pires S.M.M. Sustainability indicators and local governance in Portugal. Universidade de Aveiro (Portugal), 2011. 307 p.

23. Zhang W., Zhou J., Liu Y., Chen X., Wang C. Emergency evacuation planning against dike-break flood: a GIS-based DSS for flood detention basin of Jingjiang in central China // *Natural Hazards*. 2016. № 2. Pp. 1283–1301.

24. Harris B., Batty M. Locational models, geographic information and planning support systems // *Journal of Planning Education and Research*. 1993. № 3. Pp. 184–98.

25. Черныш А.С., Губарев С.А. Развитие упругих деформаций лессовых грунтов в зависимости от влажности // *Вектор ГеоНаук*. 2018. №2. С. 17–20.

*Информация об авторах*

**Аль Савафи Мохаммед Хасан**, аспирант, кафедра архитектуры и градостроительства. E-mail: Abokharima@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова д. 46.

Поступила 02.03.2021 г.

©Аль Савафи М.Х., 2021

**Al Sawafi M.H.**

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

*E-mail: Abokharima@gmail.com*

## GEONFORMATION TECHNOLOGIES IN URBAN PLANNING

**Abstract.** *The process of studying urban planning implies the involvement of land use and land surface studies. They are largely necessary on a range of topics and issues. Sustainable development depends on controlling the effects of change. GIS can achieve this through its various capabilities, which can be used by urban planners and decision makers. GIS can operate as a tool and as a system, or even as a group of systems that work simultaneously or sequentially. GIS is one of the most important applications of urban planning. This study is devoted to the peculiarities of the use of geoinformation technologies in urban planning. The problems of limiting the use of GIS in urban planning are identified. The main types of GIS in urban planning, which are database management, visualization, spatial analysis and spatial modeling, as well as the most commonly used functions (interpolation, map overlay, buffering and connectivity measurement) and options for their use depending on different tasks and stages of urban development, as well as the advantages of raster and vector data. The article also reflects the emergence and development of spatial decision support system (SDSS) and planning support system (PSS) in urban planning. The role of GIS in the analysis of spatial planning is formulated.*

**Keywords:** *GIS, decision-making, systems of urban planning, urban planning.*

### REFERENCES

1. Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D. J., Rhind D. W. *Geographic information systems and science.*: John Wiley & Sons, 2005. 404 p.

2. Burrough P.A., McDonnell R., McDonnell R.A., Lloyd C.D. *Principles of geographical information systems.*: Oxford university press, 2015. 329 p.

3. Cullingworth B., Nadin V. *Town and Country Planning in the UK.*: Routledge. 2003. 481 p.

4. Rajabifard A., Binns A., Masser I., & Williamson I. The role of sub-national government and the private sector in future spatial data infrastructures. *International Journal of Geographical Information Science*. 2006. No. 7. Pp. 727–741.

5. Haklay M. How good is volunteered geographical information? A comparative study of

OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets. *Environment and planning B: Planning and design*. 2010. No. 4. Pp. 682–703.

6. Scholten H.J., Stillwell J. *Geographical information systems for urban and regional planning.*: Springer Science & Business Media, 2013. 276 p.

7. Lonshakov D.A., Perkova M.V., Bolshakov A.G., Tribuntseva K.M. Creating conception of recreational areas development on the example of small urban settlements. *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. No. 11. P. 887–892.

8. Perkova M., Kolesnikova L., Korotun E. Formation of Engineering Thinking in Multilevel Architectural Education. *Key Engineering Materials*. 2018. Pp. 24–30.

9. Al-Sawafi M., Perkova M., Al-Jaberi A. Study of changes in the land use of the territory of Belgorod using remote sensing and GIS methods [Izuchenie izmenenij v zemlepol'zovanii territorii g.

Belgoroda s ispolzovaniem distancionnogo zondirovanija i GIS metodov]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2019. No. 1. Pp. 103–111. (rus)

10. Al-Sawafi M., Perkova M. Rayman and Skyhelios as tools for modeling urban climatology [Rayman i Skyhelios kak instrumenty modelirovanija gorodskoj klimatologii]. [interactive-plus.ru] editor. Čeboksáry. URL: <https://interactive-plus.ru/e-articles/507/Action507-472891.pdf>, (date of request: 01.08.2018). (rus)

11. Goodchild M.F. Two decades on: Critical GIScience since 1993. The Canadian Geographer/Le Géographe canadien. 2015. No. 1. Pp. 3–11.

12. Webster C. Emergence, spatial order, transaction costs and planning.: Asghate Publishers Ltd Farnham. 2010. 336 p.

13. Brotchie J., Hall P., Newton P., Nijkamp P. The future of urban form: the impact of new technology.: Routledge, 2017. 390 p.

14. Pradhan B., Abokharima M. H., Jebur M. N., Tehrani M. S. Land subsidence susceptibility mapping at Kinta Valley (Malaysia) using the evidential belief function model in GIS. Natural hazards. 2014. No. 2. Pp. 1019–1042.

15. Zamyatin A., Markov N. Analysis of the dynamics of the Earth's surface based on remote sensing data [Analiz dinamiki zemnoj poverhnosti po dannym distancionnogo zondirovanija Zemli]: Litres. 2018. 175 p. (rus)

16. Wegmann M., Leutner B., Dech S. Remote sensing and GIS for ecologists: using open source software.: Pelagic Publishing Ltd, 2016. 178 p.

17. Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., Rhind D.W. Geographic information science and systems.: John Wiley & Sons, 2015. 133 p.

18. Alshuwaikhat H., Abubakar I., Aina Y., Adenle Y., Umair M. The development of a GIS-based model for campus environmental sustainability assessment. Sustainability. 2017. No. 3. 439 p.

19. Perkova M.V. Methods of Identification and Resolution of Urban Conflicts and Contradictions of Development at the Level of Municipal Area. Academia. Architecture And Construction. 2018. No. 4. Pp. 74–83.

20. Perkova M., Baklazhenko E., Vaytens A. Urban Conflicts of the Belgorod Regional Settlement System and its Elements. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 032014.

21. Veronesi F., Schito J., Grassi S., Raubal M. Automatic selection of weights for GIS-based multicriteria decision analysis: site selection of transmission towers as a case study. Applied geography. 2017. Pp. 78–85.

22. Pires S.M.M. Sustainability indicators and local governance in Portugal. Universidade de Aveiro (Portugal), 2011. 307 p.

23. Zhang W., Zhou J., Liu Y., Chen X., Wang C. Emergency evacuation planning against dike-break flood: a GIS-based DSS for flood detention basin of Jingjiang in central China. Natural Hazards. 2016. No. 2. Pp. 1283–1301.

24. Harris B., Batty M. Locational models, geographic information and planning support systems. Journal of Planning Education and Research. 1993. No. 3. Pp. 184–198.

25. Chernysh A.S., Gubarev S.A. Development of elastic deformations of loess soils depending on humidity [Razvitie uprugih deformatsij lessovyh gruntov v zavisimosti ot vlaznosti]. Vector of geosciences. 2018. No. 2. Pp. 17–20. (rus)

#### *Information about the authors*

**Al Sawafi Mohammed Hasan**, postgraduate of architecture. E-mail: [Abokharima@gmail.com](mailto:Abokharima@gmail.com). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, Koctokova str., 46.

---

*Received 02.03.2021*

#### **Для цитирования:**

Аль Савафи М.Х. Геоинформационные технологии в градостроительной деятельности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 6. С. 52–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-52-62

#### **For citation:**

Al Sawafi M.H. Geoinformation technologies in urban planning. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 6. Pp. 52–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-52-62

# ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-63-70

*\*Везенцев А.И., Кривенко Ю.Ю.*

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

*\*E-mail: vesentsev@bsu.edu.ru*

## ГИДРОФОБИЗАЦИЯ ТОНКОДИСПЕРСНОГО МЕЛА

**Аннотация.** Природный тонкодисперсный мел (карбонат кальция) является широко используемым функциональным наполнителем композиционных материалов, применяемым во многих отраслях промышленности. Развитие углубленных исследований физико-химических свойств гидрофобного мела, безусловно, способствует расширению областей применения этого ценного материала. Анализ научно-технической литературы показал, что на данный момент отсутствуют исследования параметров пористой структуры и текстурных показателей природного мела различного гранулометрического состава, тем более поверхностно обработанного (гидрофобизированного) жирными карбоновыми кислотами. Для гидрофобизации карбоната кальция практическое применение получили карбоновые кислоты фракций C17 – C20, что обусловлено наличием у этих кислот достаточно длинных углеводородных цепей и реакционно-способной карбоксильной группы. Обработка мела гидрофобизирующей добавкой придает ему следующие преимущества перед необработанным: предотвращение набора влаги, отсутствие слеживания и улучшение технологических свойств (сыпучесть, совместимость с полимером и другие).

В данной работе представлены результаты химического и минералогического анализов природного мела Шеинского месторождения, данные по дифференциальному распределению частиц, степени гидрофобности и исследованию текстурных характеристик необработанного и гидрофобизированного тонкодисперсного мела. Проведена оценка влияния способа измельчения на гранулометрический состав и выявление совокупного влияния способа измельчения и гидрофобизации на текстурные характеристики природного мела. Установлено, что обработка поверхности частиц мела жирными кислотами (содержание C18 не менее 65 масс. %) влияет на процесс адсорбции газообразного азота.

**Ключевые слова:** мел, карбонат кальция, наполнитель композиционных материалов, гидрофобизация, адсорбция, десорбция, текстурные характеристики.

**Введение.** Природный мел – это белая или желтоватая слабоцементированная горная порода осадочного происхождения на основе минерала кальцит ( $\text{CaCO}_3$ ), образованного из обломков скелетов многоклеточных морских планктонных водорослей кокколитофорид (30–40 масс. %) и корненожек-фораминифер (1–20 масс. %), осевших в виде ила из воды теплых морей. В состав мела входит высокодисперсный кристаллический кальцит (до 50 масс. %) и некарбонатные примеси (до 3 масс. %). В меловых породах зафиксировано присутствие раковин моллюсков, кремневых губок, лилий, кораллов, конкреций кремня, пирита и фосфорита. Химический состав мела различных месторождений находится в следующих пределах, масс. %:  $\text{CaO}$  – 47–55;  $\text{MgO}$  – 0,1–1,9;  $\text{SiO}_2$  – 0,2–6,0;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 0,2–4,0;  $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$  – 0,02–0,7;  $\text{CO}_2$  – 40–43 [1].

Карбонатная часть природного мела состоит из трех групп компонентов: органических остатков (растительных и животных), кристалликов кальцита с четко выраженными гранями и изометричного кальцита. Органические остатки — основная часть мела, состоящая из кокколитов и фораминифер (до 22–40 масс. %), также встречаются раковины иноцеромов (местами до 13–20

масс. %), скелеты мшанок, морских ежей, лилий, кремневых губок, кораллов [2, 3].

По данным Д.А. Архангельского природный мел в среднем состоит на 10 масс. % из обломков скелетов многоклеточных, на 10 масс. % из раковин фораминифер, на 40–50 масс. % из тонких зерен кальцита, из переменного количества кокколитов и 2–3 масс. % некарбонатных примесей [4].

По данным Шуменко С.И. [2] природный мел, залегающий на территории Курской магнитной аномалии, характеризуется следующим минеральным составом: 90–99 масс. % кальцита, т.е. чистого карбоната кальция, 1–8 масс. % глинистых минералов, 0,2–6 масс. % кремнезема. В качестве акцессорных минералов возможно присутствие пирита, глауконита, опала, барита. Содержание оксидов железа колеблется от 0,02 до 0,7 масс. %.

Технический продукт на основе природного мела является многотоннажным недорогим ингредиентом композиционных материалов на полимерной основе, которые широко используются во многих отраслях промышленности таких как: строительная, резинотехническая, лакокрасочная и т.д. Возможность использования мела в каждой отдельной отрасли в первую очередь зависит от



его химического, минералогического и гранулометрического состава.

В настоящее время наиболее ценными и востребованными сортами мела, используемого в производстве композиционных материалов, являются тонкодисперсные с содержанием  $\text{CaCO}_3$  не менее 97 масс. % и средним размером частиц (D50) 1–3 мкм, которые позволяют обеспечить высокие эксплуатационные, в том числе физико-механические, характеристики композиционных материалов при высоком их наполнении карбонатом кальция [3, 5].

В связи с выросшими требованиями к качеству готового композиционного материала, предприятия перешли на использование тонкодисперсного мела с модифицированной поверхностью. Модифицирование мела происходит путем закрепления на поверхности его частиц тонкого слоя гидрофобизатора. Поверхностная обработка (гидрофобизация) мела ранее проводилась с целью придания частицам водоотталкивающих свойств [6].

Так как наполнителю на основе мела присуща способность агрегирования при незначительном увлажнении из-за большой «связности» частиц, то возникает проблема слеживания в бункерах и дальнейшее затруднение в транспортировке и использовании. Для устранения данного явления мел гидрофобизируют, что гарантирует водоотталкивающее свойство и высокую сыпучесть [7].

Обработка поверхности частиц мела стеариновой кислотой способствует улучшению реологических свойств порошков при небольшом изменении их физико-механических свойств. Обработанный стеариновой кислотой мел в промышленном масштабе находит применение в качестве наполнителя ряда пластизолей и не пластифицированного поливинилхлорида [8].

В композиционных материалах на основе полимерной матрицы использование гидрофобизированного мела способствует получению однородной смеси, увеличению совместимости наполнителя с неполярным полимером, снижению поглощения пластификатора и существенному уменьшению себестоимости продукта [9, 10].

Анализ литературных данных показал, что в настоящее время отсутствует информация о параметрах пористой структуры и текстурных показателях природного мела различного гранулометрического состава, тем более гидрофобизированного жирными карбоновыми кислотами.

**Материалы и методы.** В работе использован мел природный тонкодисперсный полученный по ТУ 5743-001-50984326-2007, производи-

тель ООО «Полигон-Сервис» (Белгородская область). Предприятие в качестве сырья использует мел Шеинского месторождения, расположенного в Корочанском районе Белгородской области. В качестве гидрофобизатора использован стеарин, который представляет собой смесь жирных кислот, содержащих не менее 65 масс. % стеариновой кислоты C18.

Исследуемые образцы мела № 1 и № 2 представляют собой порошок, полученный сухим измельчением природного мела в молотковой мельнице. Образцы мела № 3 и № 4 получены путем мокрого помола в вертикальной шаровой (бисерной) мельнице. Образцы № 1 и № 3 отличаются от образцов № 2 и № 4 тем, что последние были обработаны стеарином, который наносился методом распыления расплава гидрофобизатора в мельнице типа дезинтегратор. Технологическая линия в ООО «Полигон-Сервис» состоит из оборудования испанской фирмы «Micron Proces».

Химический состав мела определяли по методикам ГОСТ:

- массовую долю углекислого кальция и углекислого магния в пересчете на углекислый кальций определяли по ГОСТ 21138.5-78;
- массовую долю полуторных оксидов железа и алюминия – по ГОСТ 21138.7-78;
- массовую долю веществ нерастворимых в соляной кислоте – по ГОСТ 21138.6-78;
- массовую долю марганца – по ГОСТ 21138.9-78;
- массовая доля песка – по ГОСТ 19220-73.

Подготовку образцов для анализа проводили по ГОСТ 21138.0-78 «Мел. Общие требования к методам анализа».

Минералогический состав исследуемых образцов определяли методом рентгенофазового анализа с использованием дифрактометра Ultima IV. Изучение микроструктуры образцов мела осуществляли с помощью растрового ионно-электронного микроскопа QUANTA 200 3D «FEI Company». Исследования проведены в центре коллективного пользования «Технологии и Материалы НИУ «БелГУ».

Гранулометрический состав образцов определяли с помощью лазерного анализатора частиц «LaSka». Определение гидрофобности образцов мела определяли методом, сущность которого состоит в оценке способности порошка не смачиваться водой. Перечисленные исследования проводили в производственной лаборатории ООО «Полигон-Сервис».

Измерение удельной площади поверхности и пористости образцов мела проводили на автоматическом газо-адсорбционном анализаторе TriStar II 3020. Исследования проведены в центре

коллективного пользования «Технологии и Материалы НИУ «БелГУ».

**Основная часть.** Различие в способах получения исследуемых образцов тонкодисперсного мела обуславливает производство продуктов разного гранулометрического состава, с различной пористостью и удельной поверхностью.

Данные химического анализа исследуемых образцов мела свидетельствуют, что массовая доля  $\text{CaCO}_3$  составляет не менее 98,5 масс. %,  $\text{MgCO}_3$  – менее 0,5 масс. %, сумма полуторных оксидов ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) – менее 0,1 %. Массовая

доля  $\text{Mn}^{2+}$  – не более 0,005 масс. %. Некарбонатная часть в образцах составляет не более 1,2 масс. % и представлена кристаллами низкотемпературного тригонального кварца и глинистыми минералами, при этом содержание зерен песка составляет не более 0,01 масс. %.

По результатам рентгенофазового анализа (рис. 1.) установлено, что мел Шеинского месторождения полностью представлен мономинеральным кальцитом, определяемым по характерным для него интенсивным рефлексам.

Массовое распределение частиц определенного размера представлено в табл. 1.

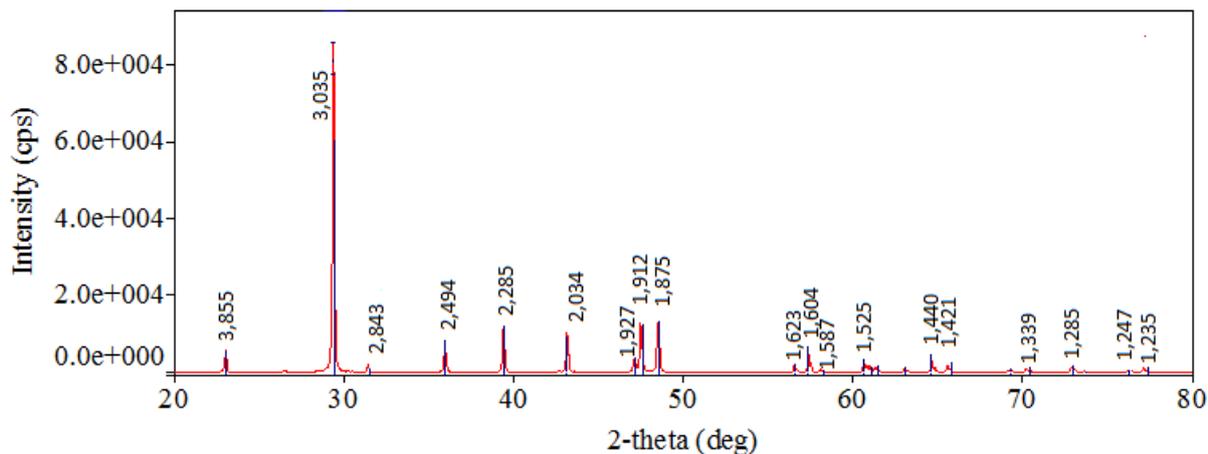


Рис. 1. Рентгеновская порошковая дифрактограмма мела Шеинского месторождения

Таблица 1

**Массовая доля частиц, соответствующих заданным значениям размеров**

| Размер частиц, мкм | Массовая доля частиц заданного размера, % |                    |
|--------------------|---|--------------------|
|                    | Мел сухого помола                         | Мел мокрого помола |
| 0,1–0,5            | 8,5                                       | 14,2               |
| 0,5–1              | 21,7                                      | 38,6               |
| 1–3                | 47,1                                      | 42,9               |
| 3–5                | 15,6                                      | 3,6                |
| 5–10               | 4,0                                       | 0,7                |
| 10–15              | 2,5                                       | 0                  |
| Более 15           | 0,6                                       | 0                  |

Для мела сухого помола большая доля частиц (47,1 масс. %) находится в диапазоне 1–3 мкм, присутствуют частицы более 5 мкм в количестве 7,1 масс. %.

Для мела мокрого помола более 80,5 масс. % частиц находятся в диапазоне 0,5–3 мкм, количество частиц более 5 мкм – 0,7 масс. %.

Данные по дифференциальному распределению частиц мела (в логарифмической шкале), произведенного на промышленных установках сухим и мокрым способом помола представлены на рис. 2.

Средний размер частиц (D50) мела сухого помола составляет около 2 мкм, при максималь-

ном размере частиц (D99) более 15 мкм. Максимальный размер частиц мела мокрого помола составляет около 5 мкм, при среднем размере частиц – 1 мкм.

Лазерный анализатор позволяет определить размер частиц без учета их формы. С целью определения формы частиц проведено исследование указанных образцов методом сканирующей электронной микроскопии. При анализе электронных фотографий (рис. 3) установлено, что мел сухого и мокрого помола в основном состоит из разрушенных кокколитов и их обломков. Встречаются кокколиты двух морфотипов: термалиты и циклолиты. Размер кокколит морфологического типа тремалит по внешнему диаметру около 10

микрон, тогда как циклолиты около 5 мкм. В общей массе порошок сухого и мокрого помола представляет собой обломки кокколит разной формы и размера. Мел мокрого помола имеет более окатанные частицы, чем мел сухого помола.

Реализованная на заводе технология поверхностной обработки, позволяет равномерно покрывать каждую частицу тонким слоем гидрофобизатора, поэтому микрофотографии обработанных и необработанных частиц не имеют существенных отличий.

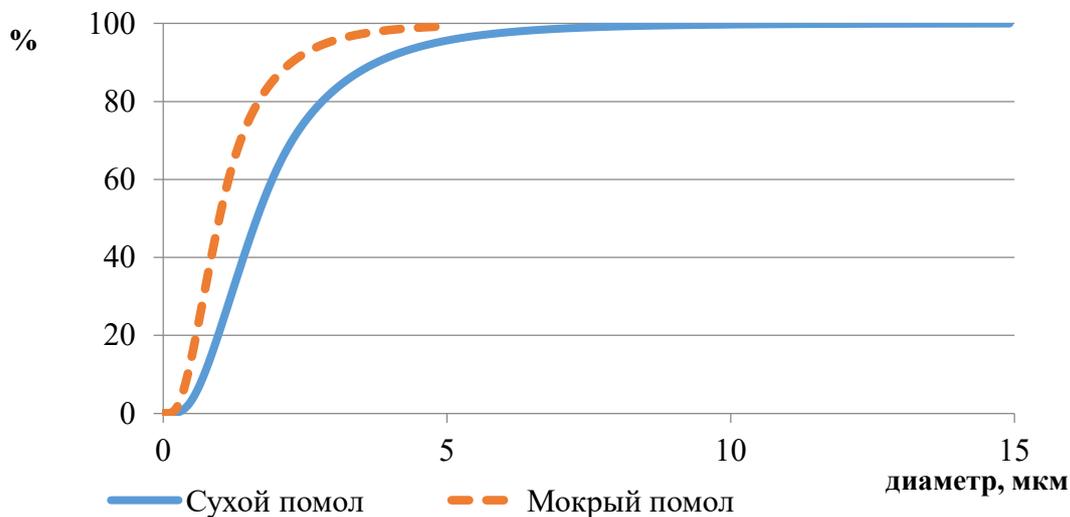


Рис. 2. Зависимость массовой доли и размера частиц мела от способа помола

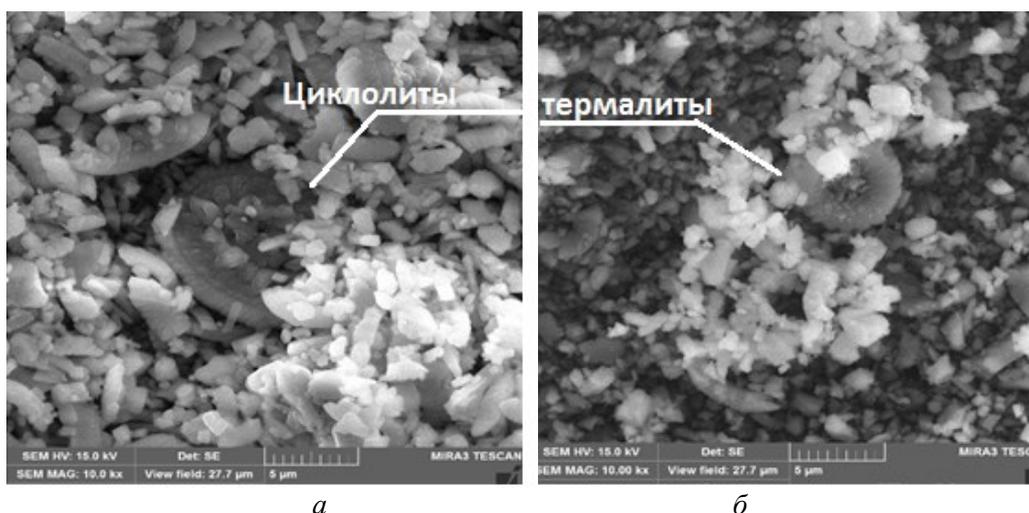


Рис. 3. Микрофотографии образцов мела сухого и мокрого способа измельчения  
 а – образец №1 –  $D_{50} = 2$  мкм, б – образец №3  $D_{50} = 1$  мкм

Определение гидрофобности мела проводили по следующей методике: стеклянный стакан заполняли дистиллированной водой на 50 мм ниже края. От подготовленной пробы отвешивали 2 г анализируемого порошка, засыпали его на поверхность воды. Стакан с водой и порошком оставляли в покое на 24 ч. Порошок считают гидрофобным, если за 24 ч он не осаждается на дно, и не будет наблюдаться смачивания порошка водой.

Образцы №1 и №3 сразу же после засыпания в стакан полностью осаждаются на дно в ре-

зультате смачивания водой. Образцы №2 и 4 поверхностнообработанные стеарином через 24 часа не смачиваются водой и не осаждаются на дно.

Разница в диапазоне размера частиц мела сухого и мокрого измельчения обуславливает различие их текстурных свойств.

На рис. 4 представлена зависимость суммарного объема пор от размера пор в исследуемых образцах мела. Ось абсцисс отражает размер пор в ангстремах Å, ось ординат отражает удельный объем пор в  $см^3/г$ .

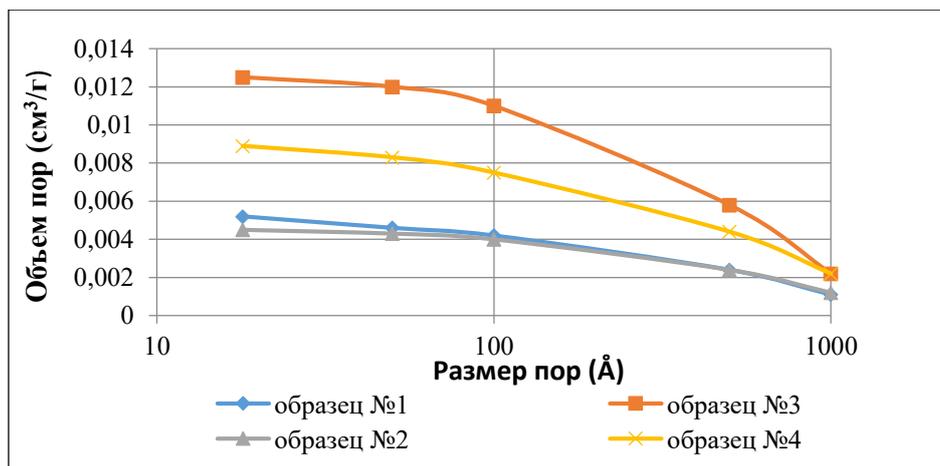


Рис. 4. Зависимость суммарного объема пор от размера пор в образцах мела

Согласно стандарта Международного союза теоретической и прикладной химии поры размером меньше 0,4 нм классифицируются как суб-микропоры, размером 0,4–2 нм – микропоры, 2–50 нм – мезопоры, диаметром более 50 нм – макропоры [11].

По полученным данным установлено, что все исследуемые образцы тонкодисперсного мела представляют собой порошок с комбинацией мезо- и макропор.

Анализ текстурных характеристик мела (табл. 2) показал следующие результаты:

- гидрофобизация мела со средним размером частиц 2 мкм (получен сухим помолом) уменьшает его удельную поверхность в 1,27 раза с 2,24 м<sup>2</sup>/г (образец № 1) до 1,76 м<sup>2</sup>/г (образец № 2) м<sup>2</sup>/г. Существенные изменения в соотношении количества макро- и мезопор от общего объема пор не произошли. При этом средний размер пор увеличился на 16 % – с 86,04 до 100,16 Å, а объем

пор уменьшился на 9,2 % с 0,004838 до 0,004429 см<sup>3</sup>/г.

- самую большую удельную поверхность и объем пор имеет образец № 3 – мел со средним размером частиц 1 мкм, получен мокрым помолом. Обработка поверхности частиц данного мела приводит к изменению процентного соотношения мезо- и макропор: количество мезопор уменьшилось с 55,2 (образец № 3) до 50 % (образец № 4) от общего количества пор. При этом удельная поверхность уменьшилась в 1,5 раза с 4,22 до 2,71 м<sup>2</sup>/г и объем пор сократился более чем на 30 % с 0,012169 до 0,008048 см<sup>3</sup>/г. Средний размер пор практически не изменился.

- изотермы низкотемпературной адсорбции и десорбции азота на образцах тонкодисперсного мела без обработки поверхности частиц и гидрофобизированных стеарином представлены на рис. 5 и рис. 6.

Таблица 2

#### Текстурные характеристики анализируемых материалов

| № образца | Параметры                            | Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г | Объем пор, см <sup>3</sup> /г | Средний размер пор, Å |
|-----------|--------------------------------------|---|-------------------------------|-----------------------|
| 1         | D <sub>50</sub> = 2 мкм              | 2,2491                                  | 0,004838                      | 86,04                 |
| 2         | D <sub>50</sub> = 2 мкм, гидрофобный | 1,7688                                  | 0,004429                      | 100,16                |
| 3         | D <sub>50</sub> = 1 мкм              | 4,2291                                  | 0,012169                      | 115,09                |
| 4         | D <sub>50</sub> = 1 мкм, гидрофобный | 2,7177                                  | 0,008048                      | 118,45                |

По классификации изотерм адсорбции Брунауэра [12] полученные изотермы относятся к IV типу изотерм, которые соответствуют физической сорбции. Характерный признак изотермы IV типа – наличие петли капиллярно-конденсационного гистерезиса.

Согласно классификации ИЮПАК полученные петли гистерезиса относятся к типу H1.

Из полученных данных установлено, что количество адсорбированного газообразного азота

больше всего в образце № 3-мел, без поверхностной обработки, со средним размером частиц 1 мкм, получаемый мокрым помолом. Для мела с уменьшением среднего размера частиц с 2 до 1 мкм (образец № 1 и № 3) наблюдается увеличение адсорбции при P/P<sub>0</sub>=0,60 в 2,1 раза с 0,9 до 1,9 см<sup>3</sup>/г.

Обработка поверхности частиц мела со средним размером частиц 2 мкм способствует снижению количества адсорбированного азота при

$P/P_0=0,60$  с  $0,9$  до  $0,7$   $\text{см}^3/\text{г}$ , т.е. на 20 %; для мела со средним размером частиц  $1$   $\mu\text{м}$  – с  $1,9$  до  $1,1$   $\text{см}^3/\text{г}$ , т.е. на 42 %.

При  $P/P_0=0,95$  для гидрофобного мела адсорбция составляет  $2$  и  $5$   $\text{см}^3/\text{г}$ , что на 15 % при среднем размере частиц  $2$   $\mu\text{м}$  и на 36 % при среднем размере частиц  $1$   $\mu\text{м}$  меньше, чем для образцов мела аналогичного гранулометрического состава без поверхностной обработки, соответственно.

Адсорбция более  $1$   $\text{см}^3/\text{г}$  для образца № 1 достигается при  $P/P_0=0,70$ ; для образца № 2 - при  $P/P_0=0,85$ ; для образца № 3 - уже при  $P/P_0=0,06$ ; для образца № 4- при  $P/P_0=0,47$ . Данные результаты коррелируются с полученными значениями объема пор в каждом исследуемом образце. Большая адсорбция образца № 3 обусловлена большим объемом пор по сравнению с другими образцами.

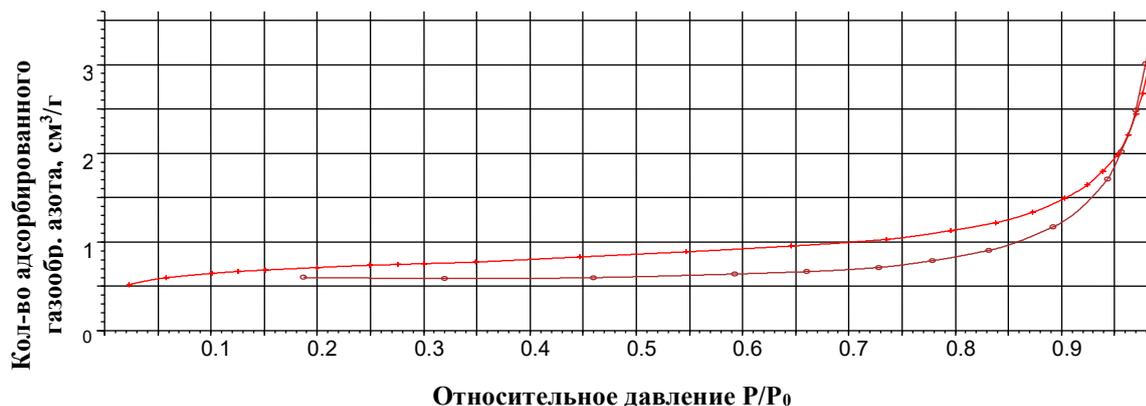


Рис.5. Изотермы низкотемпературной адсорбции и десорбции азота образцом сухого помело. (Ось «X» – относительное давление  $P/P_0$ , где  $P$  – измеряемое давление,  $P_0$  – давление насыщения; ось «Y» – количество адсорбированного газообразного азота).

—+— Адсорбция —o— Десорбция

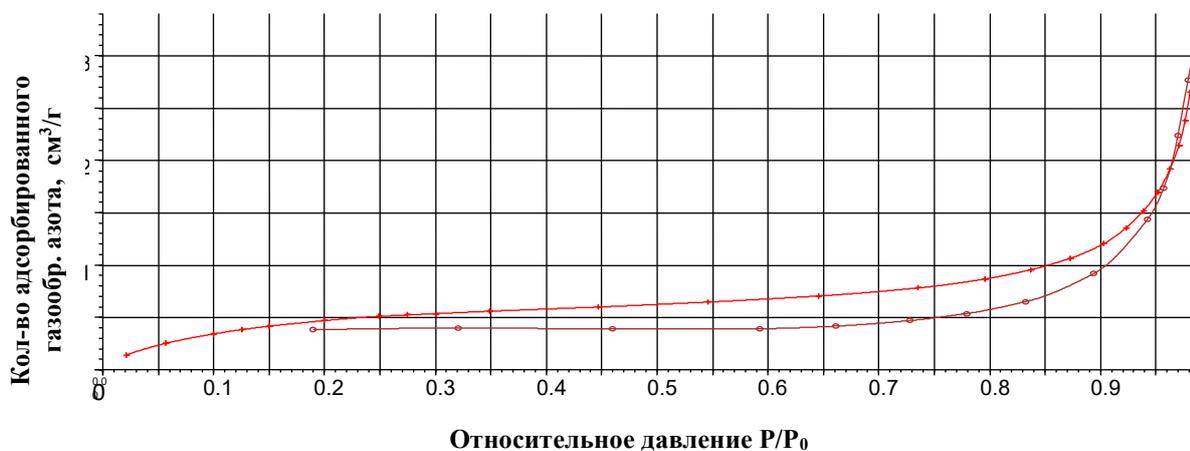


Рис. 6. Изотермы низкотемпературной адсорбции и десорбции азота образцом гидрофобизированного мела. (Ось «X» – относительное давление  $P/P_0$ , где  $P$  – измеряемое давление,  $P_0$  – давление насыщения; ось «Y» – количество адсорбированного газообразного азота).

—+— Адсорбция —o— Десорбция

### Выводы:

1. Доказано, что технический продукт тонкого измельчения природного мела представлен частицами кальцита со средним размером  $1$ – $2$  микрона с характерной комбинацией макро- и мезопор.

2. Установлено, что мокрый помол мела позволяет получить порошок с более узким дисперсным распределением частиц со средним размером ( $D_{50}$ ) –  $1$   $\mu\text{м}$  и с максимальным ( $D_{99}$ ) –  $4$   $\mu\text{м}$ .

3. Показано, что обработка поверхности частиц мела стеарином позволяет получить порошок, частицы которого не смачиваются водой, т.е. обладают гидрофобными свойствами.

4. Выявлено, что обработка поверхности частиц мела стеарином способствует уменьшению адсорбции азота при  $P/P_0=0,95$  на 15 % при среднем размере частиц  $2$   $\mu\text{м}$  и на 36 % при среднем размере частиц  $1$   $\mu\text{м}$ .

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Козловский Е.А. Горная энциклопедия/ТЗ/Советская энциклопедия. Москва, 1987. 592 с.
2. Шуменко С.И. Литология и породообразующие организмы (кокколитофориды) верхнемеловых отложений востока Украины и области Курской магнитной аномалии. Харьков: Изд-во Харьков. гос. ун-та, 1971. 163 с.
3. Иванов Н.С., Мясников Н.Ф. Производство и потребление мела. Белгород: Изд-во Полиграф-Интер, 2000. 263 с.
4. Горькова И.М., Душкина Н.А., Окнина Н.А. Природа прочности и деформационные особенности мела и некоторых меловых пород. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 486 с.
5. Мамбиш С.Е. Минеральные наполнители в промышленности пластмасс // Пластические массы. 2007. №12. С. 3–5.
6. Паус К.Ф., Евтушенко И.С. Химия и технология мела. М.: Стройиздат, 1977. 138 с.
7. Ксантоса М., пер с англ. под ред. Кулезнева В.Н. Функциональные наполнители для пластмасс. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 462 с.
8. Петров И., Сейдов А.Ш. Анализ товарных рынков карбоната кальция. М.: Abercode., 2005. 180 с.
9. Кац Г.С., Милевски Д.В. Наполнители для полимерных композиционных материалов. М.: Химия, 1981. 736 с.
10. Петров И.М. Обзор рынка карбоната кальция природного тонкодисперсного в странах СНГ. Infomine Research Group, 2010. 179 с.
11. Rouquerol J., Avnir D., Fairbridge C.W., Everett D.H., Haynes J.M., Pernicone N., Ramsay J.D.F, Sing K.S.W., Unger K.K. Pure and Applied Chemistry, 1994. Vol. 66, Issue 8. Pp. 1739–1758.
12. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. Пер. с англ. 2-е изд. М.: Мир, 1984. 306 с.

*Информация об авторах*

**Везенцев Александр Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры общей химии института фармации, химии и биологии. E-mail: vesentsev@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85.

**Кривенко Юлия Юрьевна**, магистрант кафедры общей химии института фармации, химии и биологии. E-mail: yulya.kilanova20@gmail.com. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85.

Поступила 02.05.2021 г.

© Везенцев А.И., Кривенко Ю.Ю., 2021

**\*Vezentsev A.I., Krivenko Yu.Yu.**  
Belgorod State National Research University  
\*E-mail: vesentsev@bsu.edu.ru

**HYDROPHOBIZATION OF FINE CHALK**

**Abstract.** Natural fine chalk (calcium carbonate) is widely used functional filler for composite materials used in many industries. The development of in-depth studies of the physicochemical properties of hydrophobic chalk contributes to the expansion of its application. The analysis of scientific and technical literature has shown that at the moment there are no studies of the parameters of the porous structure and textural parameters of natural chalk of various granulometric composition, especially superficially treated (hydrophobized) with fatty carboxylic acids. Carboxylic acids of C17 to C20 fractions are practically applied for hydrophobization of calcium carbonate that is conditioned by presence of these acids with enough long hydrocarbon chains and reactive carboxyl group. The treatment of chalk with hydrophobizing additive gives it the following advantages over untreated chalk: prevention of moisture accumulation, absence of caking and improvement of technological properties (flowability, compatibility with polymer and others). The paper presents the results of chemical and mineralogical analyses of natural chalk from the Sheinsky deposit, data on the differential distribution of particles, the degree of hydrophobicity, and the study of the textural characteristics of natural and hydrophobized fine chalk. The influence of the grinding method on the granulometric composition is evaluated and the cumulative effect of the grinding method and hydrophobization on the texture characteristics of chalk is revealed. It is established that the surface treatment of chalk particles with fatty acids (C18 content not less than 65 wt %) affects the process of nitrogen gas adsorption.

**Keywords:** chalk, calcium carbonate, filler of composite materials, hydrophobization, adsorption, desorption, texture characteristics.

## REFERENCES

1. Kozlovsky E.A. Mountain Encyclopedia / T3 / Soviet Encyclopedia [Gornaya enciklopediya/T3/Sovetskaya enciklopediya]. Moscow, 1987. 592 p. (rus)
2. Shumenko S.I. Lithology and breeding organisms (kokkolitoforids) of the uppermal sediments of the East of Ukraine and the region of the Kursk magnetic anomaly [Litologiya i porodoobrazuyushchie organizmy (kokkolitoforidy) verhnemelovyh otlozhenij vostoka Ukrainy i oblasti Kurskoj magnitnoj anomalii]. Kharkov: Publishing house Kharkov. State un-ta, 1971. 163 p. (rus)
3. Ivanov N.S., Myasnikov N.F. Production and consumption of chalk [Proizvodstvo i potreblenie mela]. Belgorod: Publishing House Polygraph Inter, 2000. 263 p. (rus)
4. Gorkyova I.M., Dushkina N.A., Oknina N.A. The nature of the strength and deformation features of the chalk and some chalk breeds [Priroda prochnosti i deformacionnye osobennosti mela i nekotoryh melovyh porod]. M.: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1962. 486 p. (rus)
5. Mambish S.E. Mineral fillers in plastics industry [Mineral'nye napolniteli v promyshlennosti plastmass]. Plastic masses. 2007. No. 12. Pp. 3–5. (rus)
6. Paus K.F., Evtushenko I.S. Chemistry and chalk technology [Himiya i tekhnologiya mela]. M.: Stroyzdat, 1977. 138 p. (rus)
7. Xantos M., Per with English. Ed. Kulsezneva V.N. Functional fillers for plastics [Funkcional'nye napolniteli dlya plastmass]. St. Petersburg: Scientific Basics and Technologies, 2010. 462 p. (rus)
8. Petrov I., Seidov A.Sh. Analysis of Calcium Carbonate Commodity Markets [Analiz tovarnyh rynkov karbonata kal'ciya]. M.: Abercode., 2005. 180 p. (rus)
9. Katz G.S., Milevski D.V. Fillers for polymer composite materials [Napolniteli dlya polimernyh kompozicionnyh materialov]. M.: Chemistry, 1981. 736 p. (rus)
10. Petrov I.M. Overview of the calcium carbonate carbonate market in the CIS countries [Obzor rynka karbonata kal'ciya prirodnoho tonkodispersnogo v stranah SNG]. Infomine Research Group, 2010. 179 p. (rus)
11. Rouquerol J., Avnir D., Fairbridge C.W., Everett D.H., Haynes J.M., Pernicone N., Ramsay J.D.F, Sing K.S.W., Unger K.K. Pure and Applied Chemistry, 1994. Vol. 66, Issue 8. Pp. 1739–1758.
12. Greg S., Sing K. Adsorption, specific surface area, porosity [Adsorbciya, udel'naya poverhnost', poristost']. Per. from English 2nd ed. M.: Mir, 1984. 306 p. (rus)

*Information about the authors*

**Vezentsev, Alexander I.** Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of General Chemistry of the Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology. E-mail: [vesentsev@bsu.edu.ru](mailto:vesentsev@bsu.edu.ru). Belgorod State National Research University. Russia, 308015, Belgorod, str. Pobedy, 85.

**Krivenko, Yulia Yu.** Master's student of the Department of General Chemistry of the Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology. E-mail: [yulya.kilanova20@gmail.com](mailto:yulya.kilanova20@gmail.com). Belgorod State National Research University. Russia, 308015, Belgorod, str. Pobedy, 85.

---

*Received 02.05.2021*

**Для цитирования:**

Везенцев А.И., Кривенко Ю.Ю. Гидрофобизация тонкодисперсного мела // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 6. С. 63–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-63-70

**For citation:**

Vezentsev A.I., Krivenko Yu.Yu. Hydrophobization of fine chalk. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 6. Pp. 63–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-63-70

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-71-79

*\*Тихонов А.А., Польшин А.А., Любимый Н.С., Герасимов М.Д.*

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*\*E-mail: cherep2240@rambler.ru*

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗГРУЗКИ КОВШЕЙ ЭЛЕВАТОРА

**Аннотация.** Целью статьи является анализ исследований, результаты которых используются при расчетах элеваторов с умеренными скоростными режимами, для выяснения пригодности их отдельных положений для разработки параметров центробежной разгрузки скоростных элеваторов. Значительный интерес представляют труды, посвященные непосредственно или косвенно исследованию работы скоростных элеваторов, результаты которых не получили достойной трактовки и развития. В связи с тем, что эффективность работы скоростных элеваторов определяется не только качеством центробежной разгрузки, но и работой ленточно-барабанного механизма без пробуксовки, возникает необходимость анализа исследований, направленных на решение этой проблемы. В статье приведены известные решения для определения параметров центробежной разгрузки, которые базируются на различных гипотезах движения частиц материала внутри ковша. Изучены физико-механические явления, которые влияют на движения частиц материала в ковше элеватора, выявлены преимущества и недостатки каждой гипотезы. Теоретическое исследование процесса центробежной разгрузки осложняется тем, что при движении и выходе материала из ковша мы имеем дело с неустойчивым движением сыпучего материала под действием изменяющейся системы сил: сил притяжения, центробежной и кориолисовой сил, силы трения. Между тем, как известно, даже самые простые случаи движения материала при гравитационном или смешанном режиме разгрузки трудно поддаются теоретическому анализу. В связи с этим, были установлены зависимости и методы построения траекторий движения материала, а также актуальность использования того или иного уравнения.

**Ключевые слова:** центробежная разгрузка, ковшовый элеватор, траектория движения, относительная скорость, норья, угол метания.

Данная статья актуальна для отрасли сельского хозяйства. Увеличение урожайности, зерновых культур является одним из главных направлений в сельском хозяйстве. Именно зерна, всё более уязвимы к механическому воздействию, при неоднократной перегрузке посевных материалов возникает травмирование значительной части зерна, что приводит к его последующим невсходам. Исходя из этого фактора, вопрос расчета параметров элеватора является важной и актуальной задачей, позволяющей на основе адекватных математических моделей оптимизировать конструкционные и технологические параметры элеватора по критерию минимального травмирования зерна.

Основным фактором, определяющим параметры ленточного барабанного механизма норрии, является процесс разгрузки ковшей и связанный с ним характер свободного движения зернового потока в головке, от которых зависят производительность и качество перегрузки зерна. Как правило, высокопроизводительные элева-

торы с большой скоростью движения ленты работают в режиме центробежной разгрузки ковшей, который наименее изучен в связи со сложностью физико-механического процесса.

Элеватор – это машина непрерывного действия, представляющая собой вертикальный ленточный (в некоторых случаях цепной) конвейер, предназначенный для перемещения насыпных и штучных грузов под углом, как правило, 60–82 °. Основными параметрами являются мощность на приводном валу элеватора, мощность двигателя, частота вращения приводного вала элеватора, передаточное число между валом двигателя и приводным валом элеватора. Так же важнейшим параметром является процесс разгрузки, в котором большое внимание уделяется травмированию материала о стенки корпуса элеватора. Процесс разгрузки сыпучего материала состоит из двух взаимосвязанных этапов: первый - это движение материала внутри ковша с дальнейшим выбросом, второй - свободный полет зерна в головке норрии по траектории, параметры которой зависят от



скорости и угла метания зерна. Данные параметры малоизучены, хотя очень актуальны, есть гипотезы различных ученых, которые вели разработки о теории движения частиц внутри элеватора, но каждая гипотеза разнится с другой и не учитывает того или иного фактора. Поэтому нужно провести анализ теоретических закономерностей расчета элеваторов, выявить преимущества и недостатки каждой методики, с целью создания расчетной базы для построения новых математических закономерностей, которые позволят создать теоретические основы расчета скоростных элеваторов, с учетом тех критериев и параметров, которые раньше учтены не были.

**Основная часть.** Начало разработки теории ковшовых элеваторов было положено работой А.В. Сикерина [10]. В основу была положена гипотеза о том, что при выбросе материала из ковша частицы должны двигаться вдоль нижней или верхней стенки в зависимости от кинематического режима. Были составлены и рассмотрены уравнения движения частицы материала по внутренней стенке ковша, выяснено существенное влияние кориолисового ускорения на сброс частицы [6].

Развивая идею А.В. Сикерина о движении частицы материала по плоской стенке ковша с учетом силы Кориолиса, профессор П.С. Козьмин составил и дал решение дифференциального уравнения движения частицы материала по внешней кромке ковша, которое дает зависимость между пройденной частицей по стенке путем  $S$  и углом поворота перпендикуляра, проведенного из центра вращения на линию плоскости прямолинейной стенки ковша, определяющего положение ковша [11]. Решение дано в виде отношения  $S/h$  ( $h$  - расстояние полюса), которое выражается громоздким сочетанием показательных и тригонометрических функций углов поворота  $\omega t$  и угла трения  $\rho$ . П.С. Козьмин построил ряд графиков, позволяющих получить приближенные выражения.

В дальнейшем Н.К. Фадеевым [19] было сделано предположение, что влияние сил трения при движении частиц по стенкам незначительно, так как составляющие силы инерции и силы тяжести действуют в разные стороны и разница их невелика, а кориолисовая сила мала. В связи с этим Н.К. Фадеев считает, что выражение для  $S/h$  может быть упрощено, принимая  $\rho = 0$ . Анализ решений А.В. Сикерина и П.С. Козьмина, проведенный Н.К. Фадеевым, показал, что движение частиц по внешней стенке при угле поворота менее  $90^\circ$  невозможен, поскольку не выполняется условие отсутствия отрыва частиц от стенки. При этом установлено, что длина верхней стенки

ковша  $l = s$ , не должна превышать величину  $l = 0,4 \cdot r_B$ , где  $r_B$  - радиус барабана.

Для того, чтобы частица прошла путь  $l = 0,4 \cdot r_B$ , ковш должен повернуться от вертикальной оси на угол:

$$\varphi = \omega t \approx 110 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,4 \cdot r_B}{r_B}}, \quad (1)$$

Из формулы получаем  $\varphi \approx 81^\circ$ . Практические расчеты показывают, что этот угол больше, чем  $90 - \varphi_n$ , ( $\varphi_n$  - начальный угол движения), а, следовательно, материал не попадает в отводной рукав (лоток) элеватора. Поэтому для полного отсутствия обратной сыпи в холостую ветвь элеватора длина передней стенки не может быть больше, чем  $0,25 \cdot r_B$ . В связи с этим для высокоскоростных зерновых норий-элеваторов рекомендуется применять достаточно большие диаметры барабанов при относительно малых размерах ковшей, как и осуществлялось в нориях старых конструкций [3].

Н.К. Фадеев также отмечает, что эти зависимости нельзя использовать для анализа движения материала, который не лежит на стенках ковша, так как истинное направление движения частиц в ковше практически не известно. Н.К. Фадеев предполагает, что выход материала из ковша происходит в результате отрыва частиц от поверхности, образованной разделительной линией РА (рис. 1), соединяющей полюс Р с точкой А на кромке верхней стенки ковша. Такое направление движения материала в ковше не было подтверждено дальнейшими наблюдениями [5].

Профессор П.С. Козьмин предложил также метод построения траекторий, движение частицы в головке элеватора, полагая, что координаты точек параболической траектории можно определить с помощью уравнений:

$$x = \vartheta \cdot t; y = \frac{g \cdot t^2}{2}. \quad (2)$$

Координата  $x$  откладывается вдоль касательной, проведенной в любой точке на окружности радиуса внешней кромки ковша  $R_k$  [2]. Точки на касательной выходят соответственно для времени  $t$ , которое последовательно принимается в долях секунды порядка 0,1; 0,2; 0,3 и т.д. Из каждой точки на касательной, перпендикулярно к горизонтальной плоскости откладываются отрезки равные  $y$ . Соединяя концы отрезков плавной кривой, получаем параболическую траекторию движения частицы с началом в точке касания.

На рис. 2 приведена схема построения траекторий и формы головки по методу П.С. Козьмина для центробежно-гравитационной разгрузки [12].

Такой метод построения траекторий является приближенным, поскольку скорость метания  $\vartheta$  принимается равной переносной  $\vartheta_n$ , то есть

окружной скорости ленты. На самом деле при сочетании вращательного и поступательного движений абсолютная скорость метания будет определяться геометрической суммой переносной  $v_n$  и относительной  $v_s$  скоростей движения частицы при выбросе из ковша [4]. Величина и направление вектора абсолютной скорости будет зависеть от величины и направления вектора относительной скорости. Это обстоятельство учел Н.К. Фа-

деев, полагая, что относительной скоростью является скорость движения частицы вдоль верхней кромки ковша, и которую приближенно можно определить по зависимости:

$$v_s = v \frac{3S}{r_b \omega t}, \tag{3}$$

где  $S$  – пройденный до сброса путь,  $\omega t$  – угол поворота ковша за время движения частицы,  $v$  – скорость ленты.

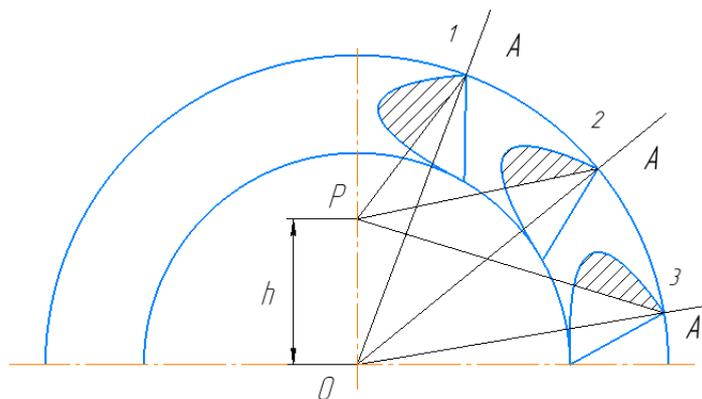


Рис. 1. Предельное положение поверхности материала по плоскости РА:  $h$  – высота полюса;  $P$  – полюс;  $A$  – кромки ковша

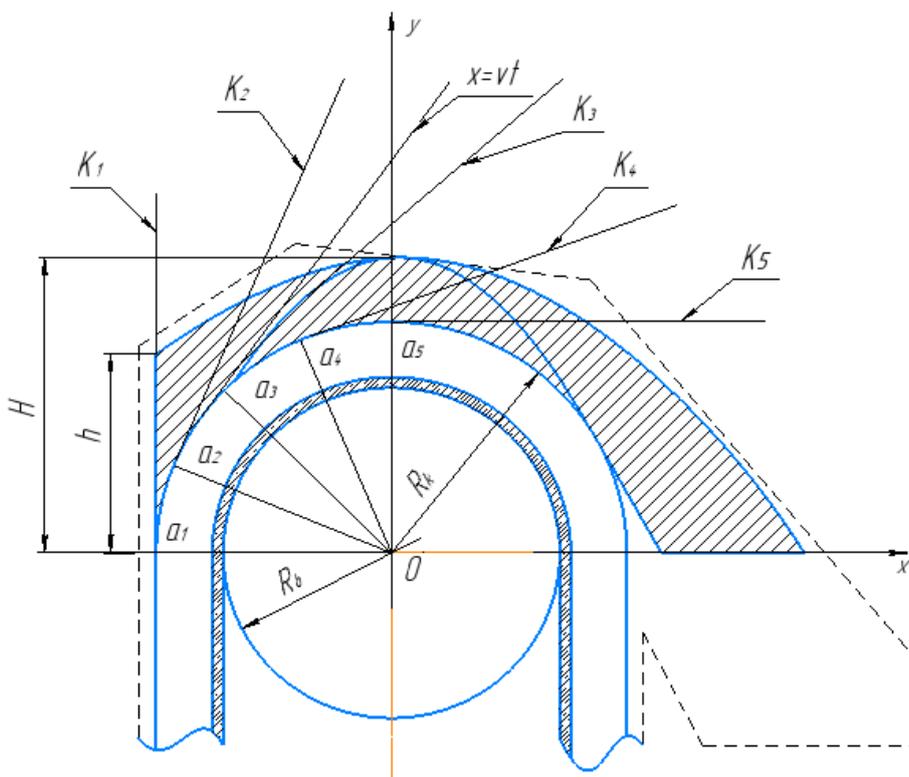


Рис. 2. Схема построения траекторий и формы огибающей головки по методу П.С. Козьмина:  $R_b$  – радиус барабана;  $R_k$  – радиус внешней кромки;  $a_1 - a_6$  – точки построения с шагом в  $30^\circ$ ;  $K_1 - K_6$  - касательные траектории;  $H$  - высота параболы;  $h$  – высота полюса;  $x = vt$  – уравнение движения зерна

Предварительный анализ показывает, что этот способ определения относительной скорости представляет большие трудности, поскольку требует громоздких вычислений. Кроме того, в этом случае вектор относительной скорости направлен в сторону движения ковша и,

следовательно, скорость метания будет больше переносной [7]. Величину абсолютной скорости можно определить только путем геометрических построений.

В работе [16] рассмотрен процесс разгрузки ковшей без дна, что входят друг в друга и

имеющие специфическую прямолинейную форму (рис. 3). В процессе исследования принято, что материал скользит вдоль верхней прямолинейной стенки ковша и вектор относительной скорости направлен вдоль этой стенки. В этом случае вектор относительной скорости направлен под углом к радиусу ковша и отклонен в сторону его движения. Для центробежной разгрузки получено следующее значение относительной скорости:

$$v_r = \omega \sqrt{(r + A)^2 - \frac{(r+A)\cos^2(\alpha-\varphi)}{\cos^2(\alpha-\varphi-\gamma)}}, \quad (4)$$

где  $A$  – вылет ковша,  $\alpha$  – угол поргузки ковша,  $\gamma = 180/n$  – угол, образованный радиусами  $r_0$  и  $r_i$  ( $n$  – число ковшей на длине  $\pi \cdot r$ ),  $\varphi$  – угол трения. Согласно формулы скорость  $v_r$  увеличивается с увеличением углов  $\alpha$  и  $\gamma$  и уменьшается с увеличением угла трения (коэффициента трения). Абсолютная скорость выброса  $v_a$  больше переносной скорости  $v_e$  и согласно геометрической схеме увеличивается с увеличением относительной скорости  $v_r$  [8].

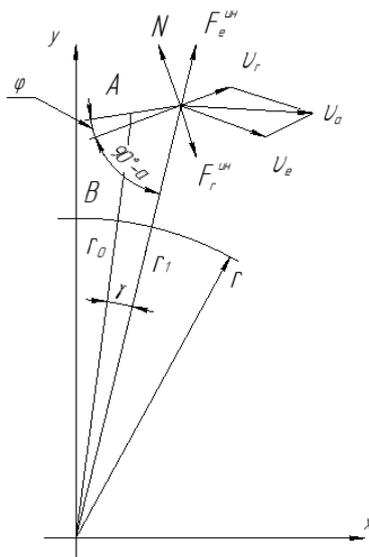


Рис. 3. Схема к определению относительной скорости перемещения материала при центробежной разгрузке ковша:  $A$  – вылет ковша;  $\varphi$  – угол трения;  $\gamma$  – угол между  $r_0$  и  $r_1$ ;  $v_a$  – абсолютная скорость выброса;  $v_e$  – переносная скорость;  $v_r$  – относительная скорость;  $F_e^{UH}$  и  $F_r^{UH}$  – силы инерции

С учетом значений  $v_r$ , построены траектории свободного полета частиц материала в головке норрии по методике П.С. Козьмина, а также нанесены верхняя и нижняя границы в виде кривых, полученных с помощью

скоростной киносъемки (рис. 4). Исследование проведено при кинематическом режиме с показателем  $p = 0,425$  ( $v_n = 2,4$  м/с,  $D_B = 0,5$  м) [18].

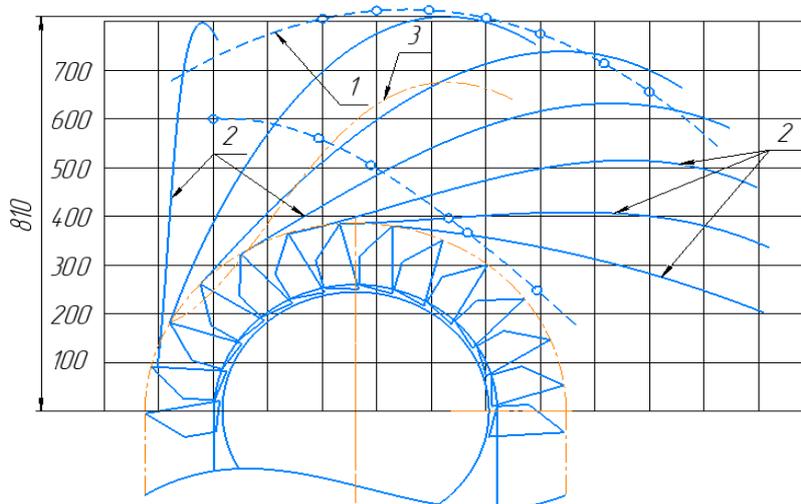


Рис. 4. Траектории движения частиц, определяющие движение головки: 1 – верхний предел траектории полета частиц, полученный скоростной киносъемкой; 2 – сумма кривых, полученных путем построения с учетом трения частиц о стенку ковша; 3 – верхний предел кривых, построенных без учета трения; 4 – нижний предел траекторий полета частиц, полученный скоростной киносъемкой

Как видно из рис. 4, построенные расчетные траектории движения частиц с учетом их трения о стенку ковша, так и без учета трения абсолютно не вписываются в реальные криволинейные границы потока, определенные с помощью скоростной киносъемки, однако Н.К. Фадеев не дает по этому поводу никаких объяснений. На самом деле траектории построены по неправильно определенному значению (как по величине, так и по направлению) относительной и абсолютной скорости. Значение относительной скорости  $v_r$  по формуле (4) не зависит от угла поворота ковша и при движении ковша по кругу является величиной постоянной, в то время, как будет показано далее, реально она увеличивается от нуля до максимума при угле поворота ковша в пределах  $0 \div 180^\circ$ . Вектор относительной скорости движения частиц будет направлен по отношению к радиусу ковша в сторону, противоположную направлению вращения, и, соответственно, величина абсолютной скорости и направление ее вектора будут другими, при этом величина абсолютной скорости  $v_a$  не будет большей, чем величина переносной  $v_e$  [9]. Вследствие этого траектории полета частиц будут короче и более кривыми, что и зафиксировала скоростная киносъемка.

Применение больших скоростей на элеваторных нориях исследовались Г.И. Креймерманом с сотрудниками "Союзпродмашины" [17]. Ставилась задача выяснить возможность повышения

производительности нории путем повышения скорости рабочих органов. Лимитом скорости служило одно из следующих условий: заметное разрушение зерна; обратная сыпь в нисходящую ветвь (не более 1,5...2 %); появление сыпа зерна на восходящей ветке; усложнение конструкции, главным образом, головки. Испытания проводились на скоростях 2,3; 3,68; 4,86 и 6,2 м/с для шести типов ковшей различной емкости и конструкции. В качестве положительных результатов можно отметить следующее: вопреки бытующему мнению о том, что с увеличением скорости без соответствующего увеличения диаметра барабана объем обратной сыпи будет увеличиваться [1], была совершенно четко выявлена тенденция к снижению обратной сыпи при увеличении скорости ленты. Почти полное выбрасывание было получено даже при малом диаметре барабана (500 мм) при принудительном движении зерна с низким криволинейным сводом головки в виде изогнутого железного листа, при достаточно высокой скорости ленты 3,68 м/с (рис. 5). Коэффициент заполнения ковша практически не влияет на выбрасывание зерна и обратную сыпь, но влияет на прямую сыпь (сыпь в восходящую ветвь нории). При подъеме уровень естественного откоса зерна в ковше не должен превышать  $5^\circ$  что и определяет необходимые параметры ковша [20].

Испытания проводились для пшеницы и овса, влажность зернового материала не указывалась.

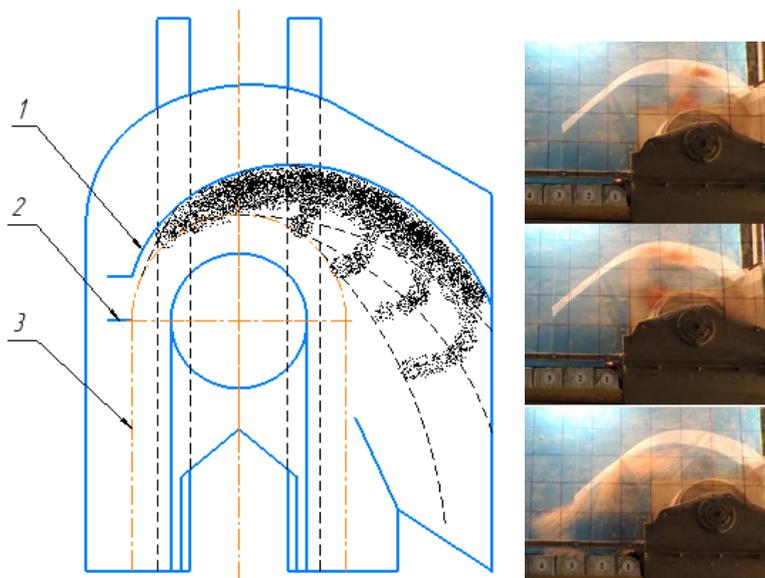


Рис. 5. Траектории движения зерна при принудительной разгрузке: 1 – железный кожух; 2 – лоток для сыпи; 3 – лента

Через специальные прозрачные стенки головки киносъемкой был зафиксирован характер траекторий выброса зерна в относительном движении и предполагаемые

траектории движения частиц в потоке зернового материала [20]. Полученные данные наглядно показывают, что относительное движение частиц не происходит вдоль стенки ковша, а под

действием центробежной силы выбрасывается вверх по криволинейной траектории, выпуклость которой направлена в сторону движения ковша. На рис. 5 четко видно, что относительная скорость выброса увеличивается от нуля до максимума при повороте ковша в пределах 0–180°. При такой траектории вектор относительной скорости будет отклоняться в сторону, противоположную направлению движения ковша, что существенно повлияет на величину и направление вектора абсолютной скорости метания [15]. К сожалению, Г.И. Креймерманом допущены ошибки в данных о количестве обратной сыпи при различных кинематических режимах и при различных типах испытуемых ковшей. Особый интерес вызывают данные о количестве сыпи в начале разгрузки (сыпь №2). Сыпь №1 измерялась в нижней части нисходящей ветви (в холостой трубе). Г.И. Креймерман подчеркивает особую положительную роль ограничительного свода головки. Однако предлагаемые им контуры головок, построенных на основе траекторий по методу П.С. Козьмина без учета относительной скорости, являются громоздкими и их параметры не соответствуют параметрам современных головок ведущих зарубежных производителей. Наиболее ценным материалом для изучения процесса движения зернового материала в ковше при выбрасывании являются результаты исследования, проведенного П.П. Артемьевым и приведенные в источнике [13]. Траектории, полученные П.П. Артемьевым с помощью скоростной киносъемки при отсутствии ограничительного свода головки, по характеру совпадают с траекториями, приведенными в работе [14], однако ценность заключается в том, что они получены для конкретных кинематических режимов.

Эlevator, работающий в режиме центробежной нагрузки, является метательной машиной. Поэтому построение параболических траекторий свободного полета зерна в головке нории в прямоугольных координатах с началом координат в точке вылета можно проводить по уравнению без учета сопротивления воздуха:

$$y = x \cdot tg\alpha_0 - \frac{g \cdot x^2}{2 \cdot v_0^2 \cdot \cos^2 \alpha_0}, \quad (5)$$

где  $x$  и  $y$  – горизонтальные и вертикальные координаты частицы,  $\alpha_0$  – угол наклона к горизонту касательной к траектории в начале полета, то есть угол вылета частицы,  $v_0$  – начальная скорость вылета (скорость метания).

**Выводы.** Были проанализированы методики отечественных и зарубежных ученых по расчету параметров движения частиц в головке элева-

тора-нории. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных показало, что выражения профессора П.С. Козьмина определения относительной скорости представляет большие трудности, поскольку требует громоздких вычислений и не могут быть применены в качестве зависимости в расчетной модели движения зерна в головке элеватора. Наиболее достоверной является методика П.П. Артемьева полученная с помощью скоростной киносъемки, хотя она не учитывает сопротивление воздуха. Данная модель позволяет построить траектории движения частицы в головке элеватора и может быть применена для расчета конструкции элеватора высокой производительности.

При выборе той или иной методики расчета параметров движения частиц в элеваторе следует учитывать влияние сопутствующего воздушного потока, а также то обстоятельство, что при движении частицы в потоке она встречает меньшее сопротивление, чем при одиночном движении тела. Окончательный выбор можно сделать при построении нескольких контрольных траекторий и оценить влияние сопротивления воздуха, и установить наиболее неблагоприятный характер траектории при ударе частицы о свода головки.

**Источник финансирования.** Гранта президента Российской Федерации № МК-4006.2021.4.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романович А.А. Энергосбережение при производстве строительных изделий // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2011. № 3. С. 69–71.
2. Романович А.А., Воробьев Н.Д., Апухтин И.В. Определение усилия уплотнения материалов в валковом устройстве // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 7. С. 107–111.
3. Герасимов М.Д., Любимый Н.С., Рязанцев В.Г. Методика проектирования вибропогружателей с асимметричными колебаниями // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 5. С. 135–142
4. Герасимов М.Д., Любимый Н.С. Технологические комплексы для производства дорожно-строительных материалов и работ: учебное пособие. Белгород. Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. С 25.
5. Герасимов М.Д. Способ получения направленных механических колебаний для практического применения в технологических процессах // Строительные и дорожные машины. 2014. №1. С. 35–38.
6. Шатохин И.В. Снижение травмирования зерна в нории // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2004. №2. С. 36–40.

7. Шатохин И.В. Совершенствование конструкции ковшового элеватора // Техника в сельском хозяйстве. 2004. №4. С. 38–43.
8. Тихонов А.А., Бабкин М.С. Анализ теорий движения частиц внутри ковшовых элеваторов // Синергия наук. 2020. № 54. С. 857–862.
9. Юдаев Н.В. Элеваторы, склады, зерносушилки. М.: ГИОРД. 2008. 178 с.
10. Демиденко А.И., Летопольский А.Б., Семкин Д.С. Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины. Омск: Изд-во СиБАДИ. 2016. 264 с.
11. Рачков Е.В. Машины непрерывного транспорта. Алтайр: Изд-во МГАВТ. 2014. 145 с.
12. Ромакин Н.Е. Конструкция и расчет конвейеров. М.: ООО "ТНТ", 2012. 214 с.
13. Моряков О.С. Оборудование машиностроительного производства. М.: Изд-во Академия 2009. 86 с.
14. Гололобов Д.Ю., Союнов А.С., Кулаева А.Г., Кузьмин Д.Е. Анализ травмирования зерна в загрузочной части норрии // Сборник международной научно-исследовательской конференции, посвященной 70-летию создания факультета ТС в АПК (МЕХ ФАК). 2020. С. 84–87.
15. Турушин В.А. Машины промышленного транспорта непрерывного действия: учебное пособие. Луганск: Изд-во СЧУ им. В. Даля. 2009. 68 с.
16. Шатохин И.В., Щедрина Д.И., Пименов В.Б. Использование зерновых ковшовых элеваторов для транспортировки семян трав // Вестник воронежского государственного аграрного университета им. Императора Петра I. 2013. №1. С. 83–85.
17. Рогатинская О.Р. Исследование процесса транспортировки сыпучего груза наклонными винтовыми конвейерами // Вестник Тернопольского национального технического университета им. И. Пулюя. 2015. № 3. С. 137–143
18. Романеев Н.А., Варывдин В.В., Безик Д.А. Расчет напряженного состояния опоры норрии методом автоматизированного проектирования машин // Природообустройство. 2016. № 3. С. 86–91
19. Московский М.Н., Адамян Г.А., Бабенко О.С. Модернизация зерновых норрий в семяочистительных агрегатах // Естественные и технические науки. 2018. № 11 (125). С. 318–320.
20. Савиных П.А., Сычугов Ю.В., Казаков В.А. Перспективные технологии и технические средства для обработки зерна // Техника и оборудование для села. 2020. С. 22–26.

#### Информация об авторах

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

**Польшин Андрей Александрович**, инженер. E-mail: info@polshin.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

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

**Герасимов Михаил Дмитриевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин; руководитель учебно-научно-исследовательской лаборатории «Инновационные вибрационные машины и оборудование». E-mail: mail\_mihail@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Поступила 30.03.2021 г.

© Тихонов А.А., Польшин А.А., Любимый Н.С., Герасимов М.Д., 2021

**\*Tikhonov A.A., Polshin A.A., Lyubimy N.S., Gerasimov M.D.**

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

*\*E-mail: cherep2240@rambler.ru*

## ANALYTICAL STUDY OF THE UNLOADING PROCESS OF ELEVATOR BUCKETS

**Abstract.** The purpose of the article is to analyze the main results of the works that are used in the calculations of elevators with moderate speed modes, to clarify the suitability of their individual positions for developing the parameters of centrifugal unloading of high-speed elevators. Works devoted to the study of the

*operation of high-speed elevators, the results of which have not received a decent interpretation and development, are of considerable interest. As the efficiency of high-speed elevators is determined by the quality of centrifugal unloading and by the operation of the belt-drum mechanism without slipping, there is a need to analyze the work aimed at solving this problem. The paper presents known solutions for determining the parameters of centrifugal unloading, which are based on various hypotheses of the movement of material particles inside the bucket. The physical and mechanical phenomena that affect the movement of material particles in the elevator bucket are studied. The advantages and disadvantages of each hypothesis are revealed. The theoretical study of the process of centrifugal unloading is complicated by the fact that during the movement and exit of the material from the bucket, there is an unstable movement of the bulk material under the influence of a changing system of forces: the forces of attraction, centrifugal and coriolis forces, and the friction force. Meanwhile, even the simplest cases of material motion under a gravitational or mixed discharge regime are difficult to analyze theoretically. In this regard, the dependencies and methods of constructing the trajectories of the material movement are established, as well as the relevance of using a particular equation.*

**Keywords:** centrifugal unloading, bucket elevator, trajectory, relative speed, noria, throwing angle.

## REFERENCES

1. Romanovich A.A. Energy saving in the production of construction products [Energoberezhenie pri proizvodstve stroitel'nykh izdeliy]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2011. No. 3. Pp. 69–71. (rus)
2. Romanovich A.A., Vorob'ev N.D., Apukhtin I.V. Determination of the compaction force of materials in a roll device [Opredelenie usiliya uplotneniya materialov v valkovom ustroystve]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 7. Pp. 107–111. (rus)
3. Gerasimov M.D., Lyubimiy N. S., Riazantsev V.G. Technique for designing vibrators with asymmetric vibrations [Metodika proektirovaniya vibropogruzhatel'ey s asimmetrichnymi kolebaniyami]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 5. Pp. 135–142. (rus)
4. Gerasimov M.D., Favorite N.S. Technological complexes for the production of road-building materials and works [Tekhnologicheskie komplekсы dlya proizvodstva dorozhno-stroitel'nykh materialov i rabot]. Belgorod. BSTU V.G. Shukhov. 2020. 25 p. (rus)
5. Gerasimov M.D. Method of obtaining directional mechanical vibrations for practical application in technological processes [Sposob polucheniya napravlennykh mekhanicheskikh kolebaniy dlya prakticheskogo primeneniya v tekhnologicheskikh protsessakh]. Construction and road machines. 2014. No. 1. Pp. 35–38. (rus)
6. Shatokhin I.V. Reduction of grain trauma in the bucket elevator [Snizhenie travmirovaniya zerna v norii]. Tractors and agricultural machines. 2004. No. 2. Pp. 36–40. (rus)
7. Shatokhin I. V. Improving the design of the bucket elevator [Sovershenstvovanie konstruksii kovshovogo elevatora]. Technics in agriculture. 2004. No. 4. Pp. 38–43. (rus)
8. Tihonov A.A. Babkin M.S. Particle theory analysis inside bucket elevators [Analiz teorij dvizheniya chastic vnutri kovshovykh elevatorov]. Synergy of Sciences. 2020. No. 54. Pp. 857–862. (rus)
9. Yudaev N.V. Elevators, warehouses, grain dryers [Elevatory, sklady, zernosushilki]. M.: GIOR, 2008. 178 p. (rus)
10. Demidenko A.I., Letopolsky A.B., Semkin D. S. Road, construction and lifting and transport machines [Dorozhnye, stroitel'nye i pod'emno-transportnye mashiny]. Omsk: SibADI Publishing House, 2016. 264 p. (rus)
11. Rachkov E.V. Machines of continuous transport [Mashiny nepreryvnogo transporta]. Altair: MGAVT Publishing House, 2014, 145 p. (rus)
12. Romakin N.E. Conveyor design and calculation [Konstruktsiya i raschet konveyerov]. M.: OOO "TNT", 2012. 214 p. (rus)
13. Moryakov O.S. Equipment of machine-building production [Oborudovanie mashinostroitel'nogo proizvodstva]. M.: Academy. 2009 p. (rus)
14. Gololobov D.Yu., Soyunov A.S., Kulaeva A.G. Kuzmin D.E. Analysis of grain injury in the loading part of the noria [Analiz travmirovaniya zerna v zagruzochnoy chasti norii]. Collection of the international research conference dedicated to the 70th anniversary of the creation of the Faculty of Technical Cooperation in Agriculture (MEKH FAK). 2020. Pp. 84–87. (rus)
15. Turushin V.A. Machines of industrial transport of continuous action. [Mashiny promyshlennogo transporta nepreryvnogo deystviya]. Lugansk: Publishing house of SNU V. Dahl. 2009. 68 p. (rus)
16. Shatokhin I.V., Shchedrina D.I., Pimenov V.B. The use of grain bucket elevators for transporting grass seeds [Ispol'zovanie zernovykh kovshovykh elevatorov dlya transportirovki semyan trav]. Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta im. Emperor Peter I. 2013. No. 1. Pp. 83–85. (rus)
17. Rogatinskaya O.R. Research of the process of transportation of bulk cargo by inclined screw conveyors [Issledovanie protsessa transportirovki

syuchego gruzha naklonnymi vintovymi konveyerami]. Bulletin of the Ternopil National Technical University named after I. Pulyuya. 2015. No. 3. Pp. 137–143 (rus)

18. Romaneev N.A., Varyvdin V.V., Bezik D. A. Calculation of the stress state of the norii support by the method of computer-aided design of machines [Raschet napryazhennogo sostoyaniya opory norii metodom avtomatizirovannogo proektirovaniya mashin]. Nature management. 2016. No. 3. Pp. 86–91. (rus)

19. Moskovsky M.N., Adamyan G.A., Babenko O.S. Modernization of grain burrows in seed-cleaning aggregates [Modernizatsiya zernovykh noriy v semyaochistitel'nykh agregatakh]. Natural and Technical Sciences. 2018. No. 11 (125). Pp. 318–320. (rus)

20. Chantsev V.F. Methodology for determining the coefficients of friction between the conveyor belt and the drive drum [Metodika opredeleniya koeffitsientov treniya mezhdu transportnoy lentoy i privodnym barabanom]. Problems of theory and design of construction machines. KISS. Publishing house of Lviv University. 1964. Pp. 146–151. (rus)

#### *Information about the authors*

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

**Polshin, Andrey A.** Engineer. E-mail: info@polshin.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

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

**Gerasimov, Mikhail D.** PhD, Assistant professor. E-mail: mail\_mihail@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, ul. Kostyukova, 46.

---

*Received 30.03.2021*

#### **Для цитирования:**

Тихонов А.А., Польшин А.А., Любимый Н.С., Герасимов М.Д. Аналитическое исследование процесса разгрузки ковшей элеватора // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 6. С. 70–79. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-70-79

#### **For citation:**

Tikhonov A.A., Polshin A.A., Lyubimy N.S., Gerasimov M.D. Analytical study of the unloading process of elevator buckets. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 6. Pp. 70–79. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-70-79



DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-80-86

**Голдобина В.Г.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: goldobina.valentina@gmail.com

## ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ КОМБИНИРОВАННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

**Аннотация.** В промышленности строительных материалов, цементной, порошковой металлургии применяется различное крупногабаритное оборудование для помола сырья. Такое оборудование при эксплуатации подвергается внешним воздействиям, особенно в местах стыка, снижающим надежность узлов, что приводит к досрочной замене изнашиваемых деталей. Крупные узлы помольных мельниц соединяются фланцами. Крепятся фланцы болтами, часть из которых должны быть прецизионными, так как они воспринимают нагрузку оборудования и обеспечивают герметичность соединения. Отверстия под прецизионные болты соответственно должны быть точными и качественными. Приводится исследование обработки отверстий зенкером-разверткой. У инструмента режущие элементы, в виде многогранных пластин, на корпусе крепятся механически, что дает возможность при износе или поломке быстро заменить пластину. Такой сборный комбинированный режущий инструмент позволяет выполнить зенкерование и развертывание в одну операцию и тем самым сократить время обработки одного отверстия и в целом всех прецизионных отверстий во фланцах ремонтируемой мельницы. Выведена зависимость точности прецизионного отверстия по форме и пространственному отклонению от режимов резания обработки при использовании комбинированного инструмента. Зависимость установлена для обработки с использованием переносного устройства с выдвижным шпинделем, как наиболее применяемое оборудование при ремонте. Представленная зависимость позволяет спрогнозировать точность обработки отверстий комбинированным инструментом с учетом жесткости технологической системы и рассчитать требуемую точность развертки.

**Ключевые слова:** отверстия, мельницы, фланцы, прецизионные отверстия, комбинированный инструмент.

**Введение.** Крупногабаритное оборудование за период эксплуатации подвергается различным видам ремонта, связанным с заменой изношенных или поломанных узлов или деталей. Помольные мельницы, применяемые для производства цемента, работают по непрерывному циклу. Поэтому сроки ремонта, при котором мельница останавливается, отражаются на объеме выпуска цемента. Для сокращения времени простоев, связанных с ремонтом крупногабаритного оборудования, ведутся изыскания технологий и соответствующих средств для ремонта. К таким технологиям относится обработка без демонтажа оборудования или по месту монтажа заменяющего узла с использованием нестационарных средств механизации ремонтных работ таких, как переносные, накладные и приставные устройства или станки [1, 2]. Вращающиеся части помольных мельниц соединяются фланцами, которые скрепляются болтами, половина или третья часть которых приходится на прецизионные болты. На срез работают только прецизионные болты, так как на них приходится вся нагрузка, воспринимаемая при работе оборудованием [2, 3]. Во фланцах под прецизионные болты, соответственно, должны быть обработаны прецизионные отверстия. Для обеспечения прочности и устойчивости фланцевых соединений крышек с корпусом помольных

мельниц на прецизионные отверстия устанавливаются повышенными требованиями по точности формы, шероховатости поверхности и пространственным отклонениям [3, 4]. Прецизионные отверстия во фланцевых соединениях помольных мельниц на цементных предприятиях при ремонте обрабатывают с применением переносных станков или устройств, или даже вручную [4, 5]. Переносной сверлильный станок удобен в эксплуатации, так как имеет узел крепления, с помощью которого он устанавливается на фланцы с фиксированием на обрабатываемое отверстие и крепится [6]. Переносное устройство узла крепления не имеет и его необходимо проектировать и изготавливать на самом заводе [4].

В данной работе рассматривается технология совместной обработки прецизионных отверстий во фланцевых соединениях помольных мельниц зенкером-разверткой с применением переносного станка. В работе использованы исследования, которые проводились на различных цементных заводах, связанные с обеспечением точности обработки отверстий во фланцах мельниц. На одних предприятиях применялась отдельная технология обработки отверстий с использованием стационарных станков, на других использовалась совместная обработка отверстий по месту

монтажа с применением переносных устройств [4].

**Методология.** Совмещение осей отверстий в соединяемых фланцах является одним из основных требований прецизионных отверстий. Это требование обеспечивается совместной обработкой отверстий с использованием переносных станков или устройств. Обработка прецизионных отверстий выполняется за несколько переходов: сначала сверление отверстия в сплошном металле, затем зенкерование и, если точность высокая, то выполняется развертывание [4]. Каждый переход связан с заменой режущего инструмента, для чего он выводится из зоны резания на расстояние, позволяющее извлечь инструмент из шпинделя сверлильной головки. После установки нового инструмента в шпиндель сверлильная головка перемещается в направлении зоны резания. Таким образом, многопереходная обработка, связанная с заменой режущего инструмента, влияет на трудоемкость обработки, связанную со вспомогательным временем, затрачиваемым на отвод, смену и подвод в зону резания инструмента. Обработка отверстий комбинированным инструментом – зенкером-разверткой позволяет сокращать и основное время, так как одновременно выполняется зенкерование и развертывание, а также время на обработку всех отверстий во фланцевых соединениях в целом.

Обработка прецизионных отверстий после сверления зенкером-разверткой позволяет обеспечить точность отверстий и сократить время на обработку – оперативное и в целом за весь период обработки всех отверстий в одном фланцевом соединении мельницы [5]. Зенкер-развертка является сборным комбинированным инструментом, у которого режущие элементы представляют стандартные многогранные неперетачиваемые твердосплавные пластины, закрепляемые механически на корпусе инструмента винтами (рис. 1). У инструмента два зуба, которые разделены прямыми стружечными канавками для выведения стружки из зоны резания. Такой комбинированный инструмент имеет две режущие части. Первая часть – зенкер, оснащена квадратными пластинами, вторая часть – развертка, оснащена трехгранными пластинами. Точность отверстий обеспечивается второй ступенью инструмента – разверткой. Применение многогранных пластин, закрепляемых механически, позволяет быстро повернуть их на другую грань или сменить при износе. При этом не требуется наладка, так как высокая точность пластин обеспечивает требуемую точность инструмента в пределах допуска. Соединительной частью инструмента является конический хвостовик, которым инструмент устанавливается в шпиндель сверлильной головки переносного станка или устройства.

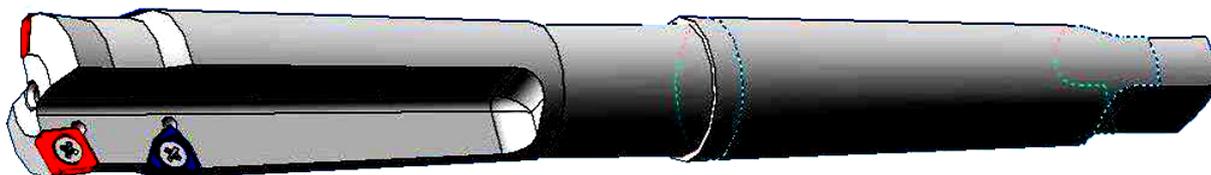


Рис. 1. Зенкер-развертка

Основной припуск при обработке снимается зенкером, который устраняет отклонения от цилиндричности, увод и искривление оси отверстия, возникающие при сверлении [7]. По результатам экспериментальных данных установлено, что величина отклонений тем больше, чем больше глубина сверления, которая зависит непосредственно от толщины заготовки [4]. Развертывание обеспечивает точность отверстия по размеру и шероховатость поверхности.

Из выше изложенного следует, что необходимо определить точность отверстия, которая обеспечивается зенкером-разверткой.

**Основная часть.** Величина изменения диаметров отверстия в поперечном сечении по всей толщине заготовки при обработке зенкером-разверткой зависит от условий работы. Обработка

выполнялась с использованием переносного станка (устройства) с выдвижным шпинделем, у которого при резании увеличивается длина на величину глубины сверления. Зенкер-развертка рассматривается как двухступенчатая консольная балка, закрепленная в шпинделе станка. В процессе обработки шпиндель выдвигается в направлении движения подачи, тем самым увеличивается длина консоли, что отражается на прогибе инструмента и, соответственно, на точности обработки отверстия. Свободный конец инструмента в процессе обработки нагружается силами резания [8]. Сила подачи, действующая на инструмент, вызывает  $P_o$  осевое усилие и  $M_k$  крутящий момент. Отжатие инструмента происходит в направлении действия равнодействующих сил [9] от радиальных  $P_y$  и тангенциальных  $P_z$  сил,

возникающих при зенкеровании  $P = \sqrt{P_y^2 + P_z^2}$  и развертывании  $P_1 = \sqrt{P_{y1}^2 + P_{z1}^2}$ , где  $P_y = \Delta P_y$  – неуравновешенная радиальная сила при зенкеровании и  $P_{y1} = \Delta P_{y1}$  при развертывании;  $P_z = \Delta P_z$  – неуравновешенная тангенциальная сила при зенкеровании и  $P_{z1} = \Delta P_{z1}$  при развертывании. Неуравновешенные силы  $\Delta P_y$ ,  $\Delta P_{y1}$ ,  $\Delta P_z$  и  $\Delta P_{z1}$  могут действовать в любом направлении по радиусу отверстия. Величины  $\Delta P_y$  и  $\Delta P_{y1}$  связаны с осевым усилием и вычисляются по зависимости [9]:

- для зенкерования  $\Delta P_y = 0,008 \cdot P_o$ , Н;
- для развертывания  $\Delta P_{y1} = 0,006 \cdot P_{o1}$ , Н.

Значения осевого усилия  $P_o$  и  $P_{o1}$  определяются по формуле [10]:

- для зенкерования  $P_o = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot K_p$ ,
- для развертывания  $P_{o1} = 10 \cdot C_p \cdot t_1^x \cdot S^y \cdot K_p$ ,

где  $C_p$  – коэффициент, зависящий от условий обработки;  $t$  – глубина резания при зенкеровании, мм;  $t_1$  – глубина резания при развертывании, мм;  $S$  – подача на оборот, мм/об, для зенкерования и развертывания одна и та же;  $x$  и  $y$  – показатели степени;  $K_p$  – поправочный коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала.

Величины  $\Delta P_z$  и  $\Delta P_{z1}$  связаны с крутящим моментом и вычисляются по зависимости [9]:

- для зенкерования  $\Delta P_z = 0,038 \cdot M_{кр} / d$ , Н, где  $d$  – диаметр зенкера, мм;
- для развертывания  $\Delta P_{z1} = 0,031 \cdot M_{кр1} / d_1$ , Н, где  $d_1$  – диаметр развертки, мм.

Крутящий момент при зенкеровании  $M_{кр}$ , Н·м, определяется по формуле [10]:

$$M_{кр} = 10 \cdot C_m \cdot D^q \cdot t^x \cdot S^y \cdot K_p,$$

где  $C_m$  – коэффициент, зависящий от условий обработки;  $D$  – диаметр отверстия, соответствует диаметру зенкера, мм;  $t$  – глубина резания, мм;  $S$  – подача на оборот, мм/об;  $x$ ,  $y$  и  $q$  – показатели степени;  $K_p$  – поправочный коэффициент.

Крутящий момент при развертывании  $M_{кр1}$ , Н·м, определяется по формуле [10]:

$$M_{кр1} = \frac{C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot D_1 \cdot Z}{2 \cdot 100},$$

где  $C_p$  – коэффициент, зависящий от условий обработки;  $D_1$  – диаметр отверстия, соответствует диаметру развертки, мм;  $t$  – глубина резания, мм;  $S_z$  – подача на зуб, мм/зуб;  $Z$  – число зубьев развертки;  $x$  и  $y$  – показатели степени.

При врезании инструмента в заготовку он приобретает опору и тогда система «инструмент – шпиндель» переходит от консольной схемы в

схему со следящей нагрузкой [11]. Таким образом, на свободный конец накладывается связь в виде подвижного шарнира (рис. 2). Такая система «инструмент – шпиндель», как стержень переменного сечения с заделкой на одном конце и подвижным шарниром на другом, будет являться статически неопределимой [12].

Для определения точности отверстия, получаемой при обработке, необходимо проследить влияние режимов и сил резания на технологическую систему «инструмент – шпиндель». В данной системе исключается деталь, так как она представляет массивный жесткий объект, в котором производится обработка отверстий. Силы резания возникающие при обработке настолько незначительны, что не вызывают деформации детали.

Рассматриваемая система «инструмент – шпиндель» представлена схемой, в которой выделяются три участка (рис. 2). Первый участок – расстояние от опоры  $A$  (подвижный шарнир) до точки  $B$ , которое приходится на зенкер инструмента. Второй участок – расстояние от точки  $B$  (переход зенкера в развертку) до точки  $C$  (место стыка инструмента со шпинделем), приходится на развертку. Третий участок – расстояние от точки  $C$  до точки  $D$ , которое приходится на шпиндель (подвижная часть системы). Шпиндель в процессе работы выдвигается от торца корпуса сверлильной головки на длину обработки отверстия. Каждый из участков схемы имеет свое сечение, жесткость и длину. Длина на первом участке постоянная и равна длине зенкера инструмента, длина второго участка равна длине развертки, а на третьем участке длина шпинделя, величина переменная и зависит от длины обработки, т.е. от толщины заготовки.

Под действием режимов резания возникают силы резания, которые упруго деформируют систему «инструмент – шпиндель», вызывая прогиб (отжим) инструмента, что изменяет диаметр отверстия по его длине. Величину прогиба (отжима) системы можно вычислить, используя основное дифференциальное уравнение упругой линии [12]:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{E_i J_i(x)},$$

где  $M$  – изгибающий момент системы;  $E_i$  – модуль упругости рассматриваемого участка инструмента;  $J_i$  – момент инерции рассматриваемого участка инструмента.

Изгибающий момент для рассматриваемой системы (рис. 2) будет иметь вид:

$$M(x) = R_A \cdot (l + x) - P \cdot (l + x) - P_1 \cdot (l_1 + x) + R_D \cdot x, \quad (1)$$

где  $P$  – неуравновешенная равнодействующая сила при зенкеровании;  $P_1$  – неуравновешенная равнодействующая сила при развертывании;  $R_A$  – реакция в опоре  $A$ ;  $R_D$  – реакция в опоре  $D$ ;  $l$

– длина инструмента;  $l_1$  – длина развертки;  $x$  – длина шпинделя (величина переменная).

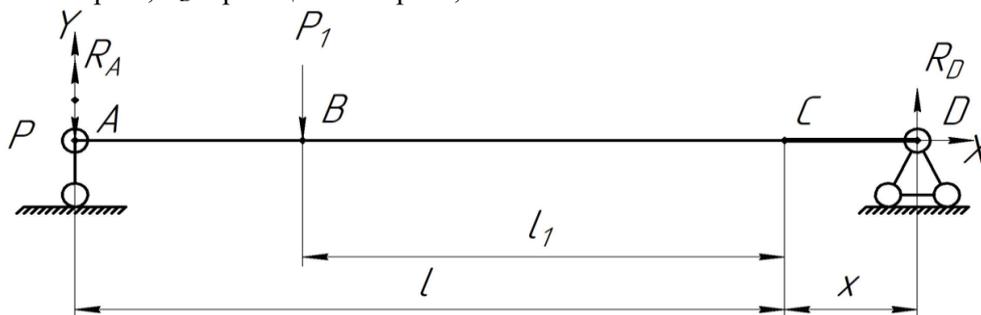


Рис. 2. Схема для расчета прогиба системы

Преобразованное дифференциальное уравнение упругой линии системы:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{E_i J_i(x)} [R_A \cdot (l+x) - P \cdot (l+x) - P_1 \cdot (l_1+x) + R_D \cdot x]. \quad (2)$$

В системе на стыке второго и третьего участков в точке  $C$  изменяются диаметры поперечных сечений этих участков. В точке  $C$  нет сосредоточенной силы, но на нее воздействует вся нагрузка, воспринимаемая на участках первом и втором. Для установления полной зависимости необходимо определить значения реакций в опорах  $A$  и  $D$ .

Сначала находится реакция в опоре  $A$  –  $R_A$ , которая определяется по зависимости –  $\sum M_D = 0$ ,

$$R_A \cdot (l+x) - P \cdot (l+x) - P_1(l_1+x) = 0,$$

откуда

$$\theta(x) = \frac{dy(x)}{dx} = \frac{1}{E_i J_i} \left[ R_A \cdot \frac{(l+x)^2}{2} - P \cdot \frac{(l+x)^2}{2} - P_1 \cdot \frac{(l_1+x)^2}{2} + R_D \cdot \frac{x^2}{2} + C_i \right]. \quad (3)$$

Интегрируя вторично, находится выражение для определения прогиба (отжима) –  $y(x)$ .

$$y(x) = \frac{1}{E_i J_i} \left[ R_A \cdot \frac{(l+x)^3}{6} - P \cdot \frac{(l+x)^3}{6} - P_1 \cdot \frac{(l_1+x)^3}{6} + R_D \cdot \frac{x^3}{6} + C_i \cdot x + D_i \right]. \quad (4)$$

Согласно утверждению [12] произвольные постоянные величины  $C_i$  и  $D_i$  на всех участках рассматриваемой системы равны. Тогда достаточно определить постоянные величины на первом участке.

$$\theta(x) = \frac{dy(x)}{dx} = \frac{1}{E_i J_1} \left[ R_A \cdot \frac{(l+x)^2}{2} - P \cdot \frac{(l+x)^2}{2} + C_1 \right]; \quad (5)$$

$$y(x) = \frac{1}{E_i J_1} \left[ R_A \cdot \frac{(l+x)^3}{6} - P \cdot \frac{(l+x)^3}{6} + C_1 \cdot x + D_1 \right]. \quad (6)$$

Принимается, что  $C_l = C$  и  $D_l = D$  по утверждению, изложенному выше. В уравнения (5) и (6) вводится реакция  $R_A$ , тогда:

$$\theta(x) = \frac{dy(x)}{dx} = \frac{1}{E_i J_1} \left[ \left( P + P_1 \cdot \frac{l_1+x}{l+x} \right) \cdot \frac{(l+x)^2}{2} - P \cdot \frac{(l+x)^2}{2} + C \right]; \quad (7)$$

$$R_A = P + P_1 \frac{l_1+x}{l+x},$$

где  $x$  изменяется от 0 к  $H$ ,  $H$  – длина обработки отверстия (толщина заготовки).

Реакция в опоре  $D$  –  $R_D$  определяется по зависимости –  $\sum M_A = 0$ ,

$$P_1(l-l_1) - R_D(l+x) = 0,$$

откуда

$$R_D = P_1 \frac{l-l_1}{l+x}.$$

Проинтегрировав обе части равенства (2), тогда угол поворота оси можно определить по зависимости:

Удалив из уравнений (3) и (4) соответствующие нагрузки на последующих участках системы, можно получить уравнения для первого участка:

$$y(x) = \frac{1}{E_1 J_1} \cdot \left[ \left( P + P_1 \cdot \frac{l_1 + x}{l + x} \right) \cdot \frac{(l+x)^3}{6} - P \cdot \frac{(l+x)^3}{6} + C \cdot x + D \right]. \quad (8)$$

Для заданной системы с заделкой угол поворота и прогиб (отжим) оси в ней равны нулю [12]. Для определения постоянных величин  $C$  и  $D$  задаются граничные условия:

$$\theta(l) = \theta_l = \frac{1}{E_1 J_1} \cdot \left[ \left( P + P_1 \cdot \frac{l_1}{l} \right) \cdot \frac{l^2}{2} - P \cdot \frac{l^2}{2} + C \right], \quad C = -P_1 \cdot \frac{l \cdot l_1}{2}; \quad (9)$$

$$y(l) = y_l = \frac{1}{E_1 J_1} \cdot \left[ \left( P + P_1 \cdot \frac{l_1}{l} \right) \cdot \frac{l^3}{6} - P \cdot \frac{l^3}{6} + D \right], \quad D = P_1 \cdot \frac{l^2 \cdot l_1}{6}. \quad (10)$$

Подставив полученные значения  $R_A$  и  $R_D$ ,  $C$  и  $D$  в уравнение (4) выводится формула для определения прогиба инструмента в любой точке по длине обрабатываемого отверстия –  $y(x)$ :

$$y(x) = \frac{1}{E_1 J_1} \cdot \left[ \left( P + P_1 \cdot \frac{l_1 + x}{l + x} \right) \cdot \frac{(l+x)^3}{6} - P \cdot \frac{(l+x)^3}{6} - P_1 \cdot \frac{(l+x)^3}{6} - P_1 \cdot \frac{l \cdot l_1}{2} \cdot x - P_1 \cdot \frac{l^2 \cdot l_1}{6} \right] + \frac{P_1}{E_2 \cdot J_2} \cdot \frac{x^3 \cdot (l-l_1)}{6 \cdot (l+x)}, \quad (11)$$

где  $E_l$  – модуль упругости режущего инструмента,  $E_l=2,1 \cdot 10^5$  МПа;  $E_2$  – модуль упругости шпинделя,  $E_2=2,1 \cdot 10^5$  МПа;  $J_l$  – момент инерции режущего инструмента,  $J_l=0,045 \cdot d^4$  мм<sup>4</sup>;  $J_2$  – момент инерции шпинделя,  $J_2=0,05 \cdot (d_n^4 - d_s^4)$  мм<sup>4</sup>, где  $d_n$  – наружный и  $d_s$  – внутренний диаметры шпинделя.

Величина  $y(x)$  указывает на переменность прогиба (отжима) оси инструмента, а вместе с тем на изменение диаметра по длине отверстия. Для оценки цилиндричности обрабатываемого отверстия зенкером-разверткой в формулу (11) вводятся исходные данные и несколько значений переменной величины  $x$  по длине отверстия. Величина прогиба (отжима) инструмента, а соответственно погрешность обработки в виде разбивки (увеличения диаметра отверстия), зависит от длины отверстия и силы резания, т. е. режимов резания – глубины резания, подачи и частоты вращения инструмента. Длину обрабатываемого отверстия изменять нельзя, она должна быть такой, какой требуется. У переносных устройств и станков, для уменьшения их габаритных размеров и массы, компактные сверлильные головки, поэтому у таких конструкций постоянная подача и частота вращения. Таким образом, сила резания, с которой связан прогиб (отжим) инструмента, зависит от глубины резания, приходящегося на зенкерование и развертывание. Поэтому регулировать прогиб (отжим) инструмента следует глубиной резания на зенкерование и развертывание. Для рассматриваемой технологической системы при изменении длины обработки от 1 мм до 100 мм наблюдается разбивка отверстия, имеющего конусную форму с минимальным диаметром на входном торце и максимальным диаметром на выходном торце отверстия.

при  $x=0$  следует, что  $\theta=0$  и  $y_l=0$ , тогда:

Изменение диаметра обрабатываемого отверстия определяется после вычисления величины разбивки  $y(x)$  по формуле (11) в нескольких точках по длине отверстия, принимая расстояние между точками с равномерным шагом. Значение диаметра отверстия  $D_i$ , мм, в рассматриваемой точке вычисляется по зависимости:

$$D_i = d_p + 2 \cdot y_i, \quad (12)$$

где  $d_p$  – действительный диаметр развертки, мм;  $y_i$  – величина разбивки в рассматриваемой точке, мм.

Величина отклонения от цилиндричности определяется по полученным значениям  $D_i$ , мм, по которым устанавливается максимальный и минимальный диаметр отверстия –  $D_{max}$  и  $D_{min}$ . Диаметр отверстия является допустимым, если погрешность обработки  $\Delta_D$ , мм, находится в пределах допуска на диаметр отверстия –  $TD_o$ , мм:

$$\Delta_D = D_{max} - D_{min} \leq TD_o. \quad (13)$$

Предельные отклонения, которые необходимо наложить на размер диаметра новой развертки, определяются с учетом возможной максимальной разбивки  $y_{max}$ , мм, возникающей при максимальных значениях исходных данных – длине отверстия, глубины резания, подачи и частоты вращения инструмента.

Номинальный диаметр развертки равен номинальному диаметру отверстия. Верхнее отклонение диаметра развертки  $ESd_p$ , мм, определяется с учетом величины максимальной разбивки  $y_{max}$ , мм:

$$ESd_p = ESD_o - 2 \cdot y_{max}, \quad (14)$$

где  $ESD_o$  – верхнее отклонение диаметра отверстия, мм.

Нижнее отклонение диаметра развертки  $EId_p$ , мм, определяется с учетом допуска на изготовление развертки:

$$EId_p = ESd_p - Td_p, \quad (15)$$

где  $Td_p$  – допуск на диаметр развертки, мм, принимается по стандарту в зависимости от качества точности обрабатываемого отверстия [13].

**Выводы.** Предлагаемая технология по использованию зенкера-развертки для обработки прецизионных отверстий во фланцевых соединениях крупногабаритного оборудования позволяет:

– сократить оперативное время обработки отверстий во фланцах мельниц от 1,5 часа для небольших мельниц до 4,3 часа для крупных мельниц одного фланцевого соединения;

– оценить цилиндричность обработки прецизионных отверстий зенкером-разверткой во фланцевых соединениях крупногабаритного оборудования;

– рассчитать диаметр и предельные отклонения развертки сборного инструмента.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Санина Т.М. Способ восстановления работоспособности внутренних поверхностей вращения цапф крупногабаритного промышленного оборудования в условиях эксплуатации. Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. 114 с.

2. Дроздов Н.Е. Эксплуатация, ремонт и испытание оборудования предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. М.: Высш. школа, 1979. 312 с.

3. Банит Ф.Г., Несвижский О.А. Механическое оборудование цементных заводов. М.: Машиностроение, 1975. 318 с.

4. Голдобина В.Г. Разработка технологии и оборудования механической обработки прецизионных отверстий фланцевых соединений крупногабаритного оборудования: диссертация канд. техн. наук. Белгород, 2005. 133 с.

5. Голдобина В.Г. Точность обработки отверстий во фланцах крупногабаритного оборудования при использовании переносных установок. Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. 106 с.

6. Голдобина В.Г. Обработка отверстий с использованием переносного станка // Научное обозрение. 2015. №20. С. 129–133.

7. [www.stroitelstvo-new.ru/zhestyanye-raboty/zenkerovanie.shtml](http://www.stroitelstvo-new.ru/zhestyanye-raboty/zenkerovanie.shtml) Зенкерование отверстий.

8. Вульф А.М. Резание металлов. Л.: Машиностроение, 1973. 496 с.

9. Колев К.С., Горчаков Л.М. Точность обработки и режимы резания. М.: Машиностроение, 1976. 144 с.

10. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2003. Т. 2.

11. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопrotивление материалов. М.: Наука, 1986. 560 с.

12. Сопrotивление материалов. Под ред. Писаренко Г.С. К.: Вища шк., 1986. 775 с.

13. Ординарцев И.А., Филиппов Г.В., Шевченко А.Н. и др. Справочник инструментальщика. Под общ. ред. И.А. Ординарцева. Л.: Машиностроение, 1987. 846 с.

Информация об авторах

**Голдобина Валентина Григорьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроителя. E-mail: goldobina.valentina@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 16.04.2021 г.

© Голдобина В.Г., 2021

**Goldobina V.G.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova  
E-mail: goldobina.valentina@gmail.com

### ACCURACY OF HOLE PROCESSING WITH A COMBINED TOOL

**Abstract.** Cement, powder metallurgy and various large-sized equipment are used in the industry of building materials for grinding raw materials. During operation, such equipment is exposed to external influences, especially at the joints, which reduce the reliability of the units. This leads to the early replacement of wearing parts. Large components of grinding mills are connected by flanges. The flanges are fastened with bolts, some of which must be precision, since they take the load of the equipment and ensure the tightness of the connection. The holes for precision bolts, respectively, must be accurate and of high quality. A study of the processing of holes with a reamer is given. The cutting elements of the tool, in the form of multifaceted plates, are mechanically attached to the body, which makes it possible to quickly replace the plate in case of wear or breakage. Such an assembled combined cutting tool allows to perform countersinking and reaming in one operation and

thereby reduce the processing time of one hole and, in general, all precision holes in the flanges of the mill being repaired. The dependence of the precision hole accuracy on the shape and spatial deviation from the cutting modes of processing when using a combined tool is derived. The dependence is established for processing using a portable device with a rising spindle, as the most used equipment for repairs. The presented dependence makes it possible to predict the accuracy of machining holes with a combined tool, taking into account the rigidity of the technological system and calculate the required reamer accuracy.

**Keywords:** holes, mills, flanges, precision holes, combined tool.

#### REFERENCES

1. Sanina T.M. [Sposob vosstanovleniy rabotosposobnosti vnutrennih poverhnostei vrasheniya shapf krupnogabaritnogo promichlenogo oborudovaniya v usloviyakh ekspluatatsii]. Belgorod: BSTU. 2011, 114 p. (rus)
2. Drozdov N.Ye. Operation, repair and testing of equipment of enterprises of building materials, products and structures [Ekspluatatsiya, remont i ispytaniye oborudovaniya predpriyatij stroitel'nykh materialov, izdelij i konstruktsij]. M.: Higher School. 1979, 312 p. (rus)
3. Banit F.G., Nesvizh O.A. Mechanical equipment of cement plants [Mekhanicheskoe oborudovanie cementnykh zavodov]. M.: Mashinostroenie. 1975, 318 p. (rus)
4. Goldobina V.G. Development of technology and equipment for mechanical processing of precision openings of flange joints of large-sized equipment [Razrabotka tekhnologii i oborudovaniya mekhanicheskoy obrabotki precizionnykh otverstij flancevykh soedinenij krupnogabaritnogo oborudovaniya]. dissertation Cand. tech. sciences. Belgorod: 2005, 133 p. (rus)
5. Goldobina V.G. Accuracy of processing holes in the flanges of large-sized equipment when using portable units [Tochnost' obrabotki otverstij vo flancah krupnogabaritnogo oborudovaniya pri ispol'zovanii perenosnykh ustanovok]. Belgorod: BSTU. 2018, 106 p. (rus)
6. Goldobina V.G. Processing holes using a portable machine [Obrabotka otverstij s ispol'zovaniem perenosnogo stanka]. Scientific Review Journal. 2015. No. 20. Pp. 129–133. (rus)
7. www.stroitelstvo-new.ru/zhestyanyeraboty/zenkerovanie.shtml Reaming holes.
8. Vulf A.M. Cutting metals [Rezaniye metallov]. L.: Mashinostroenie. 1973, 496 p. (rus)
9. Kolev K.S., Gorchakov L.M. Precision processing and cutting modes [Tochnost obrabotki i regimi rezaniya]. M.: Mashinostroenie. 1976, 144 p. (rus)
10. Dalskiy A.M., Kosilova A.G., Mesherykov R.K., Suslov A.G. Manual Technologist-Machine Builder [Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'nykh]. M.: Mashinostroenie. 2003, Vol. 2. (rus)
11. Birger I.A., Mavlutin R.R. Strength of materials [Soprotivleniye materialov]. M: Nauka. 1986, 560 p. (rus)
12. Pisarenko G.S. Strength of materials [Soprotivleniye materialov]. K.: Visha shkola. 1986, 775 p. (rus)
13. Ordinarcev I.A., Filippov G.V., Shevchenko A.N. Reference toolman [Spravochnik instrumentalshika]. L.: Mashinostroenie. 1987, 846 p. (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 16.04.2021

#### Для цитирования:

Голдобина В.Г. Точность обработки отверстий комбинированным инструментом // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 6. С. 80–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-80-86

#### For citation:

Goldobina V.G. Accuracy of hole processing with a combined tool. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 6. Pp. 80–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-80-86

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-87-97

**\*Ганин П.Е., Кобрин А.И.**

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

\*E-mail: ganinpe@gmail.com

## АЛГОРИТМЫ КИНЕМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОЗВЕННЫМИ МАНИПУЛЯЦИОННЫМИ РОБОТАМИ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

**Аннотация.** В статье рассмотрена возможность построения алгоритма кинематического управления для манипуляционных роботов с последовательным соединением звеньев. Предлагается построение системы управления на основе нечеткой нейронной сети. Представлены результаты экспериментальных исследований по подбору параметров нечеткой нейронной сети в соответствии с выставленным критерием оптимальности (по быстродействию) с учетом последующего итерационного уточнения методом Ньютона-Рафсона. Рассматриваются такие параметры сети как количество и тип функций принадлежности узлов, объем обучающей выборки с разным количеством подходов при обучении. Предлагается алгоритм формирования обучающей выборки для нечетких нейронных сетей с целью снижения ошибки позиционирования рабочего органа манипуляционного механизма вблизи внешней границы рабочей области. Продемонстрирована возможность адаптации алгоритмов кинематического управления путем корректировки параметров функций принадлежности в узлах сети при выполнении однотипных задач, на основе данных уточняющего алгоритма Ньютона-Рафсона. В рамках данной работы был проведен сравнительный анализ разработанного алгоритма кинематического управления с алгоритмами на основе итерационного и нейросетевого методов решения обратной задачи кинематики манипуляционного робота. Сделан вывод о повышении быстродействия для расчетов алгоритмов кинематического управления при сохранении требуемой точности.

**Ключевые слова:** обратная задача кинематики, манипуляционный робот, нечеткая нейронная сеть, алгоритм кинематического управления, итерационное уточнение.

**Введение.** В современных автоматизированных производственных системах важную роль играют многозвенные пространственные механизмы – манипуляционные роботы. Прикладная значимость роботов-манипуляторов многократно была описана в различных обзорных статьях. В последние годы значительно расширилась область применения робототехнических средств. В связи с этим возрастают требования к качеству их работы, а именно их точности и быстродействию. Большинство современных манипуляторов строятся на базе электрических исполнительных механизмов и включают сложные алгоритмы управления, которые учитывают нелинейность и неопределенность динамической модели в условиях действия внешних возмущений. В связи с этим синтез систем управления манипуляционными механизмами связан с решением целого комплекса задач из различных научных областей. В общем виде можно выделить две основные группы задач:

- управление исполнительными механизмами, включающее задачи построения оптимальных законов управления, и контроль состояния устройств;
- анализ кинематики, включающий обеспечение необходимой манипулятивности и постро-

ение аналитических зависимостей для определенной геометрической структуры манипуляционного робота.

Данная статья посвящена решению второй группы задач, а именно построению алгоритмов кинематического управления. С целью обеспечения лучших возможностей для нахождения решения ОЗК многозвенных роботов манипуляторов применяют комбинированный подход на основе нейронных сетей и нечеткой логики [1]. Основное преимущество нечетких нейронных сетей (ННС) заключается в их универсальных возможностях по аппроксимации в совокупности с реализацией логики рассуждений, обеспечиваемых интерпретируемыми правилами «Если-То». Структура ННС схожа со структурой нейронной сети прямого распространения (например, многослойный персептрон) с обучением по алгоритму обратного распространения ошибки. Нечеткие нейронные сети фактически являются системами, которые обеспечивают объединение двух различных подходов путём комбинирования человекоподобного стиля рассуждений нечетких систем с обучением и коннекционистской структурой нейронных сетей. Каждый из слоев ННС характеризуется набором параметров (функциями принадлежности, нечеткими решающими правилами, активационными функциями, весами связей), настройка которых производится



аналогично обычным нейронным сетям. В работах [2, 3, 4] сделан вывод о том, что в сравнении с обычными нейронными сетями, сети на основе нечеткой логики обладают наилучшей сходимостью при меньшем требуемом объеме обучающей выборки для задач со сложным математическим описанием. Также применение ННС обеспечивает гарантированную гладкость выходной функции, что необходимо для решения кинематических задач при построении СУ для обеспечения следования заданной траектории движения рабочего органа манипуляционного робота. Нечёткие нейронные сети успешно применяются в решении обратной задачи кинематики для различных конструкций роботов-манипуляторов. В статьях [5, 6] предлагаются ННС для решения ОЗК манипуляционных роботов с двумя, тремя и пятью звеньями. В данных работах представлены результаты экспериментальных исследований по применению ННС, описываются алгоритмы формирования обучающей выборки и продемонстрирована зависимость точности расчета от полноты обучающей выборки. Решение ОЗК для робота SCOROBOT ER-IV с применением нейро-нечётких сетей было рассмотрено в работе [7]. Были проведены экспериментальные исследования представленного метода решения ОЗК, которые продемонстрировали возможности построения СУ реального времени. Рассматривалось применение ННС для алгоритмов кинематического управления таких манипуляторов как PUMA 560 [8, 9, 10], PUMA 600 [11], DeltaRobot (DOB) [12], SCARA [13, 14]. Также рассматривалось решение ОЗК для руки человека с шестью степенями подвижности [15] и пальца кисти [16], данные исследования демонстрируют обеспечение возможности плавного изменения координат при выполнении задания. Ряд работ [17, 18, 19, 20] посвящен рассмотрению решения ОЗК методами на основе ННС для конструкций манипуляторов с избыточностью. В данных работах продемонстрировано гарантированное нахождения единственного решения, а также представленные результаты экспериментов свидетельствуют о возможностях применения нейро-нечетких сетей в СУ избыточными роботами.

В работе рассмотрена механическая структура манипулятора с последовательным соединением звеньев. Первое звено манипулятора соединено с опорной стойкой (основанием), а последнее снабжено точечным рабочим органом - спредером. Процесс кинематического управления манипулятором строится на определении таких углов поворота механизмов в шарнирных соединениях, при которых обеспечивается движение точки по заданной траектории. Для рассматриваемых манипуляционных механизмов, система

уравнений описывающая их кинематику имеет следующий вид:

$$\begin{cases} x = [\sum_{m=1}^n (L_m \cdot \sin(\sum_{p=1}^m Q_p))] \cdot \cos Q_0, \\ y = [\sum_{m=1}^n (L_m \cdot \sin(\sum_{p=1}^m Q_p))] \cdot \sin Q_0, \\ z = L_0 + \sum_{m=1}^n (L_m \cdot \cos(\sum_{p=1}^m Q_p)), \end{cases} \quad (1)$$

где  $n$  – количество сопряженных звеньев, участвующих в относительном движении;  $L_n$  – длины звеньев;  $L_0$  – высота основания;  $Q_n$  – углы поворота звеньев;  $x, y, z$  – координаты рабочего органа.

**Схема алгоритмов кинематического управления.** В основу алгоритмов кинематического управления для выбранной группы манипуляционных механизмов, описываемых уравнениями (1), положен гибридный метод решения обратной задачи кинематики. Предлагаемый метод базируется на последовательном применении нечеткой нейронной сети для поиска начального приближения и последующего итерационного уточнения методом Ньютона-Рафсона. На рис. 1 представлена схема разработанного алгоритма кинематического управления, включающего поиск решения ОЗК. Принцип работы включает в себя следующие этапы:

- построение рабочей области, используя алгоритмы решения прямой задачи кинематики, которая в дальнейшем используется для проверки вхождения желаемых координат  $(x, y, z)_ж$  и формирования обучающей выборки для нечетких нейронных сетей ( $ННС_1, \dots, ННС_n$ );
- передача координат на обученные нечеткие нейронные сети соответствующие количеству искомых углов ( $ННС_1, \dots, ННС_n$ ) и как результат их работы получаем углы поворота звеньев  $(Q_0, \dots, Q_n)_{ннс}$ ;
- на решении прямой задачи кинематики  $f(Q_0, \dots, Q_n)_{ннс}$  осуществляется проверка на достижения требуемой точности для решения ОЗК, и в случае ее недостаточности проводится уточнение в окрестностях найденных значений;
- при достижении требуемой точности решение  $(Q_0, \dots, Q_n)_р$  передается на программируемый логический контроллер (ПЛК) где реализован регулятор координат, отслеживающий исполнение перемещений;
- передача управляющего воздействия через сервоконтроллеры на электрический привод.

В процессе работы манипулятора осуществляется накопление скорректированных данных из итерационного алгоритма уточнения и на решении прямой задачи кинематики  $(x, y, z)_р = f(Q_0, \dots, Q_n)_р$ . Полученные данные используются для генерации корректирующего буфера *Buf*, который применяется для корректировки обучающей выборки и уточнения параметров функций принадлежности в узлах сети.



диапазона для каждой координаты рабочего органа манипулятора. Введем следующие лингвистические переменные: <<Диапазоны по X>,  $T_x, D_x$ , <<Диапазоны по Y>,  $T_y, D_yD_x = [x_{min}; x_{max}]$ ,  $D_y = [y_{min}; y_{max}]$  – их области определения, вычисляемые из прямой задачи кинематики;  $T_x = \{T_x^1, T_x^2, T_x^3, T_x^4\}$ ,  $T_y = \{T_y^1, T_y^2, T_y^3, T_y^4\}$  – их терм-множества.

ЕСЛИ «посылка 1» И «посылка 2», ТО «заключение»,

где «посылка 1, 2» и «заклучение» являются нечеткими высказываниями.

Структура используемой в работе сети представлена на рис. 2. Выходные функции принадлежности представлены в виде линейной зависимости. С помощью нечеткого вывода описываются 16 правил, по которым осуществляется связь между заданными координатами и искомым углом поворота звена. Сравнение и принятие решения реализуется с помощью продукционных правил вида:

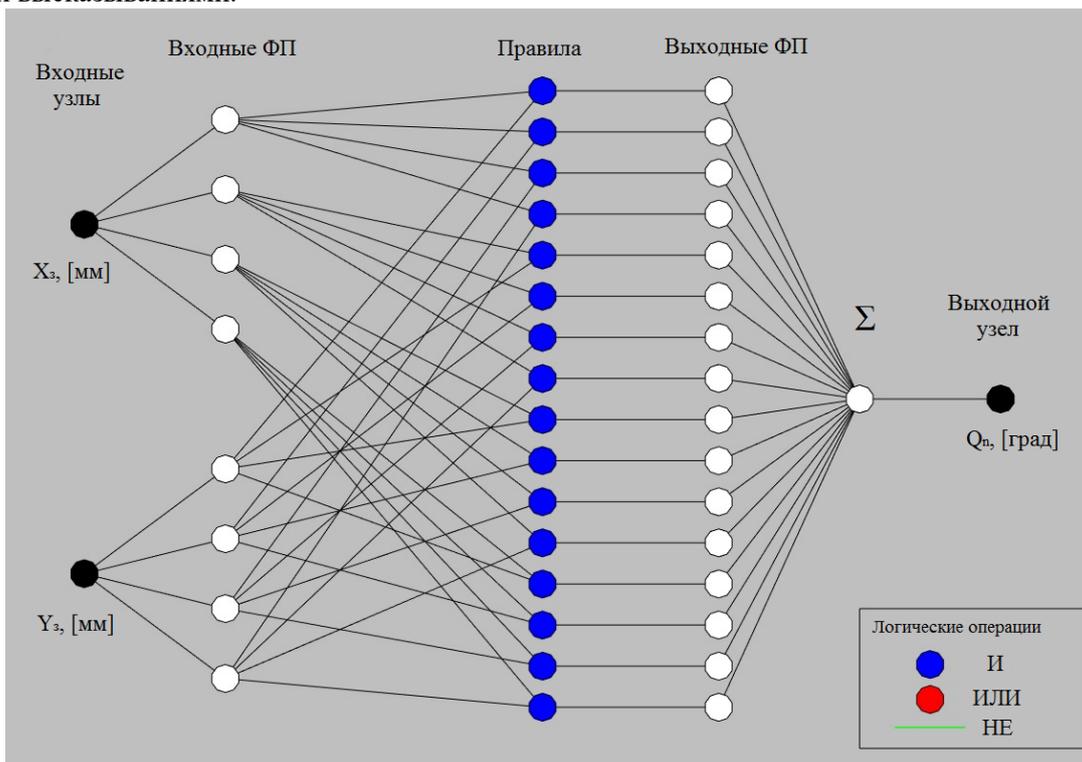


Рис. 2. Структура нечеткой нейронной сети

В качестве примера на рис. 3 представлена поверхность вывода для искомого угла (первого

угла трехзвенной конструкции) манипуляционного робота.

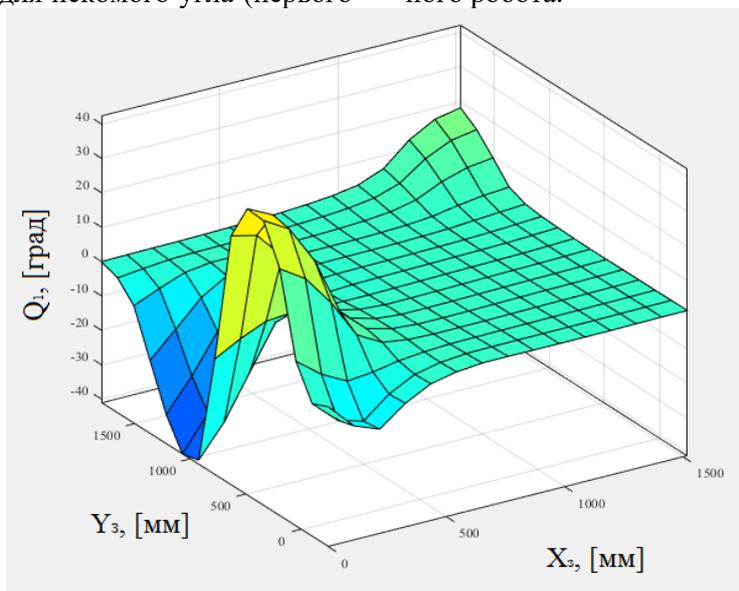


Рис. 3. Поверхность вывода первого угла

Необходимо отметить, что при проведении расчетов ОЗК в пространстве необходима коррекция угла в зависимости от текущего квадранта рабочей зоны.

В работе были проведены исследования по подбору таких параметров нечетких нейронных сетей, при которых их совместная работа с алгоритмами численного итерационного уточнения будут гарантированно обеспечивать нахождения решения при установленной требуемой точности. В соответствии с задачами практической работы алгоритмов кинематического управления был определен следующий критерий оптимальности для ННС:

$$\begin{cases} \min(t_{\text{пр}}) \\ t_{\text{пр}} \leq t_{\text{прmax}} \\ \Delta d_{\text{ннс}} \leq \Delta d_{\text{ннс max}} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $t_{\text{пр}}$  – время поиска решения;  $t_{\text{прmax}}$  – максимально допустимое время поиска решения;  $\Delta d_{\text{ннс}}$  – отклонение рабочего органа от заданной точки для найденного приближенного решения ОЗК;  $\Delta d_{\text{ннс max}}$  – максимально допустимое отклонение.

Расчет отклонения проводился на решении прямой задачи кинематики по следующей формуле:

$$\Delta d_{\text{ннс}} = \{x; y; z\}_{\text{ж}} - \{x; y; z\}_{\text{ннс}}, \quad (3)$$

где  $\{x; y; z\}_{\text{ннс}} = f_{\text{ПРК}}(\vec{Q}_{\text{ННС}})$  – решение прямой задачи кинематики для углов поворота звеньев из ННС.

Исходя из проведенного анализа литературы и экспериментальных исследований, для манипуляционных механизмов заданной структуры, были приняты следующие ограничения:  $t_{\text{прmax}} = 5$  [мс],  $\Delta d_{\text{ннс max}} = 50$  [мм]. В соответствии с данными требованиями и исходя из представленного критерия оптимальности (2) были составлены следующие рекомендации для параметров ННС: объем обучающей выборки рекомендуется от 1500 до  $3,0 \cdot 10^5$  точек, в зависимости от вычислительной мощности устройства управления; предлагается использование четырех обобщенных колоколообразных или Гауссовских функций принадлежности для одного узла сети; при обучении рекомендуется не менее 15 и не более 30 подходов, ограничение для верхней границы количества подходов обусловлено исключением переобученности (overfitting) сети. Нечеткие нейронные сети с предложенными параметрами продемонстрировали наилучшие показатели для работы в совокупности с итерационным уточнением в системах кинематического

управления для реализации вычислений в режиме реального времени.

Для рассматриваемой группы конструкций манипуляторов возможно возникновение сингулярных положений звеньев при нахождении желаемого положения рабочего органа вблизи границы рабочей области. Это обусловлено прежде всего применением итерационного уточнения в алгоритме поиска решения ОЗК, который не может обеспечить нахождение решения. Разрешение проблем сингулярности для представленного алгоритма решения ОЗК можно выполнить путем применения его совместно с алгоритмами траекторного планирования. При совместном использовании с данными алгоритмами можно обеспечить необходимое выстраивание звеньев манипулятора [21, 22]. Использование предлагаемого гибридного алгоритма гарантировано позволяет найти решение ОЗК, однако его точность вблизи сингулярных положений снижается вследствие получения недостаточного уточнения. Повысить точность возможно формированием обучающей выборки с увеличенным набором данных вблизи сингулярных положений звеньев манипулятора. Таким образом, можно увеличить точность нахождения решения вблизи границы рабочей области при снижении точности на остальной части рабочей области. Однако в дальнейшем при нахождении решения ОЗК с использованием итерационного уточнения, это увеличение ошибки будет скомпенсировано.

Для обучения нечетких нейросетей было сгенерировано два типа обучающего набора данных с использованием различных алгоритмов формирования, основанных на решении прямой задачи кинематики: с фиксированным шагом изменения углов поворота каждого из звеньев (ННС 1-го типа) и с шагом, уменьшающимся при приближении к внешней границе рабочей области (ННС 2-го типа). Количество точек, обучающих наборов данных двух алгоритмов равны. На рис. 4 представлено изменение ошибки позиционирования рабочего органа манипулятора при расчете ОЗК только нейросетевым методом без итерационного уточнения для заданной траектории. Данный график иллюстрирует снижение ошибки позиционирования вблизи границы рабочей области (в конце траектории). Стоит также заметить, что на протяжении большей части траектории ошибка во втором случае (для ННС обученных с увеличенным количеством обучающих примеров вблизи границы) больше, однако в дальнейшем она устраняется с помощью итерационного уточнения.

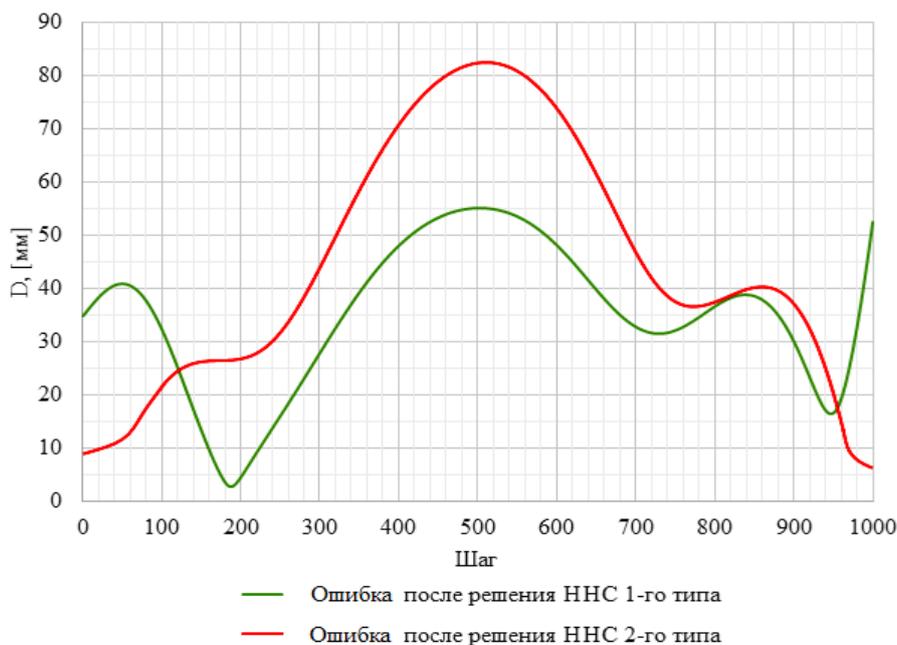


Рис. 4. Ошибка для различных ННС

**Результаты экспериментальных исследований.** Был проведен сравнительный анализ разработанного алгоритма кинематического управления с алгоритмами на основе итерационного и нейросетевого методов решения ОЗК. Методика проведения экспериментальных исследований включала нахождение углов поворота звеньев для отработки рабочим органом манипулятора заданных траекторий. В качестве задания рассматривались замкнутые траектории в трехмерном пространстве, строго находящиеся в границах рабочей области манипулятора. Подбор траекторий и их построение были выполнены с учетом охвата большей части рабочей области. С использованием алгоритма решения прямой задачи кинематики и на основе полученных в результате эксперимента данных, были рассчитаны значения минимального, среднего (медианное значение) и максимального отклонения рабочего органа от заданной требуемой координаты. Исследования проводились для различных значений заданной требуемой точности положения: 1,  $1 \cdot 10^{-3}$  и  $1 \cdot 10^{-6}$  мм. Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 1. Из полученных данных можно сделать вывод о возможности применения разработанного алгоритма кинематического управления в системах реального времени. Также результаты экспериментов предлагаемого алгоритма демонстрируют возможность успешного уточнения до требуемой точности в задачах управления манипуляционными механизмами с большим числом звеньев.

В работе проведены экспериментальные исследования, направленные на разрешение проблемы нахождения решения обратной задачи ки-

нематики вблизи внешней границы рабочей области. Рассмотрение проведено для манипулятора с пятью звеньями, обеспечивающими 6 степеней подвижности. На основе представленной ранее механической структуры (система уравнений (1)). Для данного типа структуры манипулятора было введено ограничение на максимально допустимые углы поворота звеньев до 90 градусов. В качестве тестового задания для расчёта была выбрана линейная траектория движения рабочего органа манипулятора из произвольной координаты ( $\{x_{пр}=500, y_{пр}=500, z_{пр}=1600\}$ ) к внешней границе рабочей области ( $\{x_{гр}=1800, y_{гр}=1039,231, z_{гр}=500\}$ ), состоящая из 1000 точек. Результаты экспериментов представлены в таблице 2. Из полученных данных видно, что средняя (медианная) ошибка позиционирования (дистанция рабочего органа до желаемой точки) не изменяется при различных алгоритмах формирования обучающих выборок и находится в установленных границах (менее 1 [мм]). Однако 2-ой подход позволяет снизить максимальную ошибку для гибридного алгоритма расчета ОЗК за счет учета сложности уточнения решения вблизи границы рабочей области (снижение ошибки на 78,5 %). Также за счет этого в целом снижается требуемое количество итераций алгоритма уточнения и как следствие повышается быстродействие (приблизительно на 54 %).

Разработанный алгоритм кинематического управления предусматривает корректировку параметров нечетких нейронных сетей в процессе эксплуатации манипулятора на наработанных уточненных данных. Таким образом, при выполнении однотипных задач осуществляется адапта-

ция алгоритмов. В таблице 3 представлены результаты экспериментов при выполнении расчетов для трех-, пяти- и восьмизвенных конструкций манипуляционных роботов с установленной точностью расчётов 1 мм для положения рабо-

чего органа. Расчеты представлены для разработанного гибридного алгоритма кинематического управления и его адаптированной версии, скорректированной на основе данных, полученных после проведения уточняющих расчетов.

Таблица 1

## Результаты экспериментальных исследований

| Метод расчета                              |  | Итерационный                  |        |        | Нейросетевой |                   |                   | Предлагаемый гибридный |       |       |       |
|--|--|-------------------------------|--------|--------|--------------|-------------------|-------------------|------------------------|-------|-------|-------|
| Количество звеньев                         |  | 3                             | 5      | 8      | 3            | 5                 | 8                 | 3                      | 5     | 8     |       |
| Требуемая точность<br>1 мм                 | Продолжительность расчета, мс              | 2,577                         | 16,033 | 39,671 | 0,982        | 1,552             | 2,477             | 1,085                  | 1,771 | 2,771 |       |
|  | Количество итераций                        | min                           | 16     | 15     | 12           |                   |                   |                        | 10    | 13    | 13    |
|  |  | med                           | 138    | 2625   | 11876        |                   |                   |                        | 14    | 16    | 18    |
|  |  | max                           | 11429  | 42296  | 71871        |                   |                   |                        | 60    | 73    | 161   |
|  | Ошибка, мм                                 | min                           | 0,332  | 0,023  | 0,152        | 11,477            | 21,611            | 46,919                 | 0,831 | 0,612 | 0,095 |
|  |  | med                           | 0,972  | 0,949  | 0,871        | 16,616            | 25,772            | 65,724                 | 0,959 | 0,912 | 0,811 |
|  |  | max                           | 1,000  | 1,000  | 1,000        | 21,722            | 28,123            | 82,244                 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
|  | Требуемая точность<br>$1 \cdot 10^{-3}$ мм | Продолжительность расчета, мс | 3,034  | 21,070 | 47,461       | 0,947             | 1,517             | 2,489                  | 1,388 | 2,042 | 3,050 |
|  |  | Количество итераций           | min    | 78     | 43           | 32                |                   |                        |       | 18    | 35    |
| med  |  |                               | 298    | 3417   | 12866        |                   |                   |                        | 33    | 43    | 78    |
| max  |  |                               | 15356  | 70539  | 100843       |                   |                   |                        | 169   | 249   | 455   |
| Ошибка, $\text{мм} \cdot 10^{-3}$          |  | min                           | 0,265  | 0,206  | 0,064        | 11475             | 21608             | 46920                  | 0,818 | 0,575 | 0,066 |
|  |  | med                           | 0,966  | 0,948  | 1,000        | 16604             | 25786             | 65720                  | 0,962 | 0,919 | 0,824 |
|  |  | max                           | 1,000  | 1,000  | 1,000        | 21713             | 28112             | 82257                  | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Требуемая точность<br>$1 \cdot 10^{-6}$ мм |  | Продолжительность расчета, мс | 3,754  | 24,660 | 53,729       | 1,001             | 1,617             | 2,599                  | 1,713 | 2,354 | 3,363 |
|  |  | Количество итераций           | min    | 119    | 65           | 47                |                   |                        |       | 28    | 58    |
|  | med  |                               | 459    | 4201   | 13771        |                   |                   |                        | 68    | 70    | 91    |
|  | max  |                               | 16350  | 91262  | 106436       |                   |                   |                        | 180   | 195   | 485   |
|  | Ошибка, $\text{мм} \cdot 10^{-6}$          | min                           | 0,342  | 0,157  | 0,060        | $1,15 \cdot 10^7$ | $2,16 \cdot 10^7$ | $4,69 \cdot 10^7$      | 0,825 | 0,611 | 0,053 |
|  |  | med                           | 0,965  | 0,946  | 0,941        | $1,66 \cdot 10^7$ | $2,58 \cdot 10^7$ | $6,57 \cdot 10^7$      | 0,958 | 0,918 | 0,824 |
|  |  | max                           | 1,000  | 1,000  | 1,000        | $2,17 \cdot 10^7$ | $2,81 \cdot 10^7$ | $8,23 \cdot 10^7$      | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

Таблица 2

## Результаты сравнительного анализа алгоритмов обучения нечетких нейронных сетей

|                               |     | Обучение ННС 1-го типа | Обучение ННС 2-го типа |
|-------------------------------|-----|------------------------|------------------------|
| Продолжительность расчета, мс |     | 6841                   | 3117                   |
| Ошибка после ННС, мм          | min | 2,715                  | 1,694                  |
|                               | med | 36,462                 | 39,507                 |
|                               | max | 55,202                 | 82,400                 |
| Ошибка после уточнения, мм    | min | 0,283                  | 0,127                  |
|                               | med | 0,903                  | 0,903                  |
|                               | max | 52,549                 | 11,274                 |
| Количество итераций           | min | 5                      | 3                      |
|                               | med | 20                     | 24                     |
|                               | max | 50000                  | 27367                  |

Таблица 3

## Результаты сравнительного анализа адаптации алгоритмов кинематического управления

| Алгоритм расчета              |     | Неадаптированный |       |       | Адаптированный |       |       |
|-------------------------------|-----|------------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| Количество звеньев            |     | 3                | 5     | 8     | 3              | 5     | 8     |
| Продолжительность расчета, мс |     | 1,095            | 1,765 | 2,771 | 0,686          | 0,854 | 1,251 |
| Количество итераций           | min | 11               | 12    | 12    | 3              | 6     | 11    |
|                               | med | 13               | 15    | 16    | 8              | 10    | 12    |
|                               | max | 60               | 72    | 157   | 36             | 46    | 55    |

**Выводы.**

1. При использовании алгоритма кинематического управления на основе нечеткой нейронной сети достигается наилучшая производительность системы, однако среднее отклонение (дистанция до цели) значительно превышает уставовленную точность.

2. Время, затрачиваемое системой управления на расчет координат для классического итерационного алгоритма решения ОЗК, значительно увеличивается при увеличении (числа звеньев) сложности конструкции манипуляционного робота.

3. Продолжительность расчетов нейросетевым и предлагаемым гибридным способами не имеет значительной зависимости от сложности конструкции (числа звеньев).

4. С использованием предложенного гибридного алгоритма кинематического управления достигается значительное увеличение производительности (сокращение времени проведения расчетов) при контролируемой точности.

5. Рассмотрен способ снижения ошибки расчета позиции рабочего органа манипулятора вблизи внешней границы рабочей области за счет алгоритма формирования обучающего набора данных для нечетких нейронных сетей с учетом сохранения общей точности расчета для предлагаемого гибридного алгоритма кинематического управления.

6. Применение адаптации для гибридного алгоритма кинематического управления позволяет существенно сократить количество требуемых циклов итерационного уточнения и, как следствие, повышает производительность СУ.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Jang J.-S.R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1993. № 3 (23). Pp. 665–685. DOI:10.1109/21.256541.

2. Khadangi E., Madvar H.R., Ebadzadeh M.M. Comparison of ANFIS and RBF models in daily stream flow forecasting // 2nd International Conference on Computer, Control and Communication. 2009. Pp. 1–6. DOI:10.1109/IC4.2009.4909240.

3. Menten A., Yetkin M., Kim Y. Comparison of ANN and ANFIS techniques on modelling of spread mooring systems // The 30th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, TEAM 2016. 2012. Pp. 1–10.

4. Suparta W., Alhasa K.M. A comparison of ANFIS and MLP models for the prediction of precipitable water vapor // IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace). 2013. Pp. 243–248. DOI:10.1109/IconSpace.2013.6599473.

5. Das L., Nanda J., Mahapatra S.S. A Comparative Study of Prediction of Inverse Kinematics Solution of 2-DOF, 3-DOF and 5-DOF Redundant Manipulators by ANFIS // IJCSN International Journal of Computer Science and Network. 2014. № 5 (3). Pp. 304–308.

6. Alavandar S., Nigam M.J. Neuro-Fuzzy based Approach for Inverse Kinematics Solution of Industrial Robot Manipulators // Int. J. of Computers, Communications & Control. 2008. №3. Pp. 224–234.

7. Nikhade G.R., Chiddarwar S.S., Deshpande V. S. Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) for Generation of Joint Angle Trajectory // Asian International Journal of Science and Technology in Production and Manufacturing Engineering. 2013. № 2 (6). Pp. 25–32.

8. Hendarto H.A., Munadi, Setiawan J.D. ANFIS application for calculating inverse kinematics of programmable universal machine for assembly (PUMA) robot // 2014 The 1st International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering. 2014. Pp. 35–40. DOI:10.1109/ICITACEE.2014.7065710.

9. Mashhadany Y.I. AI ANFIS-Inverse-Controlled PUMA 560 Workspace Robot with Spherical Wrist // Procedia Engineering. 2012. (41). Pp. 700–709. DOI:10.1016/j.proeng.2012.07.232.

10. Narayana P.V., Ramana N.V. Prediction of inverse kinematics solution of a Puma manipulator using ANFIS // Int J Adv Eng Res. 2014. №3 (2). Pp. 84–88.

11. Bachir O., Zoubir A.-F. Adaptive Neuro-fuzzy Inference System Based Control of puma 600

Robot Manipulator // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2011. № 1 (2). Pp. 90–97. DOI:10.11591/ijece.v2i1.1116.

12. Nakhon N., Napol V., Chowarit C. ANFIS inverse kinematics method in bilateral control system based on DOB of delta robot // 18th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2015. 2016. Pp. 1314–1318. DOI:10.1109/ICEMS.2015.7385242.

13. Jha P., Biswal B.B. Intelligent Computation and Kinematics of 4-DOF SCARA Manipulator Using ANN and ANFIS // Evolutionary, and Memetic Computing. SEMCCO. 2013. Vol. 8298. Pp. 277–286. DOI: 10.1007/978-3-319-03756-1\_25

14. Jasim W.M. Solution of Inverse Kinematics for SCARA Manipulator Using Adaptive Neuro-Fuzzy Network // International Journal on Soft Computing (IJSC). 2011. №2(4). Pp. 59–66.

15. Pérez-Rodríguez R., Marcano-Cedeño A., Costa Ú., Solana J., Cáceres C., Opisso E., Tormos J.M., Medina J., Gómez E.J. Inverse kinematics of a 6 DoF human upper limb using ANFIS and ANN for anticipatory actuation in ADL-based physical Neurorehabilitation // Expert Systems with Applications. 2012. № 10 (39). Pp. 9612–9622. DOI:10.1016/j.eswa.2012.02.143.

16. Sanjaya W.S.M., Anggraeni D., Munawwaroh M., Nurasyidiek M., Rahayu D., Samsudin A., Santika I., Kinarya P.E. Colored Object Sorting using 5 DoF Robot Arm based Artificial Neural Network (ANN) Method // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1090. Pp. 12–70.

17. Beheshti M.T.H., Tehrani A.K., Ghanbari B. An optimized adaptive fuzzy inverse kinematics solution for redundant manipulators // IEEE

International Symposium on Intelligent Control ISIC-03. 2003. № 2. Pp. 924–929. DOI:10.1109/ISIC.2003.1254760.

18. Hasan A.T., Hamouda A.M.S., Ismail N., Al-Assadi H.M.A.A. An adaptive-learning algorithm to solve the inverse kinematics problem of a 6 D.O.F serial robot manipulator // Advances in Engineering Software. 2006. № 7 (37). Pp. 432–438. DOI:10.1016/j.advengsoft.2005.09.010.

19. Mayorga R.V., Sanongboon P. An Artificial Neural Network Approach for Inverse Kinematics Computation and Singularities Prevention of Redundant Manipulators // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2005. № 1 (44). Pp. 1–23. DOI:10.1007/s10846-005-9000-x.

20. Singla A., Narayan J., Arora H. Investigating the potential of redundant manipulators in narrow channels // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2020. DOI:10.1177/0954406220964512

21. Ahuactzin J.M., Gupta K. A motion planning based approach for inverse kinematics of redundant robots: the kinematic roadmap // Proceedings of International Conference on Robotics and Automation. 1997. № 4. Pp. 3609–3614. DOI:10.1109/ROBOT.1997.606894.

22. Bertram D., Kuffner J., Dillmann R., Asfour T. An integrated approach to inverse kinematics and path planning for redundant manipulators // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2006). 2006. Pp. 1874–1879. DOI:10.1109/ROBOT.2006.1641979.

#### Информация об авторах

**Ганин Павел Евгеньевич**, ассистент, ведущий инженер кафедры управления и интеллектуальных технологий. E-mail: ganinpe@gmail.com. Национальный исследовательский университет «МЭИ». Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.

**Кобрин Александр Исаакович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин. E-mail: kobrinai@yandex.ru. Национальный исследовательский университет «МЭИ». Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.

Поступила 30.03.2021 г.

© Ганин П.Е., Кобрин А.И., 2021

**\*Ganin P.E., Kobrin A.I.**

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute"*

*\*E-mail: ganinpe@gmail.com*

## ALGORITHMS FOR KINEMATIC CONTROL OF MULTI-LINK MANIPULATION ROBOTS BASED ON A FUZZY NEURAL NETWORK

**Abstract.** *The paper considers the possibility of constructing a kinematic control algorithm for manipulating robots with a serial-connected links. The construction of a control system based on a fuzzy neural network is proposed. The results of experimental studies on the selection of parameters of a fuzzy neural network*



in accordance with the set optimality criterion (in terms of speed), taking into account the subsequent iterative refinement by the Newton-Raphson method, are presented. The following network parameters are considered: the number and type of node membership functions, the size of the training sample with a different number of training approaches. An algorithm for forming a training sample for fuzzy neural networks is proposed in order to reduce the positioning error of the working body of the manipulating mechanism near the outer boundary of the workspace. The possibility of adapting the kinematic control algorithms by adjusting the parameters of the membership functions in the network nodes when performing the same type of tasks, based on the data of the Newton-Raphson refinement algorithm, is demonstrated. In the framework of this work, a comparative analysis of the developed kinematic control algorithm with algorithms based on iterative and neural network methods for solving the inverse kinematics problem of a manipulative robot is carried out. The conclusion is made about the increase in the speed for calculations of kinematic control algorithms while maintaining the required accuracy.

**Keywords:** inverse kinematics problem, manipulative robot, fuzzy neural network, kinematic control algorithm, iterative refinement.

## REFERENCES

1. Jang J.-S.R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1993. No. 3 (23). Pp. 665–685. DOI:10.1109/21.256541.
2. Khadangi E., Madvar H.R., Ebadzadeh M.M. Comparison of ANFIS and RBF models in daily stream flow forecasting. 2nd International Conference on Computer, Control and Communication. 2009. Pp. 1–6. DOI:10.1109/IC4.2009.4909240.
3. Menten A., Yetkin M., Kim Y. Comparison of ANN and ANFIS techniques on modelling of spread mooring systems. The 30th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, TEAM 2016. 2012. Pp. 1–10.
4. Suparta W., Alhasa K.M. A comparison of ANFIS and MLP models for the prediction of precipitable water vapor. *IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace)*. 2013. Pp. 243–248. DOI:10.1109/IconSpace.2013.6599473.
5. Das L., Nanda J., Mahapatra S.S. A Comparative Study of Prediction of Inverse Kinematics Solution of 2-DOF, 3-DOF and 5-DOF Redundant Manipulators by ANFIS. *IJCSN International Journal of Computer Science and Network*. 2014. No. 5 (3). Pp. 304–308.
6. Alavandar S., Nigam M.J. Neuro-Fuzzy based Approach for Inverse Kinematics Solution of Industrial Robot Manipulators. *Int. J. of Computers, Communications & Control*. 2008. No.3. Pp. 224–234.
7. Nikhade G.R., Chiddarwar S.S., Deshpande V. S. Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) for Generation of Joint Angle Trajectory. *Asian International Journal of Science and Technology in Production and Manufacturing Engineering*. 2013. № 2 (6). Pp. 25–32.
8. Hendaro H.A., Munadi, Setiawan J.D. ANFIS application for calculating inverse kinematics of programmable universal machine for assembly (PUMA) robot. 2014 The 1st International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering. 2014. Pp. 35–40. DOI:10.1109/ICITACEE.2014.7065710.
9. Mashhadany Y.I. AI ANFIS-Inverse-Controlled PUMA 560 Workspace Robot with Spherical Wrist. *Procedia Engineering*. 2012. (41). Pp. 700–709. DOI:10.1016/j.proeng.2012.07.232.
10. Narayana P.V., Ramana N.V. Prediction of inverse kinematics solution of a Puma manipulator using ANFIS. *Int J Adv Eng Res*. 2014; No.3(2): Pp. 84–88.
11. Bachir O., Zoubir A.-F. Adaptive Neuro-fuzzy Inference System Based Control of puma 600 Robot Manipulator. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2011. No. 1 (2). Pp. 90–97. DOI:10.11591/ijece.v2i1.116.
12. Nakhon N., Napol V., Chowarit C. ANFIS inverse kinematics method in bilateral control system based on DOB of delta robot. 18th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2015. 2016. Pp. 1314–1318. DOI:10.1109/ICEMS.2015.7385242.
13. Jha P., Biswal B.B. Intelligent Computation and Kinematics of 4-DOF SCARA Manipulator Using ANN and ANFIS. *Evolutionary, and Memetic Computing. SEMCCO*. 2013. Vol. 8298. Pp. 277–286. DOI: 10.1007/978-3-319-03756-1\_25
14. Jasim W.M. Solution of Inverse Kinematics for SCARA Manipulator Using Adaptive Neuro-Fuzzy Network. *International Journal on Soft Computing (IJSC)*. 2011. No.2(4). Pp. 59–66.
15. Pérez-Rodríguez R., Marcano-Cedeño A., Costa Ú., Solana J., Cáceres C., Opisso E., Tormos J.M., Medina J., Gómez E.J. Inverse kinematics of a 6 DoF human upper limb using ANFIS and ANN for anticipatory actuation in ADL-based physical Neurorehabilitation. *Expert Systems with Applications*. 2012. No. 10 (39). Pp. 9612–9622. DOI:10.1016/j.eswa.2012.02.143.
16. Sanjaya W.S.M., Anggraeni D., Munawwaroh M., Nurasyidiek M., Rahayu D., Samudin A., Santika I., Kinarya P. E. Colored Object Sorting using 5 DoF Robot Arm based Artificial

Neural Network (ANN) Method. Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1090. Pp. 12-70.

17. Beheshti M.T.H., Tehrani A.K., Ghanbari B. An optimized adaptive fuzzy inverse kinematics solution for redundant manipulators. IEEE International Symposium on Intelligent Control ISIC-03. 2003. No. 2. Pp. 924-929. DOI:10.1109/ISIC.2003.1254760.

18. Hasan A.T., Hamouda A.M.S., Ismail N., Al-Assadi H.M.A.A. An adaptive-learning algorithm to solve the inverse kinematics problem of a 6 D.O.F serial robot manipulator. Advances in Engineering Software. 2006. No. 7 (37). Pp. 432-438. DOI:10.1016/j.advensoft.2005.09.010.

19. Mayorga R. V., Sanongboon P. An Artificial Neural Network Approach for Inverse Kinematics Computation and Singularities Prevention of Redundant Manipulators. Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2005. No. 1 (44). Pp. 1-23. DOI:10.1007/s10846-005-9000-x.

20. Singla A., Narayan J., Arora H. Investigating the potential of redundant manipulators in narrow channels. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2020. DOI:10.1177/0954406220964512

21. Ahuactzin J.M., Gupta K. A motion planning based approach for inverse kinematics of redundant robots: the kinematic roadmap. Proceedings of International Conference on Robotics and Automation. 1997. No. 4. Pp. 3609-3614. DOI:10.1109/ROBOT.1997.606894.

22. Bertram D., Kuffner J., Dillmann R., Asfour T. An integrated approach to inverse kinematics and path planning for redundant manipulators. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2006). 2006. Pp. 1874-1879. DOI:10.1109/ROBOT.2006.1641979.

#### *Information about the authors*

**Ganin, Pavel E.** Assistant professor. E-mail: ganinpe@gmail.com. National Research University "Moscow Power Engineering Institute". Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14.

**Kobrin, Alexander I.** Dr. Sci. (Phys.-Math), Professor. E-mail: kobrinai@yandex.ru. National Research University "Moscow Power Engineering Institute". Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14.

---

*Received 30.03.2021*

#### **Для цитирования:**

Ганин П.Е., Кобрин А.И. Алгоритмы кинематического управления многозвенными манипуляционными роботами на основе нечёткой нейронной сети // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 6. С. 87-97. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-87-97

#### **For citation:**

Ganin P.E., Kobrin A.I. Algorithms for kinematic control of multi-link manipulation robots based on a fuzzy neural network. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 6. Pp. 87-97. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-87-97