

Научно-теоретический журнал

# ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

2

2023

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

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

**№ 2, 2023 год**

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

**Vol. 2. 2023**

# 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:

- 2.1.1. – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
- 2.1.3. – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)
- 2.1.5. – Строительные материалы и изделия (технические науки)
- 2.1.11. – Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура)
- 2.1.12. – Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура)
- 2.1.13. – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)
- 2.1.13. – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура)
- 2.6.14. – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)
- 2.5.4. – Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки)
- 2.5.5. – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 2.5.6. – Технология машиностроения (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 представляются 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. (+12)<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>                                 | 15.02.2023                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Выход в свет</b>                                      | 27.02.2023                                                                                                                                                                                                                                                              |

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 13,02. Уч.-изд. л. 14,00. Тираж 40 экз. Заказ № 18

# 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:

- 2.1.1. – Building structures, constructions and facilities (technical sciences)
- 2.1.3. – Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (technical sciences)
- 2.1.5. – Building materials and products (technical sciences)
- 2.1.11. – Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture)
- 2.1.12. – Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture)
- 2.1.13. – Urban planning, rural settlement planning (technical sciences)
- 2.1.13. – Urban planning, rural settlement planning (architecture)
- 2.6.14. – Technology of silicate and refractory nonmetallic materials (technical sciences)
- 2.5.4. – Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences)
- 2.5.5. – Technology and equipment of mechanical and physical-technical processing (technical sciences)
- 2.5.6. – Engineering technology (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>            | 15.02.2023                                                                                                                                                                                                                           |



**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).

**Бурьянов Александр Федорович**, д-р техн. наук, проф. НИУ Московского государственного строительного университета (РФ, г. Москва), исполнительный директор Российской гипсовой ассоциации (РФ, г. Москва).

**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).

**Ильницкая 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).

**Леонovich 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., н.о. директора Высшей школы архитектуры и дизайна, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (РФ, г. Санкт-Петербург).

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

**Потанов 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).

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

## CHIEF EDITOR

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

## DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

## MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

**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).

**Aleksandr F. Buryanov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of civil engineering (National research university). (Russian Federation, Moscow).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**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, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Russian Federation, Belgorod).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

|                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Аль Мамури Саад Кхалил Шадид, Загороднюк Л.Х., Сумской Д.А.,<br/>Бочарников А.Л., Шеметова О.М.</b>                                                     |    |
| ВЯЖУЩИЕ КОМПОЗИЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРМИКУЛИТА<br>ДЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ РАСТВОРОВ                                                                             | 8  |
| <b>Наумов А.Е., Кучеренко А.С., Бобровников Е.А., Корольская А.И.</b>                                                                                      |    |
| ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ БИБЛИОТЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАК ЭФФЕКТИВНОЕ<br>СРЕДСТВО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО<br>МОДЕЛИРОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ            | 20 |
| <b>Мозголов М.В., Козлова Е.В.</b>                                                                                                                         |    |
| ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ SCAD ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО КЕССОННОГО<br>ПЕРЕКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА РАСЧЕТА,<br>УЧИТЫВАЮЩЕГО ПРОЛЕТЫ И ЖЕСТКОСТЬ КОНСТРУКЦИИ | 29 |
| <b>Колчунов Вл.И., Козарез А.В., Протченко М.В.</b>                                                                                                        |    |
| РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ<br>ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ДЕФОРМИРУЕМОМ ОСНОВАНИИ<br>ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ                 | 41 |
| <b>Боровской А.Е., Смирнова А.Ю., Перькова М.В., Смирнов К.Л., Бердников М.Н.</b>                                                                          |    |
| МАЯТНИКОВЫЕ МИГРАЦИОННЫЕ ПОТОКИ БЕЛГОРОДСКОЙ<br>АГЛОМЕРИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ                                                                                | 53 |
| <b>Бобнева А.Н.</b>                                                                                                                                        |    |
| СТРАТЕГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЪЕЗДОВ ТРАНСПОРТНЫХ РАЗВЯЗОК<br>В УСЛОВИЯХ ПЛОТНОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ                                                           | 67 |
| <b>Чикаев И.И.</b>                                                                                                                                         |    |
| ФОРМООБРАЗУЮЩАЯ РОЛЬ ЛИНИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ФАСАДНЫХ<br>РЕШЕНИЙ ЗДАНИЙ                                                                                     | 77 |
| <b>Жданова И.В., Кузнецова А.А.</b>                                                                                                                        |    |
| ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ ОКОЛОНУЛЕВОГО<br>ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ                                                                                 | 85 |

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Коленчуков О.А., Петровский Э.А.</b>                                                                               |     |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМОКОНТАКТНЫХ<br>ПОВЕРХНОСТЕЙ ИНТЕНСИФИКАТОРОВ ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ<br>ПРОЦЕССОВ | 94  |
| <b>Григоренко А.А., Шопина Е.В.</b>                                                                                   |     |
| ВЫПОЛНЕНИЕ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНА И АДАПТАЦИЯ<br>К ИЗГОТОВЛЕНИЮ ПОВОРОТНОГО КУЛАКА. ЧАСТЬ II                           | 102 |

## CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Al Mamouri Saad Khalil Shadid, Zagorodniuk L.Kh., Sumskey D.A.,<br/>Bocharnikov A.L., Shemetova O.M.</b>                                                       |    |
| BINDING COMPOSITIONS USING VERMICULITE FOR HEAT PROTECTIVE SOLUTIONS                                                                                              | 8  |
| <b>Naumov A.E., Kucherenko A.S., Bobrovnikov E.A., Korolskaya A.I.</b>                                                                                            |    |
| PARAMETRIC LIBRARY ELEMENTS AS AN EFFECTIVE TOOL FOR IMPROVING INFORMATION MODELING TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION                                                  | 20 |
| <b>Mozgolev M.V., Kozlova E.V.</b>                                                                                                                                |    |
| VERIFICATION OF SCAD MODELS OF REINFORCED CONCRETE COFFERED FLOOR BASED ON AN ANALYTICAL CALCULATION METHOD THAT TAKES INTO ACCOUNT SPANS AND STRUCTURAL RIGIDITY | 29 |
| <b>Kolchunov V.I., Kozarez A.V., Protchenko M.V.</b>                                                                                                              |    |
| RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES RESISTANCE ON A DEFORMABLE BASE IN BENDING WITH TORSION                                        | 41 |
| <b>Borovskoy A.E., Smirnova A.Y., Perkova M.V., Smirnov K.L., Berdnikov M.N.</b>                                                                                  |    |
| PENDULUM MIGRATION FLOWS OF THE BELGOROD AGGLOMERATED TERRITORY                                                                                                   | 53 |
| <b>Bobneva A.N.</b>                                                                                                                                               |    |
| STRATEGY FOR RAMP DESIGN ON TRANSPORT INTERCHANGES IN DENSELY BUILT-UP URBAN AREAS                                                                                | 67 |
| <b>Chikaev I.I.</b>                                                                                                                                               |    |
| SHAPING ROLE OF THE LINE IN THE FORMATION OF FAÇADE SOLUTIONS OF BUILDINGS                                                                                        | 77 |
| <b>Zhdanova I.V., Kuznetsova A.A.</b>                                                                                                                             |    |
| FEATURES OF DESIGNING RESIDENTIAL BUILDINGS WITH NEARLY ZERO ENERGY CONSUMPTION                                                                                   | 85 |

## MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

|                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Kolenchukov O.A., Petrovsky E.A.</b>                                                                          |     |
| STUDY OF THE TECHNOLOGY FOR FORMATION OF THERMAL CONTACT SURFACES OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESS INTENSIFIERS | 94  |
| <b>Grigorenko A.A., Shopina E.V.</b>                                                                             |     |
| GENERATIVE DESIGN AND ADAPTATION FOR MANUFACTURING OF STEERING KNUCKLE. PART II                                  | 102 |

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-8-19

Аль Мамури Саад Кхалил Шахид, \*Загороднюк Л.Х., Сумской Д.А., Бочарников А.Л.,  
Шеметова О.М.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: lhz47@mail.ru

## ВЯЖУЩИЕ КОМПОЗИЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРМИКУЛИТА ДЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ РАСТВОРОВ

**Аннотация.** В статье изложены результаты исследования цементных растворов, содержащих вспученный вермикулит как наполнитель. Установлено, что при использовании вермикулита до 30 % и более, растворы обладают хорошими теплоизоляционными свойствами, но низкими показателями прочности при сжатии. Особенности природы вспученного вермикулита способствуют снижению плотности и обеспечению теплозащитных свойств. Механоактивация вяжущих композиций в зависимости от продолжительности обработки в вибрационной мельнице составов: портландцемент 90–70 %, вермикулит 10–30 %, позволила получить плотность в диапазоне 1720–1933 кг/м<sup>3</sup>, при прочности на сжатие 42,8–58,2 МПа, при экономии до 10–20 % дорогостоящего энергоёмкого цемента.

Цементный камень из вяжущих композиций создается за счет формирования пространственного каркаса, создаваемого пористым минеральным наполнителем, который за счет высокой дисперсности занимает значительный пространственный объем, и на этом минеральном наполнителе, как на подложках, формируется кристаллическая структура, создаваемая гидросиликатами и гидроалюминатами кальция, постепенно наращая как бы вторичный каркас кристаллическими новообразованиями на тонкодисперсных вермикулитовых зернах – пластинках. Разработанное вяжущее обладает пористой структурой за счет введения вермикулитового наполнителя, что обеспечивает снижение теплопроводности создаваемого композита.

Применение полученных вяжущих композиций, приготовленных из смеси портландцемента и вермикулита, в сочетании с пористым наполнителем – вспученным вермикулитом, позволит получить теплоизоляционный раствор с высокими теплозащитными показателями и гарантированной прочностью.

**Ключевые слова:** вспученный вермикулит, вяжущая композиция, теплозащитные растворы, портландцемент, низкая плотность, микроструктура.

**Введение.** В последние годы возрос интерес к созданию материалов, обладающих высокими теплозащитными свойствами, а также устойчивых к высоким температурам. Стойкость строительных материалов к воздействию высоких температур имеет огромное значение, особенно во время пожара. Штукатурные растворы с повышенной стойкостью к повышенным температурам могут обеспечить надежную пожарную защиту. Одним из способов повышения теплозащитных и термостойких материалов является использование в теплоизоляционных растворах эффективных заполнителей, имеющих пористое строение и обладающих термостойкими свойствами. В результате многолетних исследований российскими и зарубежными учеными накоплен значительный положительный опыт применения при создании легких растворов и бетонов различных пористых заполнителей, в частности, пемзы [1], диатомита [2], вулканического туфа, вспученного вермикулита [3], вспученного перлита [4–7], а также вспученной глины [8]. Особую значимость в современных условиях представляет

использование отходов различных производств [9], скорлупы масличной пальмы [10], каучука [11], пенополистирола для вторичного использования.

Особый интерес для создания эффективных теплозащитных растворов представляют такие легкие заполнители, как природный вермикулитовый заполнитель [12–15] входящий в группу гидрослюдистых минералов; перлит, пенополистирол [16–20], обладая низкой плотностью, они с успехом применяются в качестве легких заполнителей в легких растворах и обеспечивают высокие теплоизоляционные свойства [8, 9]. Вследствие высокой пористости указанных материалов, применение их в штукатурных теплоизоляционных растворах, позволит обеспечить повышенную теплозащиту наружных конструкций.

Вермикулиты – это минералы из группы гидрослюдов с переменным химическим составом  $(\text{Mg, Fe})_3[(\text{Al, Si})_4\text{O}_{10}] \cdot (\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . Дифрактограмма вспученного вермикулита ( $d = 11,38; 4,54; 3,45; 2,66; 2,43; 2,19; 1,70; 1,44 \text{ \AA}$ ) приведена на рисунке 1.

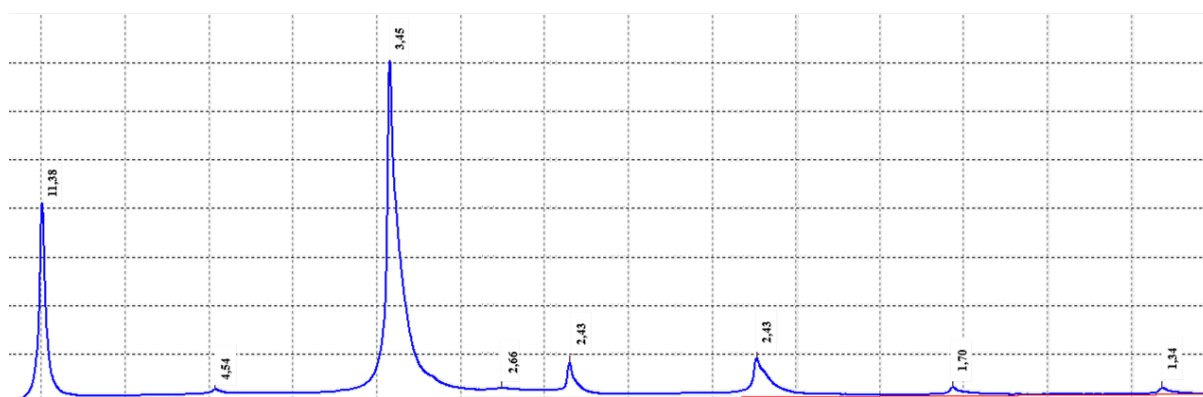


Рис. 1. Дифрактограмма вермикулита

При нагревании частицы вермикулита принимают форму удлинённых изогнутых и скрученных столбиков, образующихся в результате гидратации и других вторичных изменений различных слюд. Вермикулит состоит из мягких, гибких и неэластичных пластинок с совершенной спайностью, твердостью около 1,5 и представлен гидратированным силикатом магния, алюминия и железа, сформированным вследствие преобразования слюды, в которой слои первичной слюды чередуются с вермикулитом или гидробиотитом. Химический состав и физические свойства переходных разновидностей являются промежуточными между свойствами первичных слюд и собственно вермикулита. Вспученный перлит считается хорошим термостойким материалом, обладает звуко- и теплоизоляционными свойствами.

Вспученный вермикулит отличается от других пористых заполнителей пластинчатым строением, малой прочностью, особо сильно развитой поверхностью, большим водопоглощением и значительной деформативностью. Куски вспученного вермикулита состоят из разделенных одна от другой воздушными прослойками пластинок толщиной 0,02...0,05 мм, объединенных в более крупные пластины, которые соединяясь между собой, образуют мелкие «гармошки». Поэтому истинная поверхность кусков вспученного вермикулита значительно больше, чем у других пористых заполнителей. Прочность кусков при сжатии перпендикулярно слоям составляет 0,15...0,3 кг/см<sup>2</sup>, а параллельно слоям 0,5...0,9 кг/см<sup>2</sup>. Водопоглощение вспученного вермикулита колеблется от 120 % до 400 % по массе в зависимости от плотности и зернового состава. Теплопроводность зерен вдоль слоев почти в 2 раза больше, чем перпендикулярно к ним.

Структура вермикулита отличается тонким расслоением, наличием внутри вспученных пакетов большого количества крупных и мелких пор, имеющих продолговатую и замкнутую форму.

Площадь крупных пор составляет около 30 % от всей площади разреза. Площадь, занятая ве-

ществом, составляет около 5,5 % от общей площади. При этом мелкие поры занимают примерно до 64,5 % всей площади. Под микроскопом при увеличении хорошо видны мелкие и мельчайшие поры (рис. 2), причём для хорошего вермикулита характерно сравнительно равномерное их распределение. Пористая структура с перемычками придает вермикулиту прочность и некоторую упругость. Вспученные листки создают теплоизоляционный слой, отчего скорость дегидратации внутренних слоев уменьшается, соответственно снижается степень вспучивания и несколько удлиняется его продолжительность. Внутри вспученного вермикулита наблюдается расслоение разделившихся пластинок, образуются выпуклые линзы и крупные поры в них. Кроме того, внутри линз происходит расслоение на более мелкие хорошо вспученные области тех же форм.

Вспученный вермикулит имеет кубовидную форму и бугристую поверхность. Он дает хаотическую ориентировку кускам в засыпке, хорошо сцепляется с вяжущим, отчего требует при изготовлении меньшего расхода цемента, придавая композиту более высокую прочность (рис. 2).

Теплопроводность вспученного вермикулита зависит от плотности, температуры, размера кусков и ориентировки их по отношению к тепловому потоку. По данным Н.Н. Кальянова [21], при повышении температуры коэффициент теплопроводности увеличивается вследствие возрастающего влияния конвективного теплообмена внутри пор. При температуре до 100 °С теплопроводность мелких фракций больше, чем крупных, имеющих меньшую плотность. При более высоких температурах наблюдается обратная зависимость, так как конвективный теплообмен в крупных фракциях больше, чем в мелких. Таким образом, для теплоизоляции при обычных температурах целесообразно использовать крупные фракции, а при высоких - мелкие.





Рис. 2. Структура вермикулита

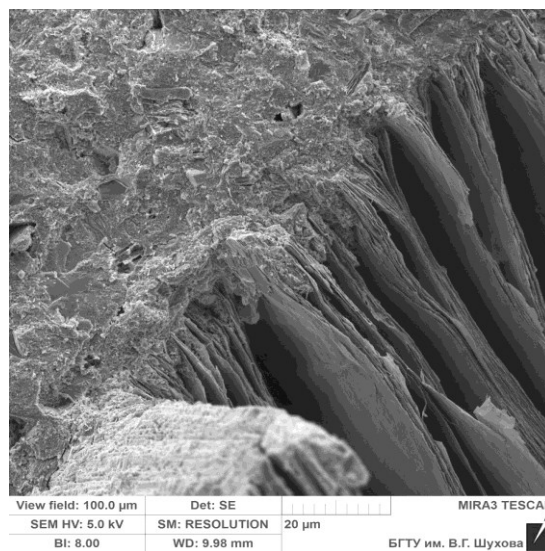


Рис. 3. Вспученный вермикулит на контакте с вяжущим

Целью работы является получение эффективных теплоизоляционных растворов с низкими показателями по плотности и необходимыми показателями по прочности с использованием вспученного вермикулита.

**Материалы и методы.** В работе в качестве сырьевых материалов для проведения испытаний использовали портландцемент ЦЕМ 0 42,5Н

ГОСТ 31108–2020 с удельной поверхностью  $308 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

В качестве легкого наполнителя использовали вспученный вермикулит, полученный в результате термообработки природного вермикулита Потанинского месторождения (Челябинской области). Химический состав вермикулита представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав вермикулита (% по массе)

| Химический состав, % |                                |                                |     |      |     |                   |                  |           |
|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|------|-----|-------------------|------------------|-----------|
| SiO <sub>2</sub>     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO | MgO  | CaO | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | Прочее, % |
| 43,3                 | 15,3                           | 13,4                           | 2,2 | 17,4 | 1,3 | 0,4               | 2,6              | 4,1       |

Механоактивацию вяжущих композиций различных составов проводили в вибрационной мельнице ВМ – 20. Продукты гидратации вяжущих композиций изучали методом рентгенофазового анализа на приборе ARL X'TRA Thermo Fisher Scientific. Исследование микроструктуры проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU.

Физико-механические и технологические характеристики вяжущих композиций определяли в соответствии нормативной документацией. Теплопроводность изучали на образцах размером  $150 \times 150 \times 20$  мм, высушенные до постоянной массы. Для проведения испытаний использовали прибор ИТС-1.

**Основная часть.** С целью разработки эффективных составов теплоизоляционных растворов с низкой плотностью, на первом этапе были изучены составы вяжущих композиций с использованием в смесях различных дозировок цемента: 90 %, 80 %, 70 % и соответственно вспученного вермикулита: 10 %, 20 %, 30 %. Варьировалось водоцементное отношение в смесях:

В/Ц = 0,3; 0,35; 0,4 с целью обеспечения одинаковой пластичности и хорошей формруемости.

Смешение компонентов производили вручную в одинаковых условиях путем встряхивания в течение 5 мин в емкости объемом 3 л. Из свежеприготовленного раствора формовали образцы-кубики размером  $30 \times 30 \times 30$  мм. Отформованные образцы выдерживали в нормальных условиях при температуре  $20 \pm 3$  °С в течение 28 суток. Испытания образцов на сжатие проводили на гидравлическом прессе ПГМ-100МГ4.

Анализ результатов физико-механических показателей вяжущих композиций свидетельствует (рис. 4), что при использовании цемента 90 % и вермикулита 10 % возможно получить плотность образцов  $1094 \text{ кг/м}^3$  при прочности на сжатие 1,7 МПа. Отмечается, что составы отформованные при В/Ц=0,35 и В/Ц=0,3 обладали соответственно низкой и очень низкой пластичностью, что затрудняло формование, вследствие недостаточного количества воды, хотя эти составы показали плотности  $1048\text{--}959 \text{ кг/м}^3$  при прочностях 1,2–0,8 МПа, соответственно.

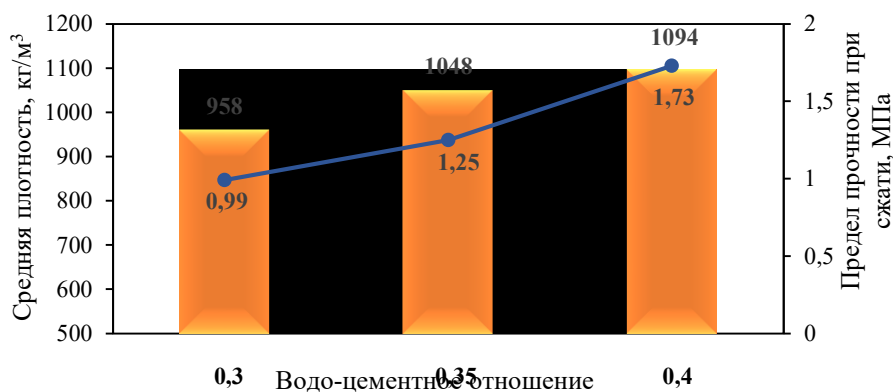


Рис. 4. Физико-механические показатели вяжущих композиций при различных В/Ц

Составы растворов, приготовленные с содержанием вермикулита 20 % и 30 %, имели плотности в диапазоне 468–363 кг/м³, однако образцы не обладали достаточной прочностью для испытаний на прессе, разрушаясь в руках при подготовке к испытаниям, поэтому в дальнейших исследованиях растворы с такой дозировкой не рассматривались.

Результаты испытаний растворов в соотношении цемент 90 % и вермикулит 10 % показали их эффективность и возможность получения растворов, обеспечивающих получение показателей плотности в диапазоне 1094–959 кг/м³ и показателей прочности на сжатие 0,8–1,63 МПа, однако, полученные результаты не обеспечили требуемых показателей по плотности, гарантировавших низкую теплопроводность. В связи с этим ставилась задача по поиску решения по снижению плотности раствора.

При рассмотрении состава сухой теплоизоляционной смеси отмечается, что составляющие смеси имеют значительные отличия в средней плотности (в рыхлом состоянии), так средняя плотность портландцемента составляет 1000–1100 кг/см³, а плотность вспученного вермикулита 60–100 кг/см³. Это и явилось предпосылкой для создания вяжущих композиций с пониженной плотностью и достаточной прочностью при сжатии с последующим применением их в создании раствора пониженной плотности. В связи с поставленной целью были приготовлены составы вяжущих композиций, включающих портландцемент и вспученный вермикулит в различных соотношениях и механоактивированных в вибрационной мельнице (табл. 2).

Таблица 2

**Составы и физико-механические характеристики вяжущих композиций, приготовленных в вибрационной мельнице**

| № составов | Время помола, мин | Состав %   |        | Удельная поверхность м²/кг | Физико-механические показатели в возрастах 7, 28 сут. |      |                  |
|------------|-------------------|------------|--------|----------------------------|-------------------------------------------------------|------|------------------|
|            |                   |            |        |                            | Прочность, МПа                                        |      | Плотность, кг/м³ |
|            |                   | вермикулит | цемент |                            | 7                                                     | 28   |                  |
| -          | 0                 | 0          | 100    | 308                        | 19,2                                                  | 48,1 | 2200             |
| 1-0        | 0                 | 10         | 90     | 308                        | 3,8                                                   | 9,6  | 1459             |
| 1-1        | 5                 | 10         | 90     | 504                        | 14,6                                                  | 36,4 | 1620             |
| 1-2        | 10                | 10         | 90     | 583                        | 18,2                                                  | 45,5 | 1803             |
| 1-3        | 15                | 10         | 90     | 597                        | 20,0                                                  | 50,1 | 1917             |
| 1-4        | 30                | 10         | 90     | 612                        | 23,3                                                  | 58,2 | 1933             |
| 1-5        | 40                | 10         | 90     | 600                        | 20,4                                                  | 51,0 | 1920             |
| 2-0        | 0                 | 20         | 80     | 275                        | 3,1                                                   | 7,9  | 1043             |
| 2-1        | 5                 | 20         | 80     | 517                        | 11,96                                                 | 29,9 | 1510             |
| 2-2        | 10                | 20         | 80     | 604                        | 16,0                                                  | 40,2 | 1650             |
| 2-3        | 15                | 20         | 80     | 612                        | 18,0                                                  | 45,2 | 1790             |
| 2-4        | 30                | 20         | 80     | 643                        | 20,3                                                  | 50,9 | 1881             |
| 2-5        | 40                | 20         | 80     | 620                        | 18,6                                                  | 46,5 | 1795             |
| 3-0        | 0                 | 30         | 70     | 275                        | 2,0                                                   | 5,2  | 951              |
| 3-1        | 5                 | 30         | 70     | 546                        | 7,8                                                   | 19,7 | 1400             |
| 3-2        | 10                | 30         | 70     | 616                        | 11,1                                                  | 27,8 | 1530             |
| 3-3        | 15                | 30         | 70     | 642                        | 13,6                                                  | 34,2 | 1650             |
| 3-4        | 30                | 30         | 70     | 722                        | 17,1                                                  | 42,8 | 1720             |
| 3-5        | 40                | 30         | 70     | 650                        | 14,2                                                  | 35,5 | 1665             |



Для всех составов вяжущих композиций, приготовленных в вибрационной мельнице (рис. 5) отмечается, что при продолжительности помола возрастает удельная поверхность, при этом отмечается, что наибольший прирост удельной поверхности наблюдается к 10 мин времени помола, свыше этой величины эффективность помола снижается у составов композиционных вяжущих, содержащих 10–20 % вермикулита. Наблюдается увеличение удельной поверхности у состава вяжущей композиции с 30 % вермикулита, что связано со значительным содержанием минерального наполнителя, представленного выветренной осадочной породой вермикулита, что связано с его генезисом. Полученные данные свидетельствуют, что с увеличением продолжительности помола снижается прочность вяжущих композиций, вследствие переизмельчения минерального наполнителя,

выступающего в качестве минеральной подложки для формирования кристаллической структуры композита.

Сравнительные показатели средней плотности и прочности на сжатие гидратированных вяжущих композиций различных составов (табл. 2, рис. 6, 7), механоактивированных в вибрационной мельнице, свидетельствуют об эффективности механообработки. Так, если плотность исходного гидратированного портландцемента составляет  $2200 \text{ кг/м}^3$ , то перемешанная вручную смесь при соотношении портландцемента 90 % и вермикулита 10 % имеет плотность  $1459 \text{ кг/м}^3$  (состав 1-0). С увеличением продолжительности механоактивации указанных составов до 30 мин плотность возрастает до  $1933 \text{ кг/м}^3$  (состав 1–4), при дальнейшей активации до 40 мин. (состав 1–5), показатель плотности снижается до  $1920 \text{ кг/м}^3$ .

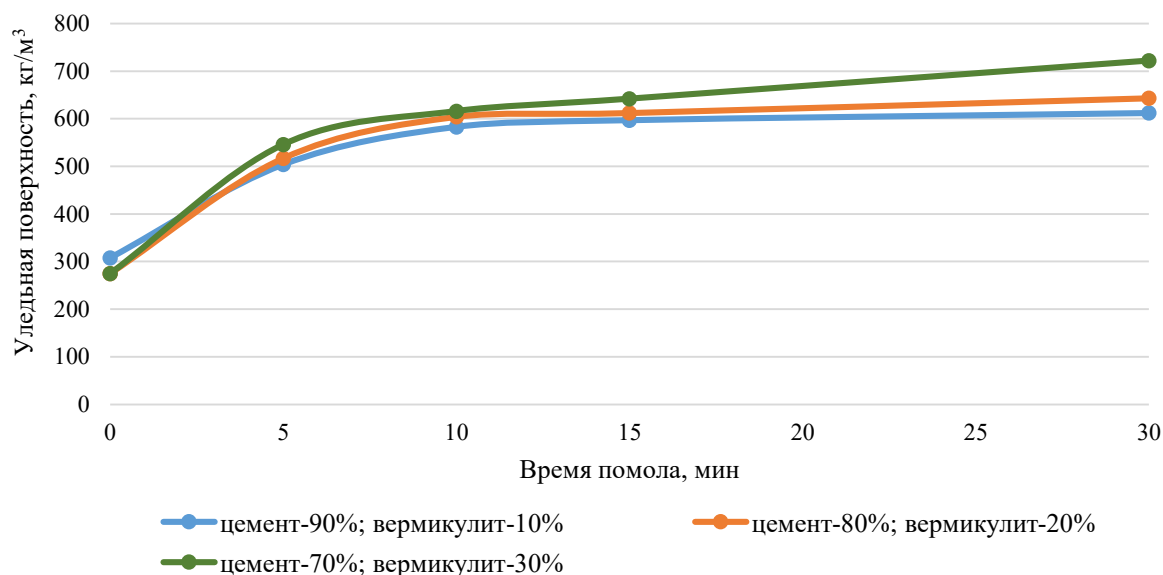


Рис. 5. Влияние продолжительности помола на удельную поверхность вяжущих композиций

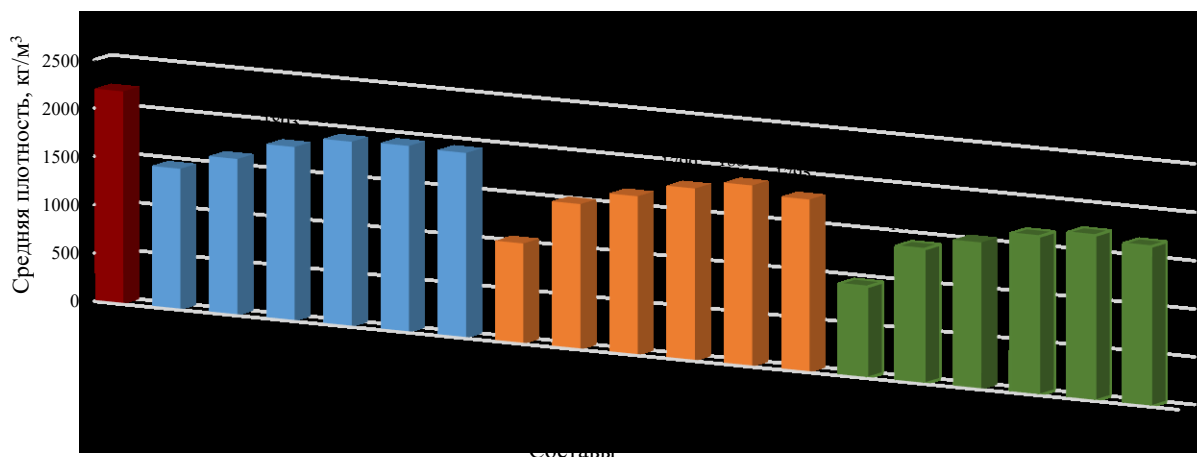


Рис. 6. Сравнительные показатели средней плотности вяжущих композиций различных составов, приготовленных в вибрационной мельнице в возрасте 28 суток

Рассматривая смеси состава портландцемент 80 % и вермикулит 20 %, следует отметить, что ручное смешение обеспечило плотность  $1043 \text{ кг/м}^3$  (состав 2-0), обусловленную меньшим содержанием портландцемента в сравнении с составами 1-5. Анализ изменения плотности с  $1510 \text{ кг/м}^3$  до  $1881 \text{ кг/м}^3$ , гидратированных вяжущих композиций составов с 2-1 по 2-4, указывает на увеличение плотности составов до продолжительности помола до 30 мин.

При дальнейшей механоактивации средняя плотность композиции состава 2-5 снижается до

$1795 \text{ кг/м}^3$ , что связано с уменьшением удельной поверхности материала, так как в составе присутствуют сырьевые компоненты с различными исходными плотностями, минеральным составом и особенностями их структур.

Гидратированные вяжущие композиции составов 70 % портландцемента и 30 % вермикулита ручного смешения, имеют плотность  $951 \text{ кг/м}^3$  вследствие значительного содержания пористого наполнителя.

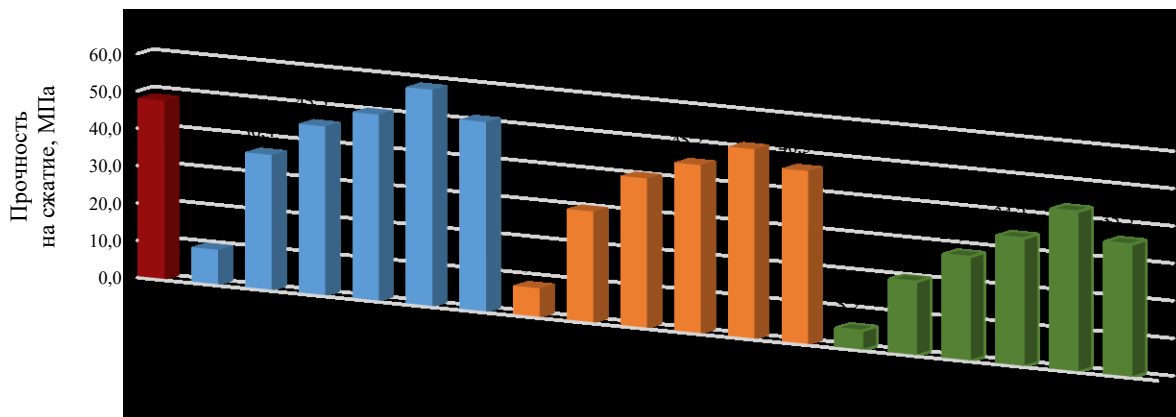


Рис. 7. Сравнительные показатели прочности на сжатие вяжущих композиций различных составов, приготовленных в вибрационной мельнице в возрасте 28 суток

Механоактивация составов с 3-1 по 3-4 при различной продолжительности помола показала, что наблюдается увеличение средней плотности с  $1400 \text{ кг/м}^3$  до  $1720 \text{ кг/м}^3$  у составов с 3-1 по 3-4, а затем средняя плотность снижается до  $1665 \text{ кг/м}^3$  при дальнейшей активации до 40 мин (состав 3-5).

Результаты исследований влияния длительности механоактивации на среднюю плотность составов с различным содержанием портландцемента и вермикулита свидетельствует, что все составы независимо от количества наполнителя при механоактивации до 30 мин приобретают наибольшую плотность, при которой формируется наиболее эффективная структура вяжущих композиций.

Предел прочности при сжатии гидратированных вяжущих композиций составов с 1-1 по 3-5 (табл. 2) изменяется прямо пропорционально показателям средних плотностей.

Механоактивация вяжущих композиций в зависимости от продолжительности обработки в сравнении с неактивированными смесями увеличивает прочность на сжатие в возрасте 28 суток: для состава 1-0 (9,6 МПа) в 3,8–6,1 раза, для состава 2-0 (7,9 МПа) в 3,8–6,5 раза и для состава 3-0 (5,2 МПа) в 3,8–8,2 раза.

Таким образом, механоактивация в вибрационной мельнице исследуемых композиций при продолжительности механообработки до 30 мин позволяет получить вяжущие композиции с высокими показателями предела прочности при сжатии, превосходящие показатели исходного цемента на 20,1 % для состава: портландцемент 90 % и вермикулит 10 % (составов 1-4); на 6 % для состава: портландцемент 80 % и вермикулит 20 % (состав 2-4), а также позволяющие экономить до 10 – 20 % дорогостоящего энергоёмкого цемента.

Проведенными исследованиями по определению теплопроводности вяжущей композиции был установлен показатель теплопроводности, равный  $0,06 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ . Применение полученных вяжущих композиций, приготовленных из смеси портландцемента и вермикулита, в сочетании с пористым заполнителем – вспученным вермикулитом в соответствии законом сродства структур [6], позволит получить теплоизоляционный раствор с высокими теплозащитными показателями и гарантированной прочностью.

Сравнительный рентгенофазовый анализ гидратированной вяжущей композиции состава 1-4 (рис. 9) с гидратированным портландцементом (рис. 8) в возрасте 28 суток показал, что дифрактограммы вяжущих композиций содержат

все фазы, свойственные портландцементу:  $(\text{Ca})\text{OH}_2$  ( $d=4,93; 3,11; 2,63; 1,93; 1,79$ );  $\text{CSH(I)}$  ( $d=3,04; 2,88; 1,83; 2,78; 1,66$  Å);  $\text{CSH(II)}$  ( $d=9,8; 3,04; 2,88; 2,81; 1,84$  Å);  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$  ( $d=9,83; 5,62;$

$4,69; 5,88; 3,48; 3,25; 2,72; 2,55; 2,25; 2,19$  Å), а также дифракционные максимумы, присущие вермикулиту: ( $d=11,38; 4,54; 3,45; 2,66; 2,43; 2,19; 1,70; 1,44$  Å).

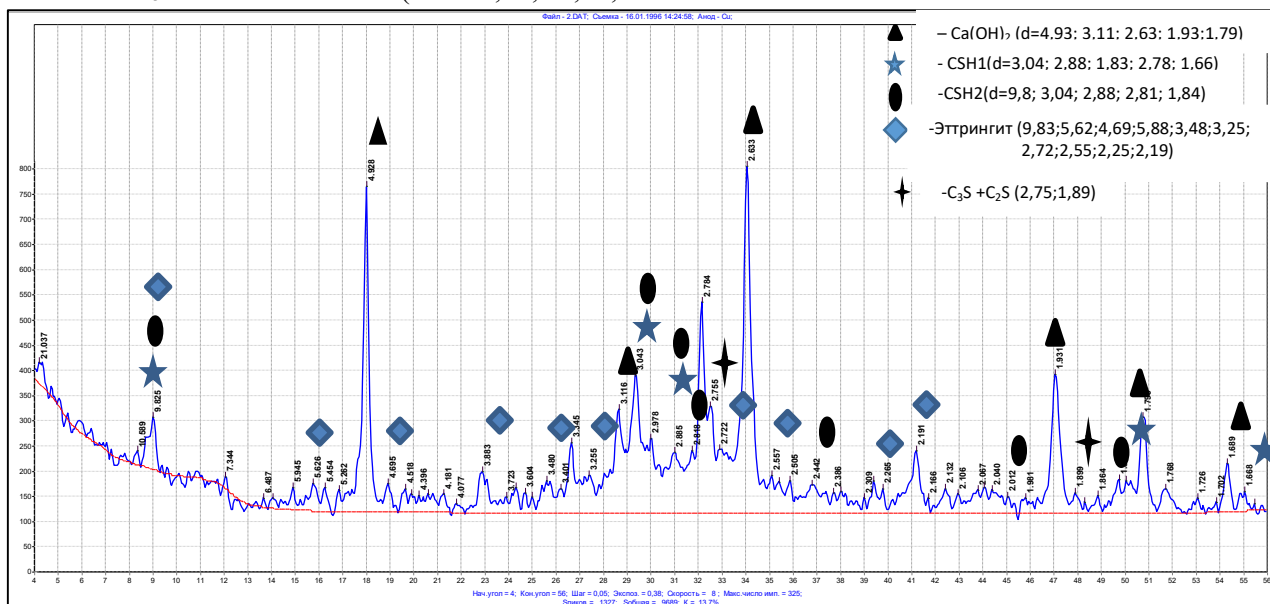


Рис. 8. Дифрактограмма гидратированного портландцемента в возрасте 28 сут

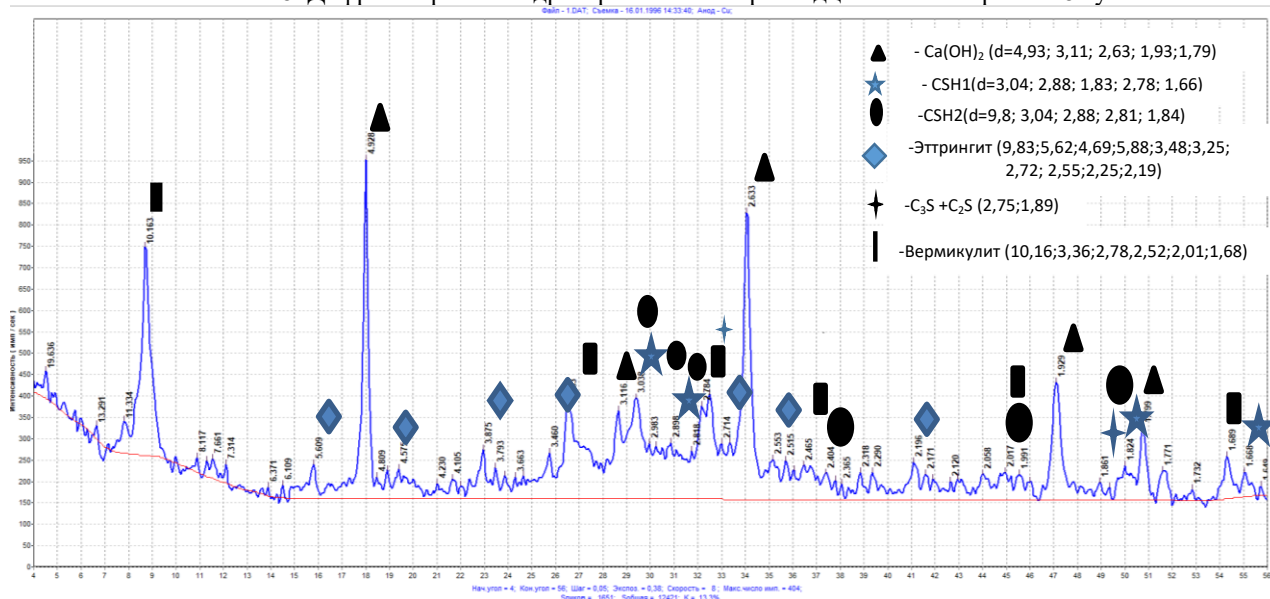
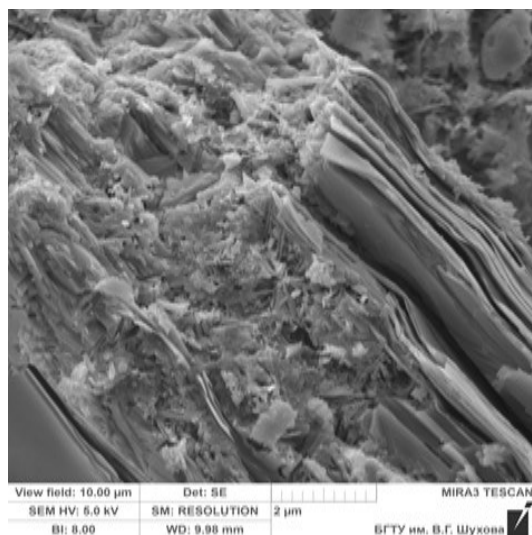


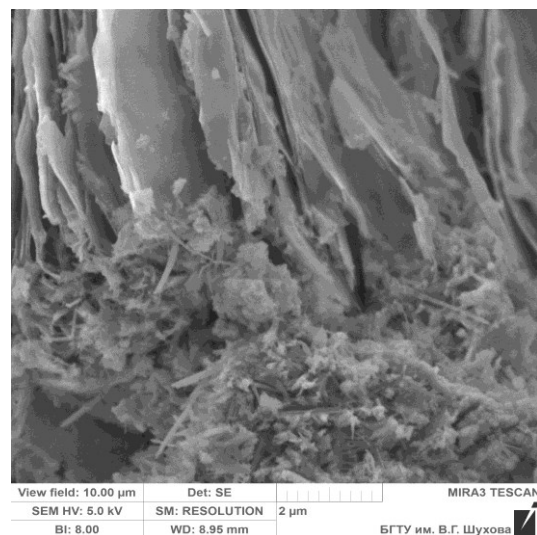
Рис. 9. Дифрактограмма гидратированной вяжущей композиции состава 1-4 в возрасте 28 сут

Изучение микроструктуры цементных камней вяжущих композиций наилучших составов 1-4; 2-4; 3-4; в возрасте 7 и 28 суток, представленных на (рис. 10) свидетельствует, что все образцы, изготовленные на основе вяжущей композиции и различного количества минеральной добавки, имеют незначительные отличия, обусловленные количественным присутствием вермикулитового наполнителя. Во всех образцах отмечается слитная структура и значительное количество пор, созданных пористым вермикулитовым наполнителем, также отмечается пористость по всему объему, в этих порах прорастают гидросиликаты кальция и алюминия. Отчетливо просмат-

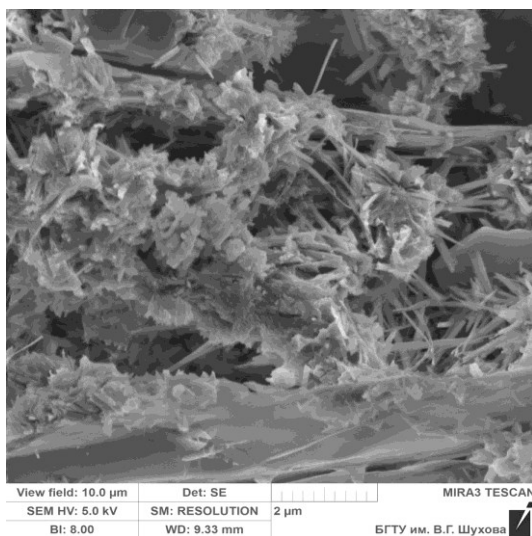
ривается формирование контактных зон на границах вермикулитового наполнителя и формирующихся кристаллогидратов. Следует отметить, что на поверхностях наполнителя, как на подложке формируется равномерная кристаллическая структура, пронизывающая весь композит по объему, отчетливо видны срастания кристаллогидратов различных фаз. Микрофотографии свидетельствуют о текущем формировании гидроалюминатов и гидросиликатов в возрасте 7 и 28 суток, что свидетельствует о дальнейшем нарастании прочности в образце. Данные микроскопических исследований, четко согласуются с результатами и физико-механических испытаний.



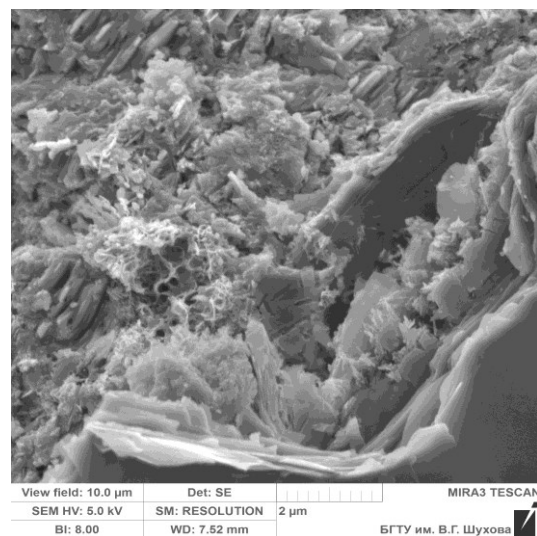
Микроструктура цементного камня из вяжущей композиции состава 1–4 в возрасте 7 суток



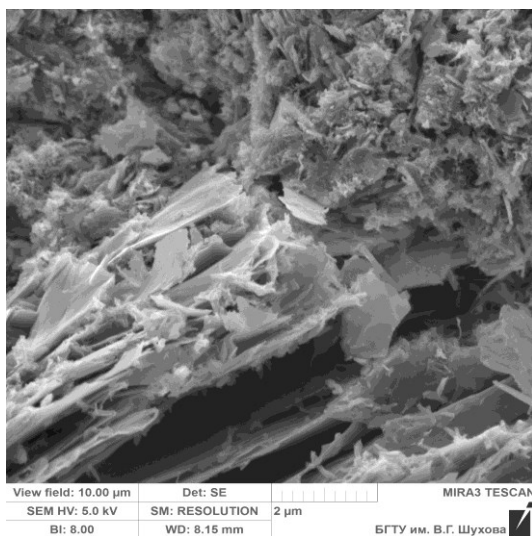
Микроструктура цементного камня из вяжущей композиции состава 1–4 в возрасте 28 суток



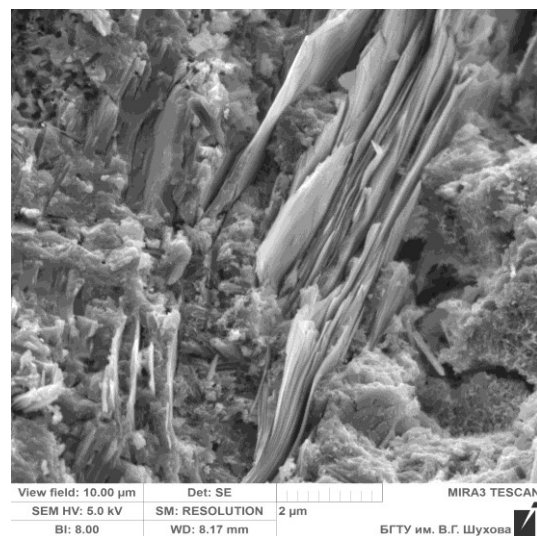
Микроструктура цементного камня из вяжущей композиции состава 2–4 в возрасте 7 суток



Микроструктура цементного камня из вяжущей композиции состава 2–4 в возрасте 28 суток



Микроструктура цементного камня из вяжущей композиции состава 3–4 в возрасте 7 суток



Микроструктура цементного камня из вяжущей композиции состава 3–4 в возрасте 28 суток

Рис. 10. Микроструктура цементных камней из вяжущих композиций, составов 1–4, 2–4, 3–4 в возрасте 7 и 28 суток

**Выводы.** Цементный камень из разработанных вяжущих композиций создается за счет формирования пространственного каркаса, создаваемого пористым минеральным наполнителем, который за счет высокой дисперсности занимает значительный пространственный объем и на этом минеральном наполнителе, как на подложках, формируется кристаллическая структура, создаваемая гидросиликатами и гидроалюминатами кальция, постепенно наращивая как бы вторичный каркас кристаллическими новообразованиями на тонкодисперсных вермикулитовых зернах – пластинах. Разработанная вяжущая композиция обладает пористой структурой за счет введения вермикулитового наполнителя, что обеспечивает снижение теплопроводности создаваемого композита.

Применение разработанных вяжущих композиций с высокими показателями по прочности до 58,2 МПа и относительно низкой плотностью 1933 кг/м<sup>3</sup> позволят получить теплозащитные растворы, за счет создания пространственного высокопрочного каркаса и обеспечит высокие теплозащитные и термостойкие свойства строительным растворам и бетонам.

**Источник финансирования.** Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> и Правительства Белгородской области, Соглашение №3 от 24.03.2022.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Degirmenci N., Arin N.Y. Use of pumice fine aggregate as an alternative to standard sand in production of lightweight cement mortar // *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. 2011. Vol. 18. Pp. 61–68.
2. Unal O., Uygunoglu T., Yildiz A. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation // *Building and Environment*. 2007. Vol. 42. Pp. 584–590.
3. Koksall F., Gencel O., Hagh-Lobland H.E., Brostow W. Effect of high temperature on mechanical and physical properties of lightweight cement based refractory including expanded vermiculite // *Materials Research Innovations*. 2012. Vol. 16. Iss. 1. Pp. 7–13.
4. Zagorodnyuk L., Sumskoy D., Lesovik V., Fediuk R. Modified heat insulating binder using jet-grinded waste of expanded perlite sand // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 260. Pp. 120440. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120440.
5. Загороднюк Л.Х., Рахимбаев Ш.М., Сумской Д.А., Рыжих В.Д. Особенности процессов гидратации вяжущих композиций с использованием отходов вспученного перлитового песка // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 11. С. 75–88. DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88.
6. Лесовик В. С., Загороднюк Л. Х., Чулкова И. Л. Закон сродства структур в материаловедении // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 3-2. С. 267–271.
7. Lanzon M., Garcia-Ruiz P.A. Lightweight cement mortars: advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability // *Construction Building Materials*. 2008. Vol. 22. Iss. 8. Pp. 1798–1806.
8. Munoz-Ruiperez C., Rodriguez A., Gutierrez-Gonzales S., Calderon V. Lightweight masonry mortars made with expanded clay and recycled aggregates // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 118. Pp. 139–145.
9. Kayali O. Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete // *Construction Building Materials*. 2008. Vol. 22. Iss. 12. Pp. 2393–2399.
10. Shafagh P., Jumaat M.Z., Mahmud H. Oil palm Shell as lightweight aggregate for production high strength lightweight concrete // *Construction Building Materials*. 2011. Vol. 25. Iss. 4. Pp. 1848–1853.
11. Merino M.R., Astorqui J.S.C., Cortina M.G. Viability analysis and constructive applications of lightened mortar (rubber cement mortar) // *Construction and Building Materials*. 2007. Vol. 21. Pp. 1785–1791. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.014.
12. Suvorov S.A., Skurikhin V.V. Vermiculite – a promising material for hightemperature heat insulation // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2003. Vol. 44. No. 3. Pp. 186–193.
13. Shmuradko V.T., Panteleenko F.I., Reut O.P., Panteleenko E.F., Kirshina N.V. Composition structure and property formation of heat insulation fire and heat-reflecting materials based on vermiculite for industrial power generation // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2012. Vol. 53. Iss. 4. Pp. 254–258.
14. Bors J., Gorny A., Dultz S. Iodide, cerium and strontium adsorption by organophilic vermiculite // *Clay Minerals*. 1997. Vol. 32. Iss. 1. Pp. 21–28.
15. Yurkon A.L., Akselrod L.M. Properties of heat-insulating materials // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2005. Vol. 46. Iss. 3. Pp. 170–174.
16. Abdeen M.A.M., Hodhod H. Experimental investigation and development of artificial neural network model for the properties of locally produced light weight aggregate concrete // *Engineering*. 2010. Vol. 2. Pp. 408–419.
17. Lei G. Togay Ozbakkaloglu. Use of recycled plastics in concrete: a critical review // *Waste Management*. 2016. Vol. 51. Pp. 19–42. doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005.



18. Kligys M., Laukaitis A., Sinica M., Sezemanas G., Dranseika N. Investigations into the fire hazard of a composite made from aerated concrete and crushed expanded polystyrene waste // *Mechanics Composite Materials*. 2008. Vol. 44. Pp. 173–180.

19. Noguchi T., Miyashita M., Inagaki Y., Watanabe H. A new recycling system for expanded polystyrene using a natural solvent. Part 1. // *A new recycling technique*, Pack 3. Technical science. 1998. Vol. 11. Iss. 1. Pp. 19–27. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1522(199802)11:1<19::AID-PTS414>3.0.CO;2-5.

20. Rashad Alaa M. A synopsis about perlite as building material – A best practice guide for Civil Engineer // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 121. Pp. 338–353.

21. Кальянов Н.Н., Мерзляк А.Н. Вермикулит и перлит – пористые заполнители для теплоизоляционных изделий. Москва: Госстройиздат, 1961. 155 с.

22. Schackow A., Effting C., Folgueras M.V., Güths S., Mendes G.A. Mechanical and thermal

properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 57. Pp. 190–197.

23. Abdul Rahman S., Babu G. An experimental investigation on light weight cement concrete using vermiculite minerals // *International Journal Innovative Research Science Engineering Technology*. 2016. Vol. 5. Iss. 2. Pp. 2389–2392.

24. Sutcu M., Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks // *Ceramics International*. 2015. Vol. 41. Pp. 2819–2827.

25. Ахтямов Р.Я. Вермикулит – сырье для производства огнеупорных теплоизоляционных материалов // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2009. №1-2. С. 58–64.

26. Ахтямов Р.Я. Применение эффективных теплоизоляционных материалов и жаростойких бетонов в футеровках печей обжига керамического кирпича // *Строительные материалы*. 2004. № 2. С. 26–28.

#### Информация об авторах

**Аль Мамури Саад Кхалил Шадид**, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: saad.shadeed.ss71@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Загороднюк Лилия Хасановна** д-р. техн. наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: LHZ47@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Сумской Дмитрий Алексеевич**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: pr9nik2011@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Бочарников Андрей Леонидович**, студент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: andrew220399@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Шеметова Ольга Михайловна**, аспирантка кафедры механического оборудования. E-mail: olga95kizilova@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 22.12.2022 г.

© Аль Мамури Саад Кхалил Шадид., Загороднюк Л.Х., Сумской Д.А., Бочарников А.Л., Шеметова О.М., 2023

***Al Mamouri Saad Khalil Shadid, \*Zagorodniuk L.Kh., Sumskoy D.A., Bocharnikov A.L., Shemetova O.M.***

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

*\*E-mail: lhz47@mail.ru*

## **BINDING COMPOSITIONS USING VERMICULITE FOR HEAT PROTECTIVE SOLUTIONS**

**Abstract.** The study of cement mortars containing expanded vermiculite as a filler is presented. The use of vermiculite up to 30 % or more leads to good thermal insulation properties of solution, but low compressive strength. Features of the nature of expanded vermiculite contribute to reducing the density and providing heat-shielding properties. Mechanical activation of binder compositions depending on the duration of treatment in a vibrating mill compositions: Portland cement 90–70 %, vermiculite 10–30 %, allow to obtain a density in

the range of 1720–1933 kg/m<sup>3</sup>, with a strength of 42.8–58.2 MPa, while saving up to 10–20 % of expensive energy-intensive cement. Cement stone from binder compositions is created due to the formation of a spatial framework created by a porous mineral filler, which, due to its high dispersion, occupies a significant spatial volume and a crystalline structure is formed on this mineral filler, as on substrates, created by calcium hydro-silicates and hydroaluminates. It builds up a secondary framework with crystalline neoplasms on finely dispersed vermiculite grains – plates. The developed binder has a porous structure due to the introduction of vermiculite filler, which reduces the thermal conductivity of the created composite. The use of the resulting binder compositions prepared from a mixture of Portland cement and vermiculite, in combination with a porous filler - expanded vermiculite, allows obtaining a heat-insulating mortar with high heat-shielding performance and guaranteed strength.

**Keywords:** expanded vermiculite, binder composition, heat protection solutions, Portland cement, low density, microstructure.

## REFERENCES

1. Degirmenci N., Arin N.Y. Use of pumice fine aggregate as an alternative to standard sand in production of lightweight cement mortar. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. 2011. Vol. 18. Pp. 61–68.
2. Unal O., Uygunoglu T., Yildiz A. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. *Building and Environment*. 2007. Vol. 42. Pp. 584–590.
3. Koksall F., Gencel O., Hagh-Lobland H.E., Brostow W. Effect of high temperature on mechanical and physical properties of lightweight cement based refractory including expanded vermiculite. *Materials Research Innovations*. 2012. Vol. 16. Iss. 1. Pp. 7–13.
4. Zagorodnyuk L., Sumskey D., Lesovik V., Fediuk R. Modified heat insulating binder using jet-grinded waste of expanded perlite sand. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 260. Pp. 120440. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.120440.
5. Zagorodnyuk L.Kh., Rakhimbaev Sh.M., Sumskey D.A., Ryzhykh V.D. Features of the processes of hydration of binder compositions using waste expanded perlite sand. [Osobennosti processov gidratatsii vyazhushchih kompozitsij s ispol'zovaniem othodov vspuchennogo perlitovogo peska]. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No. 11. Pp. 75–88. DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88. (rus)
6. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.Kh., Chulkova I.L. The law of structure affinity in materials science [Zakon srodstva struktur v materialovedenii]. *Fundamental research*. 2014. No. 3-2. Pp. 267–271. (rus)
7. Lanzon M., Garcia-Ruiz P.A. Lightweight cement mortars: advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability. *Construction Building Materials*. 2008. Vol. 22. Iss. 8. Pp. 1798–1806.
8. Munoz-Ruiperez C., Rodriguez A., Gutierrez-Gonzales S., Calderon V. Lightweight masonry mortars made with expanded clay and recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 118. Pp. 139–145.
9. Kayali O. Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete. *Construction Building Materials*. 2008. Vol. 22. Iss. 12. Pp. 2393–2399.
10. Shafigh P., Jumaat M.Z., Mahmud H. Oil palm Shell as lightweight aggregate for production high strength lightweight concrete. *Construction Building Materials*. 2011. Vol. 25. Iss. 4. Pp. 1848–1853.
11. Merino M.R.; Astorqui J. S. C.; Cortina M. G. Viability analysis and constructive applications of lightened mortar (rubber cement mortar). *Construction and Building Materials*. 2007. Vol. 21. Pp. 1785–1791. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.014.
12. Suvorov S.A., Skurikhin V.V., Vermiculite – a promising material for hightemperature heat insulation. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2003. Vol. 44. No. 3. Pp. 186–193.
13. Shmuradko V.T., Panteleenko F.I., Reut O.P., Panteleenko E.F., Kirshina N.V. Composition structure and property formation of heat insulation fire and heat-reflecting materials based on vermiculite for industrial power generation. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2012. Vol 53. Iss. 4. Pp. 254–258.
14. Bors J., Gorny A., Dultz S. Iodide, cerium and strontium adsorption by organophilic vermiculite. *Clay Minerals*. 1997. Vol. 32. Iss. 1. Pp. 21–28.
15. Yurkon A.L., Akselrod L.M. Properties of heat-insulating materials. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2005. Vol. 46. Iss. 3. Pp. 170–174.
16. Abdeen M.A.M., Hodhod H. Experimental investigation and development of artificial neural network model for the properties of locally produced light weight aggregate concrete. *Engineering*. 2010. Vol. 2. Pp. 408–419.
17. Lei G. Togay Ozbakkaloglu. Use of recycled plastics in concrete: a critical review. *Waste Management*. 2016. Vol. 51. Pp. 19–42. doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005.
18. Kligys M., Laukaitis A., Sinica M., Sezemanas G., Dranseika N. Investigations into the fire hazard of a composite made from aerated concrete and



crushed expanded polystyrene waste. *Mechanics Composite Materials*. 2008. Vol. 44. Pp. 173–180.

19. Noguchi T., Miyashita M., Inagaki Y., Watanabe H. A new recycling system for expanded polystyrene using a natural solvent. Part 1. A new recycling technique, Part 3. *Technical science*. 1998. Vol. 11. Iss. 1. Pp. 19–27. doi.org/10.1002/(SICI)1099-1522(199802)11:1<19::AID-PTS414>3.0.CO;2-5.

20. Rashad Alaa M. A synopsis about perlite as building material – A best practice guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 121. Pp. 338–353.

21. Kalyanov N.N., Merzlyak A.N. Vermiculite and perlite - porous fillers for heat-insulating products [Vermikulit i perlit – poristye zapolniteli dlya teploizolyacionnyh izdelij]. Moscow: Gosstroyizdat. 1961. 155 p. (rus)

22. Schackow A., Effting C., Folgueras M.V., Güths S., Mendes G.A. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 57. Pp. 190–197.

23. Abdul Rahman S., Babu G. An experimental investigation on light weight cement concrete using vermiculite minerals. *International Journal Innovative Research Science Engineering Technology*. 2016. Vol. 5. Iss. 2. Pp. 2389–2392.

24. Sutcu M., Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks. *Ceramics International*. 2015. Vol. 41. Pp. 2819–2827.

25. Akhtyamov R. Ya. Vermiculite as a raw material for the production of refractory heat-insulating materials [Vermikulit – syr'e dlya proizvodstva ognepornyyh teploizolyacionnyh materialov]. *Refractories and technical ceramics*. 2009. No. 1-2. Pp. 58–64. (rus)

26. Akhtyamov R. Ya. The use of effective heat-insulating materials and heat-resistant concretes in the lining of furnaces for firing ceramic bricks [Primenenie effektivnyh teploizolyacionnyh materialov i zharostokih betonov v futerovkah pechej obzhiga keramicheskogo kirpich]. *Stroitel'nye materialy*. 2004. No. 2. Pp. 26–28. (rus)

#### *Information about the authors*

**Al Mamouri Saad Khalil Shadid**. Postgraduate student. E-mail: saad.shadeed.ss71@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Zagorodnyuk, Liliya K.** DSc, Professor. E-mail: LHZ47@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Sumskoy, Dmitry A.** PhD. E-mail: pr9nik2011@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Bocharnikov, Andrey L.** Student. E-mail: andrew220399@gmail.com. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Shemetova, Olga M.** Postgraduate student. E-mail: olga95kizilova@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

*Received 22.12. 2022*

#### **Для цитирования:**

Аль Мамури Саад Халил Шадид, Загороднюк Л.Х., Сумской Д.А., Бочарников А.Л., Шеметова О.М. Вяжущие композиции с использованием вермикулита для теплозащитных растворов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 2. С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-8-19

#### **For citation:**

Al Mamouri Saad Khalil Shadid, Zagorodniuk L.Kh., Sumskoy D.A., Bocharnikov A.L., Shemetova O.M. Binding compositions using vermiculite for heat protective solutions. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023. No. 2. Pp. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-8-19

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-20-28

**\*Наумов А.Е., Кучеренко А.С., Бобровников Е.А., Корольская А.И.***Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.**\*E-mail: kafeun@mail.ru*

## **ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ БИБЛИОТЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАК ЭФФЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

**Аннотация:** Автоматизацию проектной деятельности как этапа информационного моделирования в строительстве рационально строить на формализации и моделировании многочисленных рутинных операций, составляющих большую часть трудоемкости и стоимости проектирования. При этом элементное проектирование сопряжено с частым обращением к специализированной справочной и нормативной литературе, внешнему по отношению к моделирующей среде программному обеспечению, формирующими необходимый информационный поток для качественного проектирования. Одним из эффективных направлений ускорения и совершенствования проектной деятельности является разработки и использование параметрических моделей элементов зданий, сооружений и строительных конструкций, содержащих как алгоритмы построения пространственных и макетных изображений объекта, так и обеспечивающих его необходимой алгоритмической оснасткой для автоматизированного конструирования по нормативному или адаптированному пользователем сценарию. В работе представлен пример обоснования, разработки и использования параметрических библиотечных элементов при информационном моделировании зданий, сооружений и строительных конструкций. На примере параметрической модели отдельного фундамента, моделируемого в среде Graphisoft GDL для использования в ПК ARCHICAD рассмотрены цели создания и преимущества использования параметрических (умных) объектов информационной модели, продемонстрирована эффективная работа с параметрической моделью, сокращающая трудоемкость проектной деятельности, приведены ключевые параметры объекта и примеры скриптов программной среды, произведена оценка эффективности, определены перспективы дальнейшего развития инструментария параметрического моделирования.

**Ключевые слова:** технологии информационного моделирования, параметрическое моделирование, строительное проектирование, строительные конструкции

**Введение.** Информационное моделирование объектов недвижимости, зданий, сооружений, строительных конструкций и инженерных систем давно и прочно стало неотъемлемой частью современной проектной деятельности в строительстве, многократно доказав эффективность активного применения как с позиций сокращения ресурсоемкости проектной деятельности [1], так и сокращения удельной доли рутинных проектных операций и интеллектуально напряженных процедур количественного проектного контроллинга, высвобождающих время и ресурсы проектировщика на более интенсивное и эффективное решение действительно важных и значимых задач строительного проектирования – вариантного анализа, оптимизации принимаемых технических решений, анализа и рационализации ресурсов, требующихся для практической реализации проекта [2].

Если информационное моделирование, в целом, можно охарактеризовать как технологию создания трехмерных моделей, наполненных необходимой информацией для строительства и эксплуатации проектируемого объекта, то внутри нее следует различать четкую процессную структуру, поэлементно приводящую к

успешному результату – созданию точной и минимально ресурсоемкой в последующем использовании и актуализации виртуальной копии объекта недвижимости на требующемся и нарастающем по мере продвижения по жизненным стадиям объекта уровне детализации. При этом традиционные инструменты донесения проектного задания к исполнителю на строительную площадку – проектно-сметная документация, не является самоцелью информационного моделирования, а создается полностью или преимущественно автоматизировано, по мере необходимости дополняясь сведениями по индивидуальным запросам исполнителя, для чего целесообразна не в бумажном, а цифровом виде с различными инструментами визуализации – от стационарных пассивных информирующих мониторов до интерактивных устройств виртуальной и дополненной реальности [3].

Эффективность строительной проектной деятельности в технологиях информационного моделирования (ТИМ) определяется возможностью переноса наиболее трудоемкой и сопряженной с большим количеством потенциальных ошибок и неточностей части проектирования – высокоде-

тализованный пространственный конструирования – на ранние этапы проектной работы, осуществляемые в связанной среде и с элементами цифрового двойника здания, в связи с чем изменяемость проекта высока, а приведенная стоимость внесения изменений – низка (рис. 1) [4]. Это обстоятельство и позволяет считать ТИМ инструментом существенно более эффективной проектной деятельности, нуждающимся, тем не

менее, в более профессионально подготовленных, аппаратно и программно оснащенных эксплуатирующих кадрах. Последнее обстоятельство, в ряде случаев, существенно ресурсозатратно, что делает ТИМ не идеализированным инструментом эффективности, а только при определенных, позитивно складывающихся у потребителя кадровых и инструментальных возможностях [5].



Рис. 1. Эффективность использования ТИМ в строительном проектировании

**Основная часть.** Повышение кадровой обеспеченности и расширение инструментального обеспечения (прежде всего, функционально-программного) для рационального использования ТИМ на практике – задача, обеспечивающая достижение цели проектирования, и не менее важная для эффективности и самого существования устойчивого процесса использования информационного моделирования в проектной организации. Информационная модель здания, сооружения, отдельной конструкции и элемента инженерной сети при разработке, а особенно в дальнейшей эксплуатации требует выполнения многократно повторяющихся рутинных операций первоначального проектирования и последующей актуализации модели. Многочисленные рутинные операции не только негативно сказываются на качестве моделирования и потенциальном росте ошибок в модели, но и снижают производительность труда проектировщика, деинтеллектуализируя решаемые большую часть времени проектные задачи и снижая созидательный потенциал проектировщика, определяемый его компетентностным уровнем. В этой связи на передний план в пуле первостепенных задач повышения эффективности проектной деятельности в ТИМ выходят задачи сокращения ресурсоемкости вплоть до полной программной автоматизации многочисленных рутинных опера-

ций проектирования. Универсальным инструментом эффективного решения таких задач является параметрическое моделирование – создание программных апплетов (элементов программного обеспечения, работоспособных только в программной среде информационного моделирования), создающих топологически и информационно насыщенные элементы и связи информационной модели полностью автоматизировано исходя из ограниченного набора базовых параметров элемента, задаваемых пользователем в процессе многочисленных созданий/актуализаций элемента, но уже на, упрощенном, а потому существенно менее утомительном и ресурсоемком уровне [6].

К числу инструментов создания таких апплетов принадлежат среды и языки параметрического моделирования, в открытом или закрытом (доступном только разработчику) виде присутствующие во всех современных программах информационного моделирования. Так, в одном из наиболее популярных и функциональных программных продуктов для информационного моделирования здания – ПК ARCHICAD – параметрическое моделирование реализуется в полностью открытом пользователю и интерфейсно дружелюбном формате внутренней среды разработчика на языке Geometric Description Language (GDL). Параметрические модели в GDL собира-

емые и информационно насыщаемые в интуитивно понятной и функционально обеспеченной внутренней среде программного комплекса, обеспечивающей полную совместимость с разрабатываемыми информационными моделями, обеспечивают возможности самостоятельного, гибкого, прикладного и клиентоориентированного расширения штатного функционала программы ARCHICAD, существенно увеличивающего и область применения продукта, и перечень эффективно решаемых с его помощью инженерных задач, корпоративную связность и информационную безопасность проектных процессов, все более выполняемых в единой информационной среде [7].

Рассмотрим пример разработки параметрической модели строительной конструкции, обеспечивающей ее высокоуровневое создание и ресурсоэффективное использование в проектной деятельности, поддерживаемое автоматизацией создания внешнего образа, структурного содержания и информационного наполнения модели. При разработке фундаментов зданий и сооружений отдельностоящие железобетонные фундаменты мелкого заложения являются рациональным технологическим решением, позволяющим достичь до 15% экономии средств на создание конструкции за счет сокращения земляных работ, возможной индустриализации конструкции и ее высокой конструктивной безопасности, допускающей монтаж и пуск в эксплуатацию в короткие сроки. В ряде случаев, например, при преимущественно колонном каркасе здания и неглубоком залегании несущих грунтов основания отдельностоящие фундаменты рассматриваются как оптимальное и безальтернативное конструктивное решение. Проектные задачи, стоящие перед проектировщиком отдельностоящих фундаментов, заключаются в рациональном подборе параметров подошвы и глубины ее заложения, конструировании арматурного каркаса с соблюдением требований строительных правил и практики проектирования конструкций, заключающейся в определенном наборе стандартных рутинных сценариев формирования, информационного наполнения и специфицирования модели конструкции [8].

Расчетное и проектное обоснование принимаемых при проектировании отдельностоящих фундаментов конструктивных решений осуществляется в соответствии с положениями [9] и [10]. Ключевыми расчетными алгоритмами, формирующими рутинные проектные операции при конструировании фундаментов, являются выбор числа ступеней, размещение арматурных сеток подошвы с соблюдением принятого диаметра,

шага, класса арматуры, параметров пересечения стержней, защитного слоя бетона. В значительной степени трудоемкость этих проектных процедур возрастает при необходимости многократного пересчета и перепроектирования фундаментов, индивидуализации его типоразмеров под различающееся нагружение отдельных колонн, корректное специфицирование расходуемых ресурсов, сопряженное с многочисленными изменениями, являющимися неотъемлемой и необратимой составляющей нормальной проектной деятельности, особенно в случае сжатых сроков или лимитированного финансирования строительства, вынуждающего проектировщика выскидывать и реализовывать любые резервы по стоимостной и ресурсной оптимизации проекта. Основательно ускорить и ресурсно оптимизировать проектирование конструкций в этих условиях можно использованием параметрических моделей, допускающих широкую вариацию исходных параметров, и автоматически формирующих пространственную и плоские представления конструкции, ресурсные ведомости и необходимые в проектной документации элементы макетирования [11].

Создание параметрической модели включает формирование управляющих параметров, описание объемного представления (3D-тела) и плоского изображения в макете (2D-символа), формирование спецификационных заданий, и, возможно, ограничений на изменение и содержание отдельных параметров модели, обеспечивающих ее безотказность и устойчивость. Параметрами, управляющими внешним видом и информационным наполнением модели фундамента, управляемыми пользователем, являются габаритные размеры конструкции, диаметр, класс и масса арматуры, количество стержней, класс бетона, его объем, защитные слои и прочее (рис. 2).

Модель содержит описание пространственного и плоского представления элементов, возможность отдельного отображения частей конструкции (сокрытия бетонной части), алгоритм установки элементов арматурного каркаса с изменяемыми параметрами арматуры – диаметрами, шагами установки, количеством элементов и параметрами объемной привязки арматуры. На рис. 3 приведен фрагмент скрипта для описания пространственного положения элементов бетонной части фундамента. Командой BLOCK заданы габариты подошвы, ступеней и подколоники фундамента, командой ADD определяется взаимное расположение элементов и привязка к точке вставки в информационную модель.

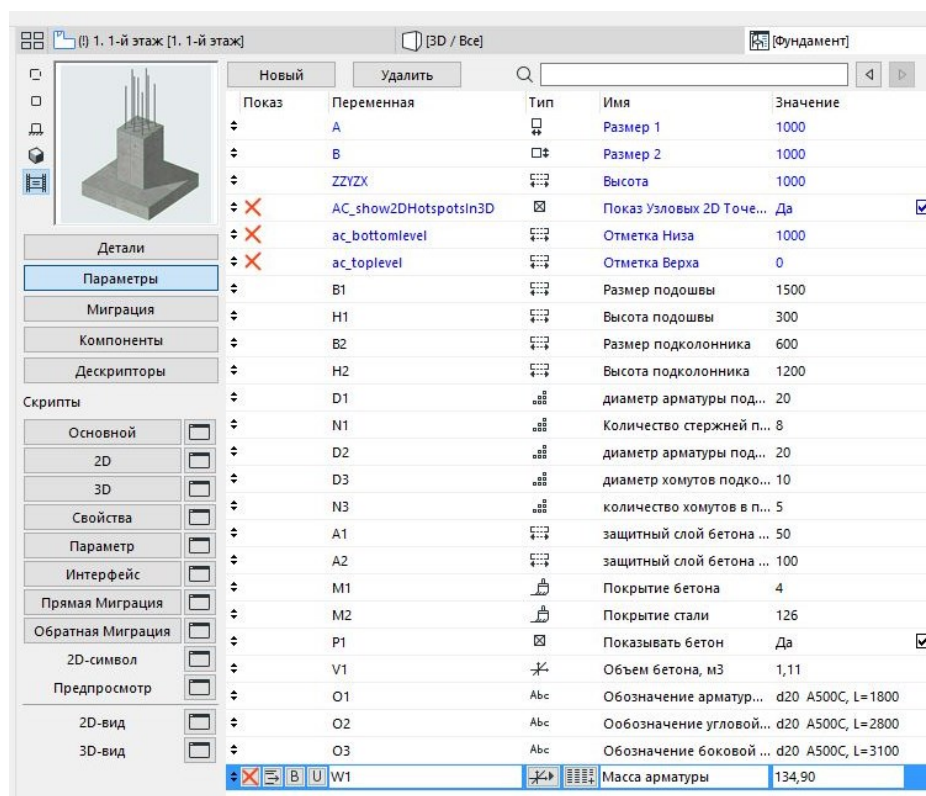


Рис. 2. Параметры модели фундамента в среде GRAPHISOFT GDL для ПК ARCHICAD

```

!Бетон
IF P1=1 THEN
  MATERIAL M1
  ADD -B1/2, -B1/2, 0
  BLOCK B1, B1, H1
  DEL 1
  ADD -B2/2, -B2/2, H1
  BLOCK B2, B2, H2
  DEL 1

```

Рис. 3. Фрагмент описания пространственного представления модели на языке GDL для ПК ARCHICAD

Возможности автоматизированного подсчета ресурсоемкости модели (объема бетона и массы арматуры) реализованы в спецификационной части модельного редактора. На рис. 4 представлен скрипт подсчета объемов материалов необходимых для возведения фундамента, переменные V1 и W1 определяют количество бетона и арматуры объекта соответственно, рассчитываемые по актуализируемым размерам элементов и транслируемые в числа в создаваемую спецификацию конструкции (рис. 5).

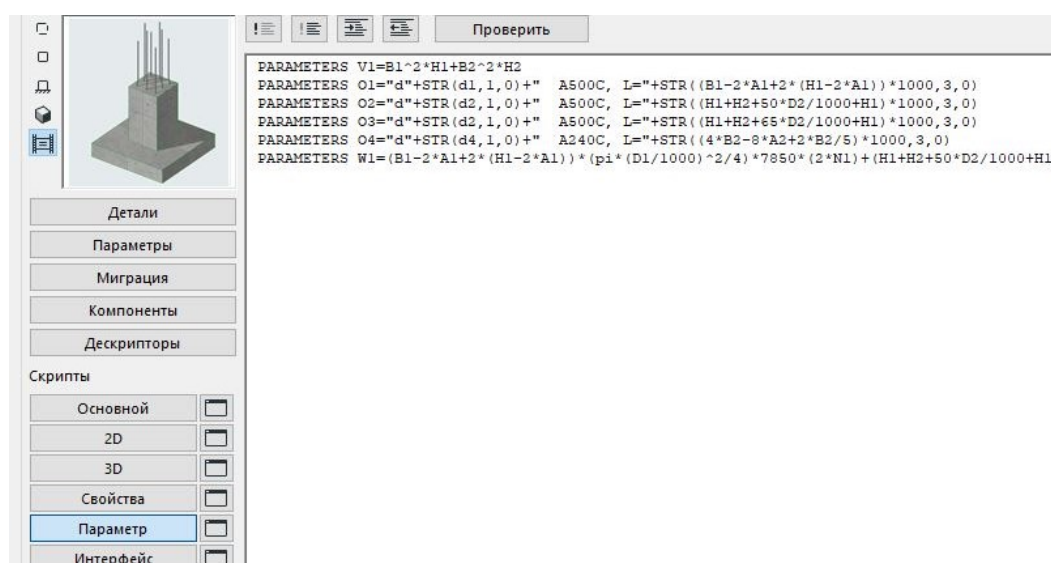


Рис. 4. Скрипт автоматизированного подсчета ресурсоемкости модели

Фундамент Ф1 - ARCHICAD 24 EDU

Файл Редактор Вид Конструирование Документ Параметры Teamwork Окно Помощь

Указатель

Бегущая Рамка

Конструирование

Стена

Колонна

Балка

Перекрытие

Крыша

Оболочка

Лестница

Ограждение

Навесная Стена

Дверь

Окно

Световой Люк

Отверстие

Зона

3D-сетка

Морф

1. 1-й этаж [1. 1-й этаж] 3D / Все [Фундамент / 2D-символ] [Фундамент] [СПЕЦИФИКАЦИЯ]

Выбор

СПЕЦИФИКАЦИЯ ФУНДАМЕНТОВ

| ID Элемента | Количество | Обозначение ар-ры подошвы | Обозначение угловой арматуры подколонников | Обозначение боковой арматуры подколонника | Объем бетона, м3 | Масса арматуры |
|-------------|------------|---------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------|----------------|
| Ф1          | 16         | d16 A500C, L= 2100        | d25 A500C, L= 3050                         | d25 A500C, L=3425                         | 3,67             | 202,14         |
| Ф2          | 9          | d18 A500C, L= 2600        | d25 A500C, L= 3250                         | d25 A500C, L=3625                         | 2,96             | 252,99         |
|             |            |                           |                                            |                                           | 85,36            | 5511,15        |

Рис. 5. Автоматически сформированная спецификация фундаментов с указанием объема бетона и массы арматуры

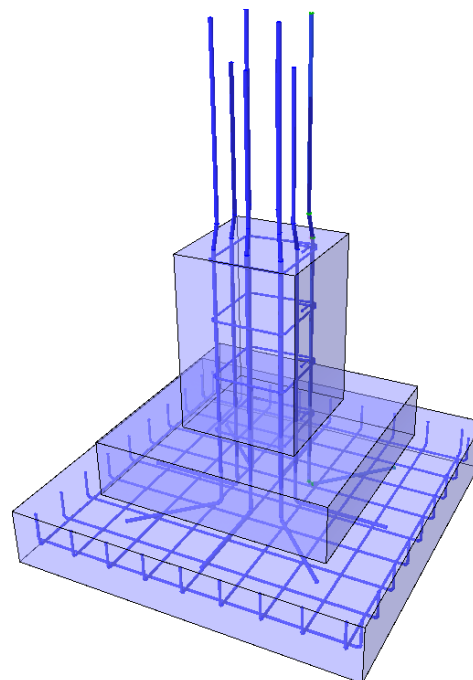
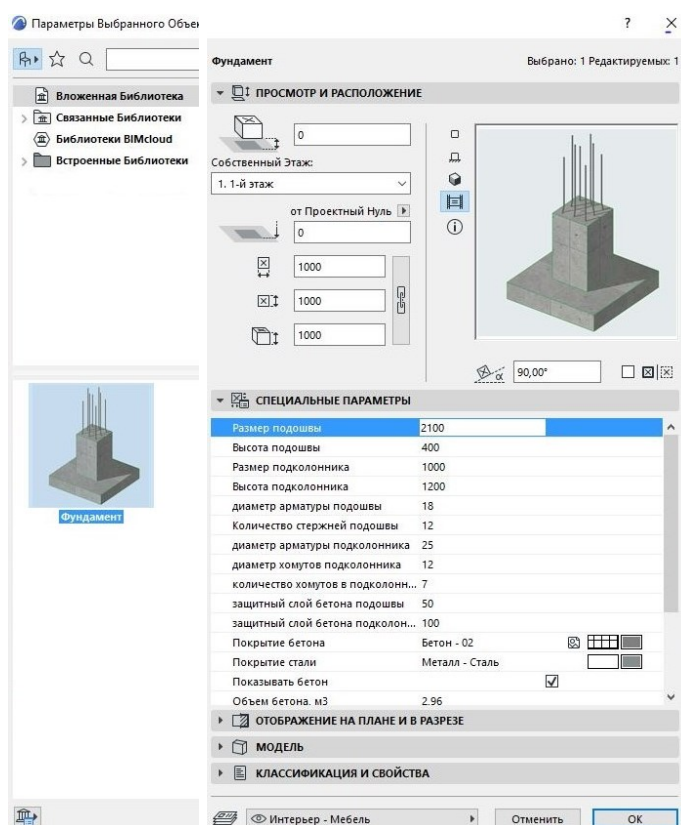


Рис. 6. Окно работы с параметрической моделью в ПК ARCHICAD

Интерфейсная реализация процедуры вставки и актуализации модели фундамента в информационной модели здания представлена на рис. 6 [12].

С целью количественной оценки эффективности использования разработанной модели в проектной деятельности авторами проведено

сравнение ресурсоемкости создания конструктивного элемента штатными и расширенными параметрическим объектом средствами проектирования конструкций [13]. Проектирование фундаментов штатными инструментами программы, даже с использованием шаблонных объектов отдельных конструктивных элементов арматурного каркаса и бетонного остова конструкции, в



целом, составляет от 1,5 часов. Формирование параметрической модели конструкции, складываясь из этапов сбора и подготовки исходных данных, определения основных параметров модели, написания скрипта для создания конструкции фундамента и размещения в нем арматурных каркасов, написания скриптов для подсчетов объемов конструкции заняло не более 1 часа. Таким образом, предварительная оценка экономии времени проектного труда на создание и внесение в проект одной единицы фундамента с учетом времени создания модели составляет от 30 до 45 минут. Средний проект здания, опирающегося на отдельностоящие фундаменты, содержит до 10 элементов типовых, но различных по армированию и габаритным размерам конструкций, проектирование которых параметрическими моделями может ускориться с 15-ти до 5-ти часов, что не только существенно повышает производительность проектного коллектива, но высвобождает проектировщика для решения более значимых и существенных для проектирования задач – индивидуализации конструкции, рационализации ее армирования, детального анализа и учета факторов действительной работы элемента под нагрузкой, вносимых в дальнейшем в используемые параметрические модели при ресурсной актуализации информационной модели здания [14].

Выделим основные преимущества готовой параметрической модели:

1. Быстрота корректировки технических решений фундаментов в зависимости от действующих нагрузок.

2. Мгновенное отображение во всех частях проекта изменений любого элемента использованной параметрической модели.

3. Автоматический подсчет объемов в спецификациях, ресурсных и элементных ведомостях.

4. Возможность расширения функциональности параметрической модели и уровня ее детализации внесением информации о ремонтах, вскрытиях, реконструкции, и т.д., востребованной и вносимой в информационную модель здания на стадии его технической эксплуатации.

5. Возможность расширения функциональности параметрической модели внесением информации о потребности и стоимости ресурсов, трудоемкости создания, накладных расходах, сметной прибыли и/или интеграции с той же элементной базой через интерфейсы сметных классификаторов с целью определения стоимости строительства.

6. Возможность расширения функциональности параметрической модели созданием

дополнительных расчетных блоков, осуществляющих элементы структурного анализа конструкции: расчет внутренних усилий в элементах, напряжений под подошвой фундамента, оптимизацию армирования и прочие оценивающие, в том числе советующие инженерные функции [15].

**Выводы.** Представленные алгоритмы параметрического моделирования, пример их реализации в программной среде информационного моделирования, демонстрация и количественная оценка эффективности практического использования параметрических моделей строительных конструкций обеспечивает реализацию общей эффективности ТИМ в условиях ограниченного кадрового и программного обеспечения, при рациональном развертывании корпоративных стандартов информационного моделирования и шаблонных библиотек проектируемых конструкций, узлов и элементов, расширяющих возможности штатного функционала моделирующего софта. Использование параметрических моделей конструкций, требующее определенных усилий и затрат при их создании, тем не менее, скоро окупается снижением количества проектных ошибок и ростом качества проектной продукции, сокращением рутинных операций и сопутствующих трудозатрат, высвобождающим и направляющим потенциал проектировщика на решение задач ресурсной и технологической оптимизации принимаемых проектных решений и вариантного проектирования. Широкая каталогизация параметров модели позволяет создавать автоматизированно актуализируемые ресурсные ведомости конструкций и сводные ведомости всей информационной модели, обеспечивающей наиболее рациональную связку технического конструирования с актуальной ресурсоемкостью вариантных решений, позволяющих осуществлять оперативный конструктивно-экономический анализ и выбор эффективного направления проектирования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенько М.В. GDL-программирование при информационном моделировании универсального арматурного элемента // Молодой исследователь: вызовы и перспективы: Сборник статей по материалам ССХVIII международной научно-практической конференции, Москва, 28 июня 2021 года. Т. 23 (218). Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Интернаука", 2021. С. 182–185.

2. Талапов В.В. Технология BIM. Суть и особенности внедрения информационного моде-

лирования зданий. Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ДМК пресс. Электронные книги", 2015. 410 с

3. Georgiev N.G., Shumilov K.A. Application of visual programming in modeling building structures // Innovations. The science. Education. 2021. No. 34. Pp. 1418–1422.

4. Бардакова Ю.И. Автоматизация элементов проектной деятельности в ПК ARCHICAD параметрическим моделированием в среде GDL // Образование. Наука. Производство: XIII Международный молодежный форум, Белгород, 08–09 октября 2021 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. С. 610–616.

5. Седашова М.А., Руденский Д.С. Методы GDL - программирования при информационном моделировании строительных конструкций // Международная научно-техническая конференция молодых ученых, Белгород, 25–27 мая 2020 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2020. С. 1891–1895.

6. Лиля Е.Н., Мозговой В.М. Возможности GDL - программирования при усилении строительных конструкций // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: Материалы конференции, Белгород, 30 апреля – 20 мая 2021 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. С. 1539–1543.

7. Савченко Р.Н. Основные принципы и особенности BIM технологии // Вопросы науки и образования. 2018. № 27(39). С. 26–29.

8. Барабаш М.С., Киевская Е.И. Принципы параметрического моделирования строительных объектов // Современное строительство и архитектура. 2016. №1(01). С. 16–22. DOI: 10.18454/mca.2016.01.4.

9. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* (с Изменениями N 1, 2, 3, 4) // Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2017.

10. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\* (с Изменениями N 1, 2, 3, 4) // Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2017.

11. ARCHICAD: RE-OPENING. GDL language: programming for solving architect's problems [Электронный ресурс]. URL: <https://ardexpert.ru/article/10209> (дата обращения: 10.11.22).

12. GRAPHISOFT, Reference Guide GDL / Graphisoft, a Nemetschek company, 2019. 700 p.

13. ARCHICAD Training Series Part 2. Conceptual design in ARCHICAD architect [Электронный ресурс]. URL: <http://www.graphisoft.ru/learning/trainingmaterials/training-series/volume-2.html> (дата обращения: 10.11.22).

14. Пантелеенко Л.Д. Преимущества применения GDL-языка в дизайне и проектировании строительных конструкций // Образование. Наука. Производство: XIII Международный молодежный форум, Белгород, 08–09 октября 2021 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. С. 471–475.

15. Ryazanov M.Yu., Panteleenko L.D., Smetana A.V., Dolzhenko A.V. Application of information modeling tools to create the element base of wall panels of the typical series "Arctic" // International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of the BSTU named after V.G. Shukhov: Conference materials, Belgorod, April 30 - 20, 2021. Belgorod: Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, 2021. Pp. 3794–3801.

#### Информация об авторах

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

**Кучеренко Александра Сергеевна**, магистрант кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: [16a2015@gmail.com](mailto:16a2015@gmail.com). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Бобровников Егор Александрович**, магистрант кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: [eabobrovnikov@yandex.ru](mailto:eabobrovnikov@yandex.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Корольская Анна Ивановна**, магистрант кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: [annakalekina@yandex.ru](mailto:annakalekina@yandex.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 21.12.2022 г.

© Наумов А.Е., Кучеренко А.С., Бобровников Е.А., Корольская А.И., 2023

**\*Naumov A.E., Kucherenko A.S., Bobrovnikov E.A., Korolskaya A.I.**

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

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

## PARAMETRIC LIBRARY ELEMENTS AS AN EFFECTIVE TOOL FOR IMPROVING BUILDING INFORMATION MODELLING

**Abstract:** *It is shown rational to build automation of design activities as a stage of information modeling in construction on the formalization and modeling of numerous routine operations that make up the bulk of the complexity and cost of design. At the same time, structural design is associated with taught link to specialized manuals and codes, external to the modeling environment software, which flows high-quality design within necessary high-quality frames. One of the effective directions for accelerating and improving design activities is the development and use of parametric models of building structures, containing both algorithms for constructing 3d views and layout images of an object, and providing it with the necessary algorithmic equipment for automated design according to a normative or user-adapted scenarios. The paper presents an example of substantiation, development and use of parametric library elements in buildings information modeling. On the example of a parametric model of a shallow foundation, modeled in the Graphisoft GDL environment for use in ARCHICAD, the goals of creating and the benefits of using parametric (smart) objects of the information model are considered, effective work with a parametric model is demonstrated, which reduces the complexity of design activities, the key parameters of the object and examples of scripts are given, an assessment of efficiency was made, prospects for further development of parametric modeling tools were determined.*

**Keywords:** *building information modeling, parametric modeling, building design, building structures*

### REFERENCES

1. Semenko M.V. GDL-programming for information modeling of a universal reinforcing element [GDL-programmirovaniye pri informacionnom modelirovanii universal'nogo armaturnogo elementa]. Young researcher: challenges and prospects: Collection of articles based on the materials of the CCXVIII international scientific and practical conference, Moscow, June 28, 2021. Vol. 23 (218). Moscow: Limited Liability Company "Internauka", 2021. Pp. 182–185. (rus)
2. Talapov V.V. BIM technology. The essence and features of the implementation of building information modeling [Sut' i osobennosti vnedreniya informacionnogo modelirovaniya zdaniy]. Moscow: Limited Liability Company "DMK Press. Electronic Books", 2015. 410 p. (rus)
3. Georgiev N.G., Shumilov K.A. Application of visual programming in modeling building structures. Innovations. The science. Education. 2021. No. 34. Pp. 1418–1422.
4. Bardakova Yu.I. Automation of elements of design activities in ARCHICAD by parametric modeling in the GDL environment [Avtomatizatsiya elementov proektnoj deyatel'nosti v PK ARCHICAD parametricheskimi modelirovaniem v srede GDL]. Education. The science. Production: XIII International Youth Forum, Belgorod, 08–09 October 2021. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2021. Pp. 610–616. (rus)
5. Sedashova M.A., Rudensky D.S. Methods of GDL - programming in information modeling of building structures [Metody GDL - programmirovaniya pri informacionnom modelirovanii stroitel'nyh konstrukcij]. International Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Belgorod, May 25–27, 2020. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2020. Pp. 1891–1895. (rus)
6. Lilya E.N., Mozhovoy V.M. Possibilities of GDL - programming in strengthening building structures [Vozmozhnosti GDL - programmirovaniya pri usilenii stroitel'nyh konstrukcij]. International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of BSTU named after V.G. Shukhov: Conference Proceedings, Belgorod, April 30 - May 20, 2021. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova, 2021. Pp. 1539–1543. (rus)
7. Savchenko R.N. Basic principles and features of BIM technology [Osnovnye principy i osobennosti BIM tekhnologii]. Voprosy nauki i obrazovaniya. 2018. No. 27(39). Pp. 26–29. (rus)
8. Barabash M.S., Kyiv E.I. Principles of parametric modeling of building objects [Principy parametricheskogo modelirovaniya stroitel'nyh ob"ektov]. Modern construction and architecture. 2016. No. 1 (01). Pp. 16–22. DOI: 10.18454/mca.2016.01.4. (rus)

9. SP 20.13330.2016 Loads and impacts. Updated edition of SNiP 2.01.07-85\* [Nagruzki i vozdejstviya. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.01.07-85\*] (with Amendments No. 1, 2, 3, 4). Official publication. M.: Standartinform, 2017. (rus)

10. SP 22.13330.2016 Foundations of buildings and structures. Updated version of SNiP 2.02.01-83\* [Osnovaniya zdaniy i sooruzhenij. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.02.01-83\*] (with Amendments No. 1, 2, 3, 4). Official publication. M.: Standartinform, 2017. (rus)

11. ARCHICAD: RE-OPENING. GDL language: programming for solving architect's problems. URL: <https://ardexpert.ru/article/10209> (date of treatment: 10.11.22).

12. GRAPHISOFT, Reference Guide GDL. Graphisoft, a Nemetschek company, 2019. 700 p.

13. ARCHICAD Training Series Part 2. Conceptual design in ARCHICAD architect. URL:

<http://www.graphisoft.ru/learning/trainingmaterials/training-series/volume-2.html> (date of treatment: 10.11.22).

14. Panteleenko L.D. Benefits of using the GDL language in the design and engineering of building structures [Preimushchestva primeneniya GDL-yazyka v dizajne i proektirovanii stroitel'nykh konstrukcij]. Education. The science. Production: XIII International Youth Forum, Belgorod, 08–09 October 2021. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova, 2021. Pp. 471–475. (rus)

15. Ryazanov M.Yu., Panteleenko L.D., Smetana A.V., Dolzhenko A.V. Application of information modeling tools to create the element base of wall panels of the typical series "Arctic". International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of the BSTU named after V.G. Shukhov: Conference materials, Belgorod, April 30 - 20, 2021. Belgorod: Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, 2021. Pp. 3794–3801.

#### *Information about the authors*

**Naumov, Andrey E.** PhD, Assistant professor. E-mail: [andrena@mail.ru](mailto:andrena@mail.ru); [naumov.ae@bstu.ru](mailto:naumov.ae@bstu.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

**Kucherenko, Alexandra S.** Master student of the Department of Construction Management and Real Estate. E-mail: [16a2015@gmail.com](mailto:16a2015@gmail.com). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

**Bobrovnikov, Egor A.** Master student of the Department of Construction Management and Real Estate. E-mail: [ea-bobrovnikov@yandex.ru](mailto:ea-bobrovnikov@yandex.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

**Korolskaya, Anna I.** Master student of the Department of Construction Management and Real Estate. E-mail: [annakalekina@yandex.ru](mailto:annakalekina@yandex.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

---

*Received 21.12.2022*

#### **Для цитирования:**

Наумов А.Е., Кучеренко А.С., Бобровников Е.А., Корольская А.И. Параметрические библиотечные элементы как эффективное средство совершенствования технологий информационного моделирования в строительстве // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 2. С. 20–28. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-20-28

#### **For citation:**

Naumov A.E., Kucherenko A.S., Bobrovnikov E.A., Korolskaya A.I. Parametric library elements as an effective tool for improving information modeling technologies in construction. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 2. Pp. 20–28. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-20-28

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-29-40

Мозголов М.В., \*Козлова Е.В.

Коломенский институт (филиал) Московский политехнический университет

\*E-mail: lizakozlova2014@gmail.com

## ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ SCAD ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО КЕССОННОГО ПЕРЕКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА РАСЧЕТА, УЧИТЫВАЮЩЕГО ПРОЛЕТЫ И ЖЕСТКОСТЬ КОНСТРУКЦИИ

**Аннотация.** В соответствии с современными требованиями градостроительного законодательства проектирование строительных конструкций без использования BIM технологий невозможно. Прочностной расчет на ЭВМ осуществляется в программных комплексах, реализующих метод конечных элементов, при котором вычисленные в элементах усилия или напряжения могут оказаться недостоверными. На это есть ряд причин. Анализ имеющихся в литературе данных аналитического и компьютерных расчетов ребристых железобетонных кессонных конструкций показывает, что в зависимости от созданной конечно-элементной модели и геометрии перекрытия усилия в балках могут существенно отличаться.

Целью работы является выяснение наиболее точной модели МКЭ при расчете ребристого железобетонного кессонного перекрытия. За основу численного эксперимента принята работа, в которой выполнены верификационные расчеты в вычислительном комплексе SCAD прямоугольного в плане перекрытия с прямоугольными кессонами, смоделированного четырьмя конечно-элементными моделями и в которой сделан вывод, что наиболее точной является модель, состоящая из оболочечных конечных элементов. Следует заметить, что полученные усилия сравнивались с данными известного аналитического метода расчета кессонных перекрытий, основанного на балочной аналогии и учитывающего только пролеты конструкции.

В данной работе аналитический расчет кессонного перекрытия выполнен как с учетом пролетов конструкции, так и ее ортогональной жесткости. Выполнен расчет в BK SCAD на модели, состоящей из стержневых конечных элементов таврового сечения. Полученные результаты позволили сделать вывод, что наиболее точными конечно-элементными моделями являются стержневые. Оболочечные конечно-элементные модели в рассматриваемом примере показали заниженные результаты. При выполнении верификационных расчетов на ЭВМ методом конечных элементов для подтверждения достоверности полученного напряженно – деформированного состояния, необходимо проводить сравнение с данными натурных или модельных испытаний конструкций. Для сложных многократно статически неопределимых систем, для которых отсутствуют известные аналитические решения, другие способы изучения сходимости получаемых результатов МКЭ имеют погрешность.

**Ключевые слова:** кессонные перекрытия, жесткость перекрытия, верификация, конечно-элементная модель, вычислительный комплекс SCAD.

**Введение.** Эффективным с конструктивной точки зрения и красивым по архитектуре является часторебристое перекрытие кессонного типа. Пример такой конструкции – павильон № 29 «Цветоводство и озеленение» ВДНХ в г. Москва. Строительство этого объекта осуществлено в 1969–1971 г.г. В настоящее время при строительстве ребристых перекрытий в нашей стране получают распространение опалубочные системы с извлекаемыми пустотообразователями, такие как: SKYDOME, HOLEDECK, ПОБЕДА.

В статью 1 Градостроительного кодекса РФ от 29.12.2004 № 190-ФЗ Федеральным законом от 27.06.2019 № 151-ФЗ введено понятие информационной модели объекта капитального строительства (BIM), принят СП 333.1325800.2020 Информационное моделирование в строительстве. Распоряжением

Правительства РФ от 20.12.2021 № 3719-р утверждена «Дорожная карта» по использованию технологий информационного моделирования в строительной отрасли. Она касается различных министерств и ведомств, органов государственного строительного надзора, проектных, изыскательских и экспертных организаций. Одним из непростых вопросов BIM моделирования является процесс создания конструктивной модели [1].

В работах [2, 3] рассматривается важный для проектировщиков вопрос о верификационном моделировании в вычислительном комплексе SCAD при расчете ребристой конструкции прямоугольного железобетонного кессонного перекрытия 9,0×11,55 м с кессонами 1,5×1,65 м (рис. 1). Сравниваются усилия – пролетные изгибающие моменты в балках короткого и длинного направлений, полученные при помощи

четырёх конечно-элементных моделей. В качестве эталона используется пример 15 работы [4, с. 523] аналитического метода расчёта. В соответствии с описанием, представленным в [2, 3] по первой расчётной схеме в BK SCAD моделирование перекрытия заключается в том, что полка плиты задаётся оболочечными конечными элементами, а ребра стержневыми элементами, отнесенными от полки жесткой вставкой на величину  $H_c = h_p/2 + h_n/2$  [2, рис. 2.10). По второй схеме моделирование заключается в том, что полка задаётся оболочечными элементами, а ребра стержневыми элементами в виде тавра, центр тяжести которого совпадает со срединной линией полки. Свесы полок принимаются равными  $3h_n$  [2, рис. 2.12]. В третьей модели полка моделируется плитными конечными элементами (№ 11 КЭ), ребро моделируется оболочечными конечными элементами (№ 41 КЭ). Для учёта пространственного положения соединение плиты с ребрами осуществляется при помощи жестких вставок [2, рис. 2.14]. В четвертой модели BK SCAD полка и ребра моделируются оболочечными конечными элементами (№ 41 КЭ), их соединение осуществляется без использования жестких вставок [2, рис. 2.15]. В таблицах 1 работ [2, 3] приведены значения пролетных изгибающих моментов, полученных на ЭВМ, вычислены их отклонения от моментов аналитического метода расчёта. По результатам анализа сделан вывод, что наиболее точной является оболочечная конечно-элементная модель. Стержневая модель МКЭ по изгибающим моментам приводит к существенным запасам, которые в рассматриваемом примере расчёта достигают до 61,9 %.

Однако следует заметить, что пример аналитического метода расчёта, данные которого приняты за эталонные значения, имеет две существенные ошибки. Первая ошибка заключается в неверном определении погонной нагрузки на балки  $q_x$  и  $q_y$ . В соответствии с известной аналитической теорией расчёта железобетонных кессонных конструкций, основанной на балочной аналогии, нагрузка на балки  $q_x$  и  $q_y$  зависит только от пролетов перекрытия  $L_x$  и  $L_y$  [4–10]. В работе [11] доказано, что данный аналитический метод определения усилий в балках кессонных перекрытий неверен, он не учитывает ортогональную жесткость конструкции.

Второй ошибкой является неверное значение коэффициента в формулах определения пролетного изгибающего момента. В таблице VII.7 [4, с. 522] для пролетного изгибающего момента

балок  $M_{пр}$  шарнирно-опертых по контуру конструкций принимается коэффициент 0,1, должен быть 0,125. Коэффициент 0,1 принят и в примере расчёта кессонного перекрытия. Значения коэффициентов для опорных изгибающих моментов  $M_{оп}$  в таблице отсутствуют, стоят прочерки.

Таким образом, пример 15 работы [4] не может служить эталоном для верификационных исследований конечно-элементных моделей BK SCAD работ [2, 3].

Верификационными расчётами железобетонных кессонных и ребристых перекрытий кроме авторов работ [2, 3] занимались и другие исследователи [12–14]. Полученные данные также сравнивались с аналитическим методом, основанном на балочной аналогии. Отклонения компьютерных расчётов от аналитического метода в работе [12] составляют 50 %, в работе [13] 40 %. В работе [14] сравниваются продольные относительные деформации по высоте поперечного сечения балок, значения которых получены при помощи четырёх конечно-элементных моделей расчёта шарнирно опертой по контуру плиты  $6,0 \times 12,0$  м. Первая модель представляет собой конструкцию, состоящую из стержневых конечных элементов – балок таврового сечения. Вторая модель состоит из оболочек, моделирующих плиту и стержней, выполняющих функцию ребер. Соединение элементов выполнено абсолютно жесткими телами. В третьей модели как плита, так и ребра представлены оболочками, соединенными абсолютно жесткими телами. Четвертая модель выполнена в виде массивного тела, состоящего из объемных конечных элементов. В соответствии с выводом проведенного численного эксперимента наименьшие деформации (значит и напряжения) получены в четвертой модели, состоящей из объемных КЭ и принятой автором за эталон. Следует акцентировать внимание, что наиболее близкой к четвертой модели оказалась самая простая первая модель, состоящая из стержней. Отклонения деформаций в растянутой зоне составляют +3,9 %, в сжатой +9,2 %. Наибольшие отклонения от четвертой модели показала вторая модель, в растянутой зоне расхождения составляют +72 %, в сжатой +75,3 %. Отклонения третьей модели в растянутой зоне +44,5 %, в сжатой +42,7 %.

Целью данной работы является определение наиболее точной и по возможности простой конечно-элементной модели вычислительного комплекса SCAD при определении усилий в балках прямого ребристого шарнирно-опертого по контуру прямоугольного кессонного железобетонного перекрытия путем сравнения усилий – изгибающих моментов, полученных на ЭВМ с



уточненным аналитическим методом расчета, основанном на балочной аналогии и учитывающим не только пролеты конструкции, но и ее жесткость.

**Материалы и методы.** Численный эксперимент предусматривает сравнение изгибающих моментов, полученных МКЭ в БК SCAD и аналитическим методом, учитывающим как пролеты конструкции, так и ее ортогональную жесткость.

Для обоснования выбора конечно-элементной модели обратим внимание на ряд работ, посвященных методу конечных элементов и созданию конечно-элементных моделей [15–20].

«Решения, получаемые по МКЭ, представляют в общем приближенные или аппроксимативные решения. Как и всегда, когда идет речь о приближенных решениях, ставится вопрос об их точности, устойчивости и конвергенции. Кроме того, с практической точки зрения важно знать точность решений, которая соответствует заданной надежности» [15]. «Какой бы подробной не была компьютерная модель, она всегда будет оставаться моделью, т.е. будет только моделировать различные свойства конструкции, причем, как правило, с различной степенью точности» [16]. Имеется два способа, на основании которых можно судить о точности полученного решения МКЭ, одним из которых является сравнение с задачей, имеющей известное аналитическое решение. Для многих реальных проблем, которые решаются, трудно найти соответствующую параллельную задачу, имеющую аналитическое решение [15]. Например, про расчет пластин в работе [21] сказано: «Задачи изгиба пластин сводятся к решению дифференциальных уравнений в частных производных, часто с переменными коэффициентами и при сложных краевых условиях. Точное решение известно только для отдельных сравнительно простых задач». В этом случае на ЭВМ для поиска сходимости результата применяется второй способ, который основан на многократном решении задачи с различной плотностью сетки конечных элементов [15]. Одним из важнейших моментов применения МКЭ, является выбор элементов модели и интерполяционных функций. Конечные элементы могут быть одномерными или линейными, двумерными или плоскими, трехмерными или пространственными (объемными). В работе [17] отмечается, что для конечных элементов стержневого типа постоянной жесткости по их длине для статической задачи постановка вопроса о сходимости МКЭ лишена смысла. О получении точных решений МКЭ при применении стержней указывается и в работах [15, 16]. В 1988 году отмечалось, что «В расчетах плит в инженерных конструкциях по

МКЭ существенное место принадлежит выбору элементов, с помощью которых получается довольно точное и экономичное решение. И хотя этими вопросами занималось много авторов, общий ответ, который бы подходил ко всем отдельным случаям, дать невозможно» [15]. На современном этапе развития компьютерных расчетов в литературе 2022 года для ребристых конструкций можно встретить подобные выводы: «До сих пор не предложена оптимальная расчетная схема, с одной стороны, обладающая достаточной простотой для проведения инженерного анализа, а с другой стороны, позволяющая с большой точностью отражать особенность работы элементов перекрытия» [14]. «Вряд ли можно считать целесообразным использование одной очень подробной компьютерной модели, на основании которой специалист надеется рассмотреть все нюансы работы конструкции. Исследование работы плиты, подпертой ребрами, может быть проверено на основе стратов (моделей). Каждый из этих стратов имеет свои преимущества и недостатки. Исследование всех стратов даст обильную и добротную пищу для размышления» [16, с. 138]. «Следует учитывать, что ряд простых расчетных моделей может дать более точное знание, чем одна сложная (переусложненная) расчетная схема, результаты расчета которой достаточно трудно осмыслить [17]. О трудностях при создании пространственных моделей из объемных конечных элементов отмечается в работах [14, 15]. При проектировании мембранного покрытия центральной базы конькобежного спорта с искусственной конькобежной дорожкой в г. Коломна, представляющей собой овал размером в плане  $199,89 \times 110,25$  м применялись тестовые компьютерные модели, созданные из различных конечных элементов с варьированием параметров степени дискретизации (крупность сетки, жесткость сталежелезобетонного опорного контура, характеристики упругого основания) [18]. Сопоставление различных конечно-элементных моделей показало, что моделирование опорного контура балочной моделью имеет наименьшую погрешность по сравнению с моделями, состоящими из плоских и объемных элементов. Также отмечается, что в последнее время расчетчики тяготеют к все большей детализации и учету большого числа подробностей. В действительности супердетализация приводит в лучшем случае к усложнению анализа работы конструкции, в худшем – к неизбежному накоплению погрешностей вычислений [18].

Метод конечных элементов позволяет практически полностью автоматизировать расчет стержневых систем. Он позволяет распространить принципы расчета стержневых систем на

случай непрерывных тел и сложных конструкций [19]. Определение перемещений (деформаций и напряжений) по МКЭ в случае стержневых систем базируется на использовании технической теории растяжения, изгиба и кручения бруса, позволяющей выразить перемещения и напряжения в любом сечении бруса через узловые перемещения. Для двухмерного (пластина) или трехмерного (массив) сплошного тела эта задача может быть решена только приближенно [19]. Несмотря на свою простоту «...одномерные конечные элементы широко применяются в расчетах таких плоских и пространственных конструкций, как пластины и оболочки, где появляются линейные опоры, как прогоны, ребра и крайние балки» [15, с. 127]. В соответствии с инструкцией к версии 21 BK SCAD++ [22] расчет армирования железобетонных элементов предусмотрен только для стержневых и пластинчатых элементов.

Таким образом, самой простой и наиболее точной как в расчетном смысле МКЭ, так и по геометрии пространственной модели для изучения напряженно-деформированного состояния ребер кессонных конструкций при сравнении с аналитическим методом расчета, основанным на балочной аналогии, будет стержневая конечно-элементная модель со сбором нагрузки на балки по законам треугольника и трапеции. Полученные усилия позволяют в автоматическом режиме программного комплекса подобрать армирование балок как изгибаемых элементов, в соответствии с требованиями нормативных документов. Недостатком данной модели является отсутствие данных напряженно-деформированного состояния полки, что не позволит подобрать ее армирование. Для данной модели нельзя использовать возможность автоматического приложения нагрузки от собственного веса конструкции, предусмотренного программой. При действии на перекрытие неравномерно-распределенной нагрузки возникает сложность в сборе погонной нагрузки на ортогональные балки. В таком случае можно использовать модель с приложением нагрузки на гибкую плиту с условными физическими характеристиками, работающую по бисектрисной схеме излома [20]. Следовательно, при расчете конструкций на ЭВМ необходимо рассматривать несколько моделей.

В связи с вышеизложенным, для изучения НДС ребер кессонных плит компьютерная модель представляет собой стержневую конструкцию, состоящую из балок таврового поперечного сечения. Высота балок 460 мм, ширина ребра 200 мм, ширина полки балок, установленных вдоль оси X - 1650 мм, вдоль оси Y - 1500 мм, толщина полки 60 мм. Конструкция выполняется из бе-

тона класса В25. Нагрузка на балки прикладывается по законам треугольника и трапеции [8, 9]. Поперечное сечение балок опорного контура принято аналогично пролетным балкам, но с половинным значением ширины полки. По причине отсутствия информации в работах [2, 3] об изменении модуля упругости бетона компьютерный расчет выполнялся как без коэффициентов редуцирования начального модуля упругости бетона, учитывающих ползучесть бетона и его трещинообразование [25], так и с коэффициентом 0,2 для всех балок, как пролетных изгибаемых, так и опорных по причине возникновения в них значительных крутящих моментов [23, 24]. Изменение модуля упругости бетона не привело к изменению усилий в конструкции, но увеличило ее прогиб в 5 раз, с 9,49 мм до 47,43 мм. При сравнении результатов кроме данных вновь рассчитанной модели BK SCAD используются данные компьютерных расчетов четырех конечно-элементных моделей работ [2,3].

**Основная часть.** Кессонное перекрытие является плитой, опертой по контуру, подкрепленной снизу ребрами жесткости. В работе [21 с. 419] для пластины, усиленной в двух направлениях взаимно перпендикулярными равноотстоящими друг от друга ребрами, установленными с одной стороны, жесткость конструкции предлагается определять, как сумму, состоящую из цилиндрической жесткости плиты и относительной жесткости ребер:

$$D_x = \frac{E \cdot \delta^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} + \frac{E' \cdot I_1}{d_1}, \quad (1)$$

$$D_y = \frac{E \cdot \delta^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} + \frac{E'' \cdot I_2}{d_2}, \quad (2)$$

где  $E$ ,  $E'$ ,  $E''$  – модули упругости материала плиты и ребер;  $\delta$  – толщина плиты;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $I_1$  и  $I_2$  – моменты инерции ребер жесткости, установленных вдоль осей X и Y, относительно линии, проходящей через центр тяжести таврового сечения;  $d_1$  и  $d_2$  – расстояния между ребрами.

Поэтому в данной работе жесткость перекрытия по направлениям X и Y определяется как сумма цилиндрической жесткости плиты и относительной жесткости отдельных ребер.

Первым действием определяем погонную нагрузку  $q_x$  и  $q_y$ , приходящуюся на балки и зависящую от пролетов перекрытия  $L_x$ ,  $L_y$  и ортогональных жесткостей конструкции  $D_x$ ,  $D_y$ .

Перепишем формулы расчета железобетонных кессонных перекрытий с учетом жесткостей перекрытия  $D_x$  и  $D_y$ :

$$q_x = q \cdot \frac{L_y^4 \cdot D_x}{L_x^4 \cdot D_y + L_y^4 \cdot D_x}, \quad (3)$$

$$q_y = q \cdot \frac{L_x^4 \cdot D_y}{L_x^4 \cdot D_y + L_y^4 \cdot D_x}. \quad (4)$$

Далее находим максимальные изгибающие моменты:

$$M_x^{max} = \alpha_1 \cdot q_x \cdot a \cdot L_x^2 \cdot n_x, \quad (5)$$

$$M_y^{max} = \alpha_2 \cdot q_y \cdot b \cdot L_y^2 \cdot n_y, \quad (6)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты, зависящие от характера распределения нагрузки и вида опорных закреплений. В нашем случае  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,125$ ;  $a$  и

$b$  – шаг балок;  $n_x$  и  $n_y$  – коэффициенты, зависящие от геометрии перекрытия.

Перекрытие рассчитывается на равномерно-распределенную нагрузку  $q = 0,9$  Т/м<sup>2</sup>, аналогично работам [2, 3, 4].

Произведем расчет по уточненной теории, учитывающей пролеты  $L_x$ ,  $L_y$ , и жесткость перекрытия  $D_x$ ,  $D_y$ .

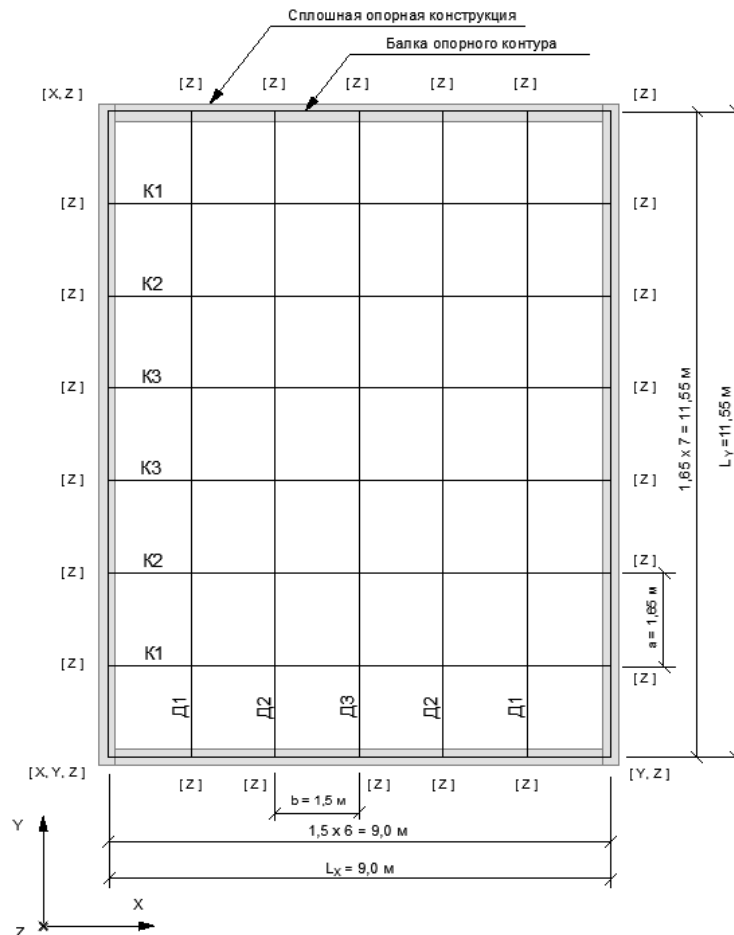


Рис. 1. Схема кессонного перекрытия размером в плане 9,0×11,55 м с кессонами 1,5×1,65 м. К1, К2, К3, Д1, Д2, Д3 – рассчитываемые балки. [X, Y, Z] – связи, установленные в узлах балки опорного контура

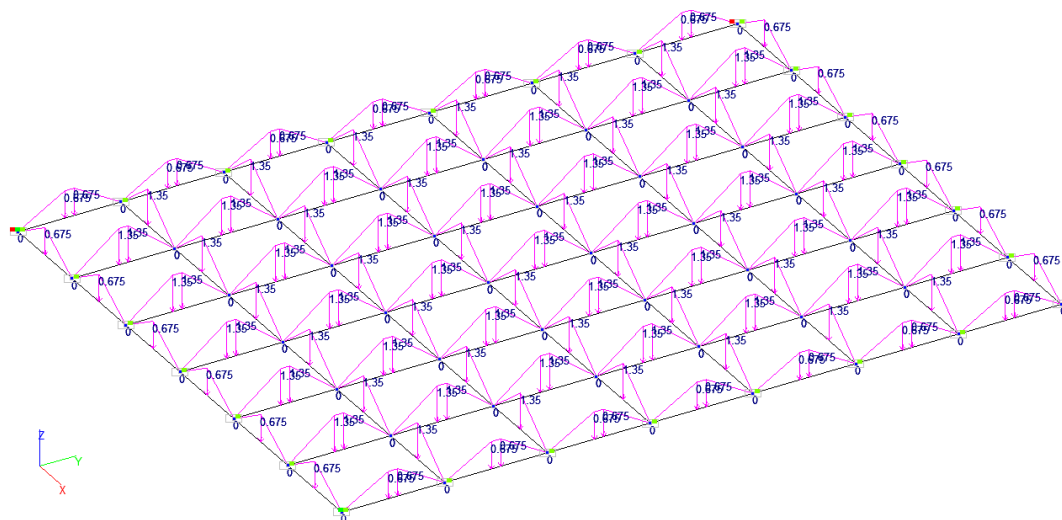


Рис. 2. Схема приложения нагрузки на балки  $q$ , Т/м

Момент инерции отдельных балок вдоль осей X и Y относительно центра тяжести тавров:

$$I_x = I_y = \frac{b_b \cdot h_b^3}{12} + b_b \cdot h_b \cdot a^2, \quad (7)$$

где  $b_b$  – ширина балки (ребра);  $h_b$  – высота ребра;  $a$  – расстояние от центра тяжести ребра до центра тяжести тавра.

$$I_x = \frac{0,2 \cdot 0,4^3}{12} + 0,2 \cdot 0,4 \cdot 0,127^2 = 0,002357 \text{ м}^4, \quad (8)$$

$$I_y = \frac{0,2 \cdot 0,4^3}{12} + 0,2 \cdot 0,4 \cdot 0,122^2 = 0,002257 \text{ м}^4. \quad (9)$$

Жесткость перекрытия вдоль оси X:

$$D_x = \frac{E \cdot \delta^3}{12 \cdot (1-\nu^2)} + \frac{E \cdot I_x}{a} = 3058104 \cdot \left[ \frac{0,06^3}{12 \cdot (1-0,2^2)} + \frac{0,002357}{1,65} \right] = 4426 \text{ Тм}. \quad (10)$$

Жесткость перекрытия вдоль оси Y:

$$D_y = \frac{E \cdot \delta^3}{12 \cdot (1-\nu^2)} + \frac{E \cdot I_y}{b} = 3058104 \cdot \left[ \frac{0,06^3}{12 \cdot (1-0,2^2)} + \frac{0,002257}{1,5} \right] = 4659 \text{ Тм}. \quad (11)$$

Составляющие общей нагрузки, приходящиеся на балки:

$$q_x = q \cdot \frac{L_y^4 \cdot D_x}{L_x^4 \cdot D_y + L_y^4 \cdot D_x} = 0,9 \cdot \frac{11,55^4 \cdot 4426}{9^4 \cdot 4659 + 11,55^4 \cdot 4426} = 0,648 \frac{\text{Т}}{\text{м}^2}, \quad (12)$$

$$q_y = q \cdot \frac{L_x^4 \cdot D_y}{L_x^4 \cdot D_y + L_y^4 \cdot D_x} = 0,9 \cdot \frac{9^4 \cdot 4659}{9^4 \cdot 4659 + 11,55^4 \cdot 4426} = 0,252 \frac{\text{Т}}{\text{м}^2}. \quad (13)$$

Рассматриваем балки короткого направления, установленные вдоль оси X.

Балка К1.

Коэффициент пропорциональности, учитывающий расположение балки от опорного контура вдоль оси Y:

$$\eta_y = \frac{y}{L_y} = \frac{1,65}{11,55} = 0,143, \quad (14)$$

$$n_x = \frac{16}{5} \cdot (\eta_y - 2 \cdot \eta_y^3 + \eta_y^4) = \frac{16}{5} \cdot (0,143 - 2 \cdot 0,143^3 + 0,143^4) = 0,44. \quad (15)$$

Максимальный пролетный изгибающий момент:

$$M_{K1}^{max} = \alpha \cdot q_x \cdot a \cdot L_x^2 \cdot n_x = 0,125 \cdot 0,648 \cdot 1,65 \cdot 9^2 \cdot 0,44 = 4,76 \text{ Тм}. \quad (16)$$

Балка К2.

Коэффициент пропорциональности, учитывающий расположение балки от опорного контура вдоль оси Y:

$$\eta_y = \frac{y}{L_y} = \frac{3,3}{11,55} = 0,286, \quad (17)$$

$$n_x = \frac{16}{5} \cdot (\eta_y - 2 \cdot \eta_y^3 + \eta_y^4) = \frac{16}{5} \cdot (0,286 - 2 \cdot 0,286^3 + 0,286^4) = 0,787. \quad (18)$$

Максимальный пролетный изгибающий момент:

$$M_{K2}^{max} = \alpha \cdot q_x \cdot a \cdot L_x^2 \cdot n_x = 0,125 \cdot 0,648 \cdot 1,65 \cdot 9^2 \cdot 0,787 = 8,52 \text{ Тм}. \quad (19)$$

Балка К3.

Коэффициент пропорциональности, учитывающий расположение балки от опорного контура вдоль оси Y:

$$\eta_y = \frac{y}{L_y} = \frac{4,95}{11,55} = 0,429, \quad (20)$$

$$n_x = \frac{16}{5} \cdot (\eta_y - 2 \cdot \eta_y^3 + \eta_y^4) = \frac{16}{5} \cdot (0,429 - 2 \cdot 0,429^3 + 0,429^4) = 0,976. \quad (21)$$

Максимальный пролетный изгибающий момент:

$$M_{K3}^{max} = \alpha \cdot q_x \cdot a \cdot L_x^2 \cdot n_x = 0,125 \cdot 0,648 \cdot 1,65 \cdot 9^2 \cdot 0,976 = 10,57 \text{ Тм}. \quad (22)$$

Рассматриваем балки длинного направления, установленные вдоль оси Y.

Балка Д1.

Коэффициент пропорциональности, учитывающий расположение балки от опорного контура вдоль оси X:

$$\eta_x = \frac{x}{L_x} = \frac{1,5}{9} = 0,167, \quad (23)$$

$$n_y = \frac{16}{5} \cdot (\eta_x - 2 \cdot \eta_x^3 + \eta_x^4) = \frac{16}{5} \cdot (0,167 - 2 \cdot 0,167^3 + 0,167^4) = 0,507. \quad (24)$$

Максимальный пролетный изгибающий момент:

$$M_{D1}^{max} = \alpha \cdot q_y \cdot b \cdot L_y^2 \cdot n_y = 0,125 \cdot 0,252 \cdot 1,5 \cdot 11,55^2 \cdot 0,507 = 3,2 \text{ Тм}. \quad (25)$$

Балка Д2.

Коэффициент пропорциональности, учитывающий расположение балки от опорного контура вдоль оси X:

$$\eta_x = \frac{x}{L_x} = \frac{3}{9} = 0,333, \quad (26)$$

$$n_y = \frac{16}{5} \cdot (\eta_x - 2 \cdot \eta_x^3 + \eta_x^4) = \frac{16}{5} \cdot (0,333 - 2 \cdot 0,333^3 + 0,333^4) = 0,869. \quad (27)$$

Максимальный пролетный изгибающий момент:

$$M_{Д2}^{max} = \alpha \cdot q_y \cdot b \cdot L_y^2 \cdot n_y = 0,125 \cdot 0,252 \cdot 1,5 \cdot 11,55^2 \cdot 0,869 = 5,48 \text{ Тм}. \quad (28)$$

Балка Д3.

Максимальный пролетный изгибающий момент:

$$M_{Д3}^{max} = \alpha \cdot q_y \cdot b \cdot L_y^2 \cdot n_y = 0,125 \cdot 0,252 \cdot 1,5 \cdot 11,55^2 \cdot 1 = 6,3 \text{ Тм}. \quad (29)$$

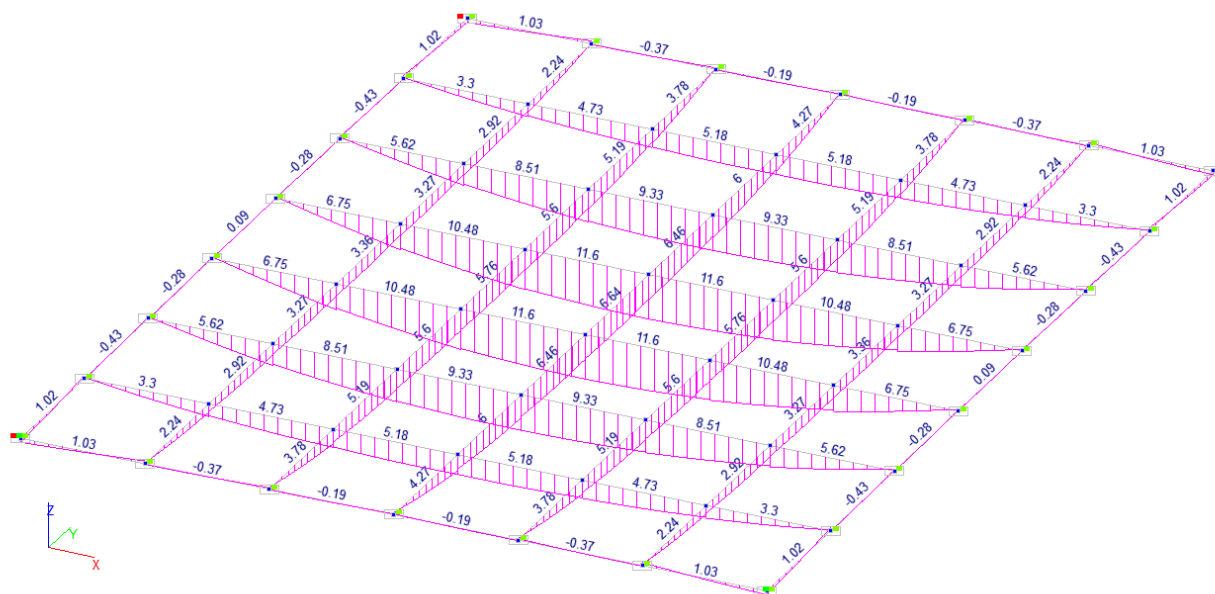


Рис. 3. Эпюры изгибающих моментов  $M$ ,  $T_m$  в балках модели BK SCAD, состоящей из стержневых конечных элементов таврового поперечного сечения с шириной полки, равной расстоянию шага балок, перекрытия размером в плане ( $L_x \times L_y$ )  $9,0 \times 11,55$  м с кессонами  $1,5 \times 1,65$  м, работающего на равномерно – распределенную нагрузку  $q = 0,9 \text{ Т/м}^2$

Данные аналитического расчета и компьютерных моделей кессонного перекрытия представлены в таблице 1.

### Выводы

1. В формулах аналитического метода расчета прямых шарнирно – опертых по контуру ребристых кессонных железобетонных перекрытий, основанного на балочной аналогии, при определении составляющих общей нагрузки, необходимо использовать величины пролетов и ортогональную жесткость перекрытия, состоящую из суммы цилиндрической жесткости плиты и относительной жесткости ребер. Условием применения данной жесткости является одинаковое расстояние между параллельными балками.

2. Значения изгибающих моментов в балках прямоугольного в плане шарнирно-опертого по контуру ребристого перекрытия с прямоугольными кессонами, определенные уточненным

аналитическим способом, основанном на балочной аналогии, а также методом конечных элементов, реализованным в BK SCAD с применением стержневой конечно-элементной модели таврового поперечного сечения с шириной полки, равной шагу балок, имеют близкие значения. Отклонения компьютерного расчета от аналитического метода составляют от +5,0 до +9,7 %, что можно объяснить погрешностями расчетов, как аналитического, так и компьютерного.

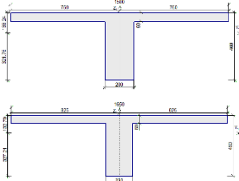
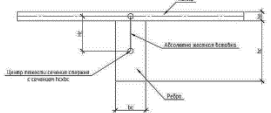
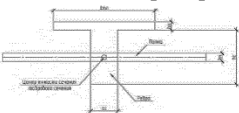
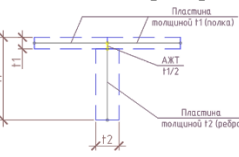
3. Значения изгибающих моментов в балках прямоугольного в плане шарнирно-опертого по контуру ребристого перекрытия с прямоугольными кессонами, определенные уточненным аналитическим способом, основанном на балочной аналогии, а также методом конечных элементов, реализованным в BK SCAD с применением модели, состоящей из полки, смоделированной оболочечными конечными элементами и ребер, представляющих собой стержни тавро-

вого поперечного сечения со свесами полок, равными тройной толщине плиты, имеют близкие значения. Максимальные отклонения компью-

терного расчета от аналитического метода составляют -5,7 %, что можно объяснить погрешностями расчетов, как аналитического, так и компьютерного.

Таблица 1

**Сравнение значений изгибающих моментов в балках шарнирно опертого по контуру кессонного перекрытия размером в плане ( $L_x \times L_y$ ) 9,0×11,55 м, полученные аналитическим методом с учетом величин пролетов и жесткостей перекрытия, а также при помощи компьютерных моделей вычислительного комплекса SCAD**

| Расчетная модель                                                                                                                                                                                                                        | Изгибающий момент в балках М, Тм |                 |                  |                 |                 |                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                                                                                                                                                                                                                         | К1                               | К2              | К3               | Д1              | Д2              | Д3              |
| Аналитическая балочная с учетом величин пролетов и жесткости перекрытия                                                                                                                                                                 | 4,76<br>100%                     | 8,52<br>100%    | 10,57<br>100%    | 3,2<br>100%     | 5,48<br>100%    | 6,3<br>100%     |
| Балочная модель<br><br>Тавровые балки - пространственный стержень тип КЭ 5                                                                             | 5,18<br>108,8%                   | 9,33<br>109,5%  | 11,6<br>109,7%   | 3,36<br>105%    | 5,76<br>105,1%  | 6,64<br>105,4%  |
| Модель 1 [1,2]<br><br>Полка – оболочечные КЭ, ребро – пространственный стержень тип КЭ 5, соединение элементов жесткими вставками                     | 5,137<br>107,9%                  | 9,155<br>107,5% | 11,153<br>105,5% | 3,709<br>115,9% | 6,674<br>121,8% | 7,691<br>122,1% |
| Модель 2 [1, 2]<br><br>Полка перекрытия – оболочечные КЭ, тавровое ребро – пространственный стержень тип КЭ 5, соединение элементов в центре тяжести | 4,49<br>94,3%                    | 8,1<br>95,1%    | 10,07<br>95,3%   | 3,03<br>94,7%   | 5,17<br>94,3%   | 5,95<br>94,4%   |
| Модель 3 [1, 2]<br><br>Полка – плитные КЭ тип 11, ребро – оболочечные КЭ тип 41, соединение абсолютно жестким телом                                  | 3,634<br>76,3%                   | 6,57<br>77,1%   | 8,177<br>77,4%   | 2,433<br>76%    | 4,151<br>75,8%  | 4,781<br>75,9%  |
| Модель 4 [1, 2]<br><br>Полка и ребра – оболочечные КЭ тип 41, соединение в узлах                                                                     | 3,815<br>80,2%                   | 6,893<br>80,9%  | 8,578<br>81,2%   | 2,554<br>79,8%  | 4,36<br>79,6%   | 5,021<br>79,7%  |

4. Значения изгибающих моментов в балках прямоугольного в плане шарнирно-опертого по контуру ребристого перекрытия с прямоугольными кессонами, определенные уточненным аналитическим способом, а также методом конечных элементов, реализованным в BK SCAD с применением плитных и оболочечных конечных элементов, существенно отличаются. Максимальные отклонения компьютерного расчета от аналитического метода в рассматриваемом примере составили -24,2 %.

5. Так как сравнение компьютерного расчета выполняется с аналитическим способом, основанном на балочной аналогии, можно предположить, что расчет модели, созданной из плоских конечных элементов, образующих пространственную систему, приводит к экономичным результатам по сравнению со стержневой моделью. При этом следует отметить, что плоские конечные элементы, по сравнению с линейными, с математической точки зрения метода конечных элементов являются менее точными.

6. Для всестороннего изучения работы сложной многократно статически неопределимой конструкции необходимо создавать несколько конечно-элементных моделей.

7. При выполнении верификационных расчетов на ЭВМ методом конечных элементов для подтверждения достоверности полученного напряженно – деформированного состояния необходимо проводить сравнение с данными натурных или модельных испытаний конструкций. Для сложных многократно статически неопределимых систем, для которых отсутствуют известные аналитические решения, другие способы изучения сходимости получаемых результатов МКЭ имеют погрешность.

8. Вопросы сходимости и достоверности результатов верификационных вычислений метода конечных элементов имеют важное практическое значение и требуют дальнейшего изучения на различных компьютерных моделях и несущих строительных системах.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перельмутер А., Криксунов Э. BIM в строительном проектировании – белые пятна. CADMASTER. 2021. № 1(95). С. 96–99.
2. Лоскутов И.С. Монолитные железобетонные кессонные перекрытия [Электронный ресурс] URL: <https://dwg.ru/lib/2046>
3. Ефимцева Е.Э. Способы моделирования кессонных перекрытий // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 11–5. С. 14–20.
4. Линович Л.Е. Расчет и конструирование частей гражданских зданий. К.: Будівельник; 1972. 644 с.
5. Залигер Р. Железобетон: его расчет и проектирование. Перевод с немецкого под ред. П.Я. Каменцева М.-Л.: Изд-во ГНТИ, 1931. 671 с.
6. Вахненко П.Ф., Хилобок В.Г., Андрейко Н.Т., Яровой М.Л. Расчет и конструирование частей жилых и общественных зданий: справочник проектировщика. К.: Будівельник; 1987. 424 с.
7. Улицкий И.И., Ривкин С.А., Самолетов М.В., Дыховичный А.А., Френкель М.М., Кретов В.И. Железобетонные конструкции. К.: Будівельник; 1972. 992 с.
8. Иванов-Дятлов И.Г. Железобетонные конструкции. М.-Л.: Министерство коммунального хозяйства РСФСР; 1950. 296 с.
9. Карпухин Н.С. Железобетонные конструкции. М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре; 1957. 442 с.
10. Мурашев В.И., Сигалов Э.Е., Байков В.Н. Железобетонные конструкции. Общий курс. М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам; 1962. 662 с.
11. Мозголов М.В., Козлова Е.В. О применении жесткостей аналитического метода расчета прямых железобетонных кессонных перекрытий // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. 33(2). С. 122–138. doi:10.37538/2224-9494-2022-2(33)-122-138
12. Малахова А.Н. Монолитные кессонные перекрытия зданий // Вестник МГСУ. 2013. № 1. С. 79–86.
13. Шибаева В.Д. Исследование напряженно-деформированного состояния монолитных кессонных перекрытий // Молодой ученый. 2021. № 16 (358). Часть II. С. 119–123.
14. Никитин К.Е., Кирсанов О.А. Сравнительное исследование конечно-элементных методик расчета ребристых железобетонных перекрытий. Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. 18(3). С. 242–254. doi:10.22363/1815-5235-2022-18-3-242-254.
15. Секулович М. Метод конечных элементов. Перевод с сербского Ю.Н. Зуева. Под редакцией В.Ш. Барбакадзе. М.: Стройиздат; 1993. 664 с.
16. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. К.: Факт, 2005. 344 с.
17. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. М.: ДМК Пресс; 2007. 600 с.



18. Канчели Н.В., Батов П.А., Дробот Д.Ю. Реализованные мембранные оболочки. Расчет, проектирование и возведение. М: Издательство Ассоциации строительных вузов. 2009. 120 с.

19. Перельмутер А.В. Беседы о строительной механике. М.: Издательство SCAD Soft, Издательский дом АСВ; 2016. 304 с.

20. Мозголов М.В., Козлова Е.В. К вопросу создания верификационной модели для расчета кессонного железобетонного перекрытия в вычислительном комплексе SCAD // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. 32(1). С. 128–140. doi:10.37538/2224-9494-2022-1(32)-128-140

21. Вайнберг Д.В., Вайнберг Е.Д. Расчет пластин. К.: Изд-во «Будівельник»; 1970. 436 с.

22. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Фиалко С.Ю., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А. SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD ++. М.: Изд-во «СКАД СОФТ». 2015. 848 с.

23. Мозголов М.В., Козлова Е.В. О разгружающем действии крутящих моментов в балках железобетонных кессонных перекрытий // Градостроительство и архитектура. 2022. Т. 12, № 3. С. 11–20. doi: 10.17673/Vestnik.2022.03.2.

24. Мозголов М.В., Брыль С.В., Козлова Е.В. О влиянии балки опорного контура на напряженно – деформированное состояние балок прямых кессонных железобетонных перекрытий // Системные технологии. 2022. № 43. С. 31–40. doi: 10.55287/22275398\_2022\_2\_31.

25. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве». Плоские безбалочные железобетонные перекрытия. Москва; 2017. URL: [https://www.faufcc.ru/upload/methodical\\_materials/mp60\\_2017.pdf](https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp60_2017.pdf)

#### Информация об авторах

**Мозголов Михаил Валентинович**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства. E-mail: [mvmozgologov@yandex.ru](mailto:mvmozgologov@yandex.ru). Коломенский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет». Россия, 140402, Коломна, ул. Октябрьской революции, д. 408

**Козлова Елизавета Вадимовна**, студент 4-го года обучения направления «Строительство». E-mail: [lizakozlova2014@gmail.com](mailto:lizakozlova2014@gmail.com). Коломенский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Россия, 140402, Коломна, ул. Октябрьской революции, д. 408

Поступила 19.10.2022 г.

© Мозголов М.В., Козлова Е.В., 2023

**Mozgolog M. V., \*Kozlova E. V.**

*Kolomna Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University*

*\*E-mail: [lizakozlova2014@gmail.com](mailto:lizakozlova2014@gmail.com)*

## VERIFICATION OF SCAD MODELS OF REINFORCED CONCRETE COFFERED FLOOR BASED ON AN ANALYTICAL CALCULATION METHOD THAT TAKES INTO ACCOUNT SPANS AND STRUCTURAL RIGIDITY

**Abstract.** In accordance with the modern requirements of urban planning legislation, the design of building structures without the use of BIM technologies is impossible. Strength calculation on an electronic computer is carried out in software complexes implementing the finite element method, in which the forces or stresses calculated in the elements may turn out to be unreliable. There is a number of reasons for this. Analysis of the data of analytical and computer calculations of reinforced concrete coffered structures shows that the forces in the beams may differ significantly depending on the created finite element model and the geometry of the overlap. The work is aimed to find out the most accurate finite element model when calculating reinforced concrete coffered floor. The numerical experiment is based on the work of verification calculations performed in the computing system SCAD of a rectangular overlap with rectangular coffers, modeled by four finite element models. It is concluded that the model consisting of shell finite elements is the most accurate. In addition, the stress obtained is compared with the data of the well-known analytical method for calculating coffered ceilings, which is based on the beam analogy and takes into account only the spans of the structure. In this paper, the analytical calculation of the caisson overlap is carried out both taking into account the spans of the structure and its orthogonal rigidity. The calculation is also performed in the computing system SCAD on a model consisting of rod finite elements of a T-section. The results allow to conclude that the most accurate finite elements models is the bar models. Shell finite element models in the example under consideration show understated results. When performing verification calculations on a computer by the finite

*element method, in order to confirm the reliability of the stress –strain state obtained, it is necessary to compare with the data of full-scale or model tests of structures. For complex, repeatedly statically indeterminate systems for which there is no analytical solutions, other methods of studying the convergence of the obtained FEM results have an error.*

**Keywords:** *coffered floors, floor stiffness, verification, the finite element model, SCAD computing complex.*

## REFERENCES

1. Perel'muter A., Kriksunov E. BIM in construction design – white spots. CAD-MASTER [BIM v stroitel'nom proektirovanii – belye pyatna. CAD-MASTER]. 2021. No. 1(95). Pp. 96–99. (rus)
2. Loskutov I.S. Monolithic reinforced concrete coffered floors [Monolitnye zhelezobetonnye kessonnye perekrytiya]. URL: <https://dwg.ru/lib/2046> (rus)
3. Efimtseva E.E. Methods of modeling coffered ceilings // Actual problems of humanities and natural sciences. 2015. No. 11–5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-modelirovaniya-kessonnyh-perekrytiy> (accessed: 26.09.2022) (rus)
4. Linovich L.E. Calculation and construction of parts of civil buildings [Raschet i konstruirovaniye chastey grazhdanskikh zdaniy]. Kyiv, Budivel'nik Publ., 1972. 644 p. (rus)
5. Zaliger R. Reinforced concrete, its calculation and design. Translation from German by professor P. Kamentsev [Zhelezobeton: ego raschet i proektirovanie. Perevod s nemetskogo pod red. P.Ya. Kamentseva]. M., Leningrad, GNTI Publ., 1931. 671 p. (rus)
6. Vakhnenko P.F., Khilobok V.G., Andreyko N.T., Yarovoy M.L. Calculation and construction of parts of residential and public buildings: designer's handbook. [Raschet i konstruirovaniye chastey zhilykh i obshchestvennykh zdaniy: spravochnik proektirovshchika]. Kyiv, Budivel'nik Publ., 1987. 424 p. (rus)
7. Ulitskii I.I., Rivkin S.A., Samoletov M.V., Dykhovichnyi A.A., Frenkel' M.M., Kretov V.I. Reinforced concrete structures [Zhelezobetonnye konstruksii]. Kyiv, Budivel'nik Publ., 1972. 992 p. (rus)
8. Ivanov-Dyatlov I.G. Reinforced concrete structures [Zhelezobetonnye konstruksii]. Moscow, Leningrad, Ministerstvo kommunal'nogo khozyaystva RSFSR Publ., 1950. 296 p. (rus)
9. Karpukhin N.S. Reinforced concrete structures [Zhelezobetonnye konstruksii]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu i arkhitekture Publ., 1957. 442 p. (rus)
10. Murashev V.I., Sigalov E.E., Baykov V.N. Reinforced concrete structures. General course [Zhelezobetonnye konstruksii. Obshchiy kurs]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu i arkhitekture i stroitel'nym materialam Publ., 1962. 662 p. (rus)
11. Mozglov M.V., Kozlova E.V. Use of analytical method for calculating stiffnesses of straight waffle slabs. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. 33(2). Pp. 122–138. doi: 10.37538/2224-9494-2022-2(33)-122-138 (rus)
12. Malakhova A.N. Monolithic caisson floors of buildings. Vestnik MGSU. 2013. (1). Pp. 79–86. (rus)
13. Shibaeva V.D. Investigation of the stress-strain state of monolithic coffered ceilings. Molodoi uchenyi [Young Scientist]. 2021. (16). Pp. 119–123. (rus)
14. Nikitin K.E., Kirsanov O.A. Comparative study of finite element methods of calculation of ribbed reinforced concrete floors. Construction mechanics of engineering structures and structures. 2022. 18(3). Pp. 242–254. doi:10.22363/1815-5235-2022-18-3-242-254 (rus)
15. Sekulovich M. Finite element method [Metod konechnykh elementov]. Translated from Serbian by Yu.N. Zuev. Edited by V.Sh. Barbakadze. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1993. 664 p. (rus)
16. Gorodetskiy A.S., Evzerov I.D. Computer models of structures [Komp'yuternye modeli konstruksiy]. Kiev: Fact Publ.; 2005. 344 p. (rus)
17. Perel'muter A.V., Slivker V.I. Design models of structures and the possibility of their analysis [Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost' ikh analiza]. Moscow, DMK Press Publ., 2007. 600 p. (rus)
18. Kancheli N.V., Batov P.A., Drobot D.Y. Realized membrane shells. Calculation, design and construction [Realizovannye membrannye obolochki. Raschet, proektirovanie i vozvedenie]. Moscow, Association of Construction Universities Publ. 2009. 120 p. (rus)
19. Perel'muter A.V. Conversations about construction mechanics [Besedy o stroitel'noy mekhanike]. Moscow, SCAD Soft Publ., ASV Publ., 2016. 304 p. (rus)
20. Mozglov M.V., Kozlova E.V. Creation of a SCAD verification model for the design calculations of a reinforced-concrete waffle slab floor system. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. 32(1). Pp. 128–140. doi: 10.37538/2224-9494-2022-1(32)-128-140 (rus)
21. Vaynberg D.V., Vaynberg E.D. Calculation of plates [Raschet plastin]. Kyiv, Budivel'nik Publ., 1970. 436 p. (rus)

22. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Mal-yarenko A.A., Fialko S.Yu., Perel'muter A.V., Perel'muter M.A. SCAD Office. Version 21. The SCAD ++computing complex [SCAD Office. Versiya 21. Vychislitel'nyy kompleks SCAD ++]. Moscow; SKAD SOFT Publ.; 2015. 844 p. (rus)

23. Mozglov M.V., Kozlova E.V. On the Unloading Action of Torque Moments in the Beams of Reinforced Concrete Casson Floors. Gradostroitel'stvo i arhitektura [Urban Construction and Architecture]. 2022. Vol. 12, No. 3. Pp. 11–20. DOI: 10.17673/Vestnik.2022.03.2 (rus)

24. Mozglov M.V., Bryl S.V., Kozlova E.V. On the influence of the support contour beam on the

stress –strain state of beams of straight coffered reinforced concrete floors. System technologies. 2022. No. 43. Pp. 31–40. doi: 10.55287/22275398\_2022\_2\_31 (rus)

25. Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii, Federal'noe avtonomnoe uchrezhdenie

26. «Federal'nyy tsentr normirovaniya, standarti-zatsii i otsenki sootvetstviya v stroitel'stve» flat girderless reinforced concrete floors [Ploskie bezbalochnye zhelezobetonnye perekrytiya: Moscow, 2017. URL: [https://www.faufcc.ru/upload/methodical\\_materials/mp60\\_2017.pdf](https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp60_2017.pdf) (rus)

#### *Information about the authors*

**Mozglov, Mikhail V.** PhD. E-mail: [mvmozglov@yandex.ru](mailto:mvmozglov@yandex.ru). Kolomna Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University. Russia, 140402, Kolomna, October Revolution str., 408

**Kozlova, Elizaveta V.** 4rd year student on "Construction", E-mail: [lizakozlova2014@gmail.com](mailto:lizakozlova2014@gmail.com). Kolomna Institute (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow Polytechnic University" Russia, 140402, Kolomna, October Revolution str., 408

---

*Received 19.10.2022*

#### **Для цитирования:**

Мозголов М.В., Козлова Е.В. Верификация моделей SCAD железобетонного кессонного перекрытия на основе аналитического метода расчета, учитывающего пролеты и жесткость конструкции // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 2. С. 29–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-29-40

#### **For citation:**

Mozglov M.V., Kozlova E.V. Verification of SCAD models of reinforced concrete coffered floor based on an analytical calculation method that takes into account spans and structural rigidity. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 2. Pp. 29–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-29-40

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-41-52

<sup>1,\*</sup>Колчунов Вл.И., <sup>2</sup>Козарез А.В., <sup>3</sup>Протченко М.В.<sup>1</sup>Юго-Западный государственный университет<sup>2</sup>Крымский федеральный университет им. Вернадского<sup>3</sup>Брянский инженерно-технологический университет

\*E-mail: vlik52@mail.ru

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ДЕФОРМИРУЕМОМ ОСНОВАНИИ ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ

**Аннотация.** В статье получены результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций при кручении с изгибом. Определены основные параметры напряженно-деформируемого состояния восьми серий конструкций, в том числе на деформируемом основании и составных. Разработан испытательный стенд для реализации выбранных схем нагружения и получения достоверных опытных значений трещинообразующей нагрузки, прогибов, углов поворота, ширины раскрытия трещин, расстояния между трещинами, а также других параметров конструкций. Нагружение проводилось небольшими ступенями с учетом выдержки нагрузки. Ширина раскрытия трещин измерялась в сжатой и растянутой зонах, на уровне рабочей арматуры и на расстоянии два с половиной диаметра от ее оси. Дополнительно определялся характер развития трещин. Испытания проводились для конструкций на деформируемом основании, а также для составных конструкций из двух слоев бетона различных классов. Прогибы измерялись в 6 точках, с одновременным определением углов поворота. В результате исследований получены значения относительных деформаций по показаниям электротензорезисторов, прогибов и углов поворота в центре испытываемой конструкции и в местах приложения нагрузки.

**Ключевые слова:** изгиб с кручением, железобетонные конструкции, экспериментальные исследования, пространственные трещины, ширина раскрытия трещин, прогиб, угол поворота

**Введение.** Строительство современных зданий и сооружений все чаще сопряжено с применением расчетов конструкций при воздействии сложного сопротивления в виде изгиба с кручением. [1–5]. Данный вид напряженно-деформированного состояния встречается при проектировании конструкций железобетонных высотных зданий, воспринимающих асимметричные нагрузки, зданий и сооружений, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях.

Актуальность проводимых экспериментальных и теоретических исследований конструкций заключается в возможности совершенствования существующих расчетных методик и проверке новых разрабатываемых моделей при данном виде сложного сопротивления [6–11]. За все время исследований проведено сравнительно малое количество экспериментальных и теоретических исследований конструкций при изгибе с кручением [12–20], особенно на деформируемом основании.

Стоит отметить, что существующие экспериментальные исследования сопротивления железобетонных конструкций учитывают малое число опытных параметров. При этом главными из них, требующими углубленного изучения, являются длина и раскрытие трещин при изменении величины нагрузки. Дополнительно необходимо учитывать эффект нарушения сплошности

бетона в областях рабочей арматуры, примыкающих к трещинам. Поэтому получение достоверных экспериментальных данных о состоянии железобетонных конструкций при кручении с изгибом является важным и актуальным фактором развития современной теории железобетона, который позволит уточнить параметры обобщенной трещинообразующей нагрузки, ширины раскрытия трещин, расстояний между трещинами и координаты их образования.

**Методика проведения исследований.** Экспериментальные исследования были проведены с целью проверки разрабатываемой расчетной модели и определения ключевых характеристик сопротивления железобетонных конструкций при кручении с изгибом на деформируемом основании. Для выполнения опытных исследований определены следующие основные задачи:

- 1) разработка программы экспериментальных исследований железобетонных конструкций на деформируемом основании;
- 2) экспериментальная проверка разрабатываемой расчетной методики по оценке сопротивления при кручении с изгибом;
- 3) определение зависимостей главных экспериментальных параметров, таких как: нагрузка при образовании трещин  $R_{sup,crc}$  и в момент раз-

рушения  $R_{sup,u}$ ; прогибы и углы поворота; ширина раскрытия трещин на уровне оси продольной, поперечной растянутой арматуры.

Испытания проведены для восьми серий железобетонных балок сечением 98×200 мм и длиной 1200 мм. Конструкции 1–6 серий испытывались на деформируемых грунтовых основаниях с различным сочетанием заполнителей (песок, щебень, а также проседающий участок грунта) и оснований, 7–8 серии являются составными, с использованием различных классов бетона для сжатой и растянутой зон. Основные параметры экспериментальных балок 1 и 2 группы испытаний представлены в таблице 1 (шифр обычных железобетонных конструкций для аспиранта Козарез А.В.) и таблице 2 (шифр обычных и составных железобетонных конструкций для аспиранта Протченко М.В.). При бетонировании экспериментальных конструкций были изготовлены дополнительные образцы в соответствии с ГОСТ 10180–2012 для определения прочностных свойств бетона на 28-е и 56-е сутки.

При проведении испытаний реализованы две схемы нагружений, а также три варианта деформируемого основания, которое состоит из шести независимых отсеков на песчаной подушке с возможностью использования различных заполнителей, а также пустот основания. Предлагаемые схемы нагружения, локализация

деформируемого основания, а также отеков с пустотами представлены на рисунке 1 и 2. Поперечное и продольное армирование выполнено из гладкой арматурной стали класса А240С диаметром 6 мм. Также были проведены испытания составных конструкций.

Специально сконструированный стенд «КРАБ» выполнен в виде лотка с размерами 1,3×0,56×0,5 м (ДхШхВ) и используется для испытаний железобетонных конструкций длиной до 1,2 м. Лоток собран из деревянных досок толщиной 3 см, которые объединены внутри контура деревянными брусками сечением 4×4 см. Днище отсутствует. Лоток поделен на шесть отсеков: первый и шестой отсек имеют размеры в плане 0,5×0,235 м, а со второго по пятый отсек – 0,5×0,17 м. По двум сторонам стенда, на каждой из сторон, предусмотрено четыре отверстия диаметром 10 см, предназначенные для образования просадки грунтового основания. Каждое отверстие закрыто фанерой размерами 0,33×0,11 м. Во второй и пятый отсек на глубину 30 см был погружен щебень с фракцией 10–20 мм в полиэтиленовых мешках. Толщина слоя составляла 20 см. Для второй группы испытаний во втором и пятом отсеке удалены ребра, а жесткость отсека достигается путем использования только щебеночных заполнителей в полиэтиленовых либо холщевых мешках. Жесткость стенда также достигается продольными горизонтальными брусками размером 10×10 см.

Таблица 1

**Серии, объем и характеристики экспериментальных конструкций аспиранта Козарез А.В.**

| № серии | Шифр конструкции | $h$ , мм | $b$ , мм | $l$ , мм | Схема испытаний (рис. 1) | Плечо приложения нагрузки, мм | Арматура растянутой и сжатой зоны, диаметр – мм, класс | Класс бетона |
|---------|------------------|----------|----------|----------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------|
| I       | C1-B1            | 200      | 98       | 1200     | 1                        | 250                           | Ø6A240C                                                | B25          |
|         | C1-B2            | 200      | 98       | 1200     | 1                        | 250                           | Ø6A240C                                                | B25          |
| II      | C2-B1            | 200      | 98       | 1200     | 2                        | 250                           | Ø6A240C                                                | B25          |
|         | C2-B2            | 200      | 98       | 1200     | 2                        | 250                           | Ø6A240C                                                | B25          |
| III     | C3-B1            | 200      | 98       | 1200     | 3                        | 250                           | Ø6A240C                                                | B25          |
|         | C3-B2            | 200      | 98       | 1200     | 3                        | 250                           | Ø6A240C                                                | B25          |
| IV      | C4-B1            | 200      | 98       | 1200     | 4                        | 250                           | Ø6A240C                                                | B25          |
|         | C4-B2            | 200      | 98       | 1200     | 4                        | 250                           | Ø6A240C                                                | B25          |
| V       | C5-B1            | 200      | 98       | 1200     | 5                        | 250                           | Ø6A240C                                                | B25          |
|         | C5-B2            | 200      | 98       | 1200     | 5                        | 250                           | Ø6A240C                                                | B25          |
| VI      | C6-B1            | 200      | 98       | 1200     | 6                        | 250                           | Ø6A240C                                                | B25          |
|         | C6-B2            | 200      | 98       | 1200     | 6                        | 250                           | Ø6A240C                                                | B25          |

Стенд «КРАБ» погружался в установку в виде металлического лотка и силовой рамы из двутавровой балки и стоек. Лоток выполнен в виде стального короба размером 2,0×2,0 м, а также имеет усиление из швеллеров. Для стоек стенда использовался прокатный двутавр №27, привариваемый к лотку. Внутренняя полость

лотка была заполнена кварцевым песком средней крупности с влажностью 0,04...0,06 о. е. Конечная плотность замерялась иглой-плотномером в 20 точках составила 1,80–1,85 т/м³. Мощность слоя песка – 1,95 м. Песок уплотнялся послойно каждые 10 см, начиная от днища лотка, по два этапа в пять ступеней.

Таблица 2

## Серии, объем и характеристики экспериментальных конструкций аспиранта Протченко М.В.

| № серии | Шифр конструкции | $h$ , мм | $b$ , мм | $l$ , мм | Схема испытаний (рис.1) | Плечо приложения нагрузки, мм | Арматура растянутой и сжатой зоны, диаметр – мм, класс | Класс бетона    |             |
|---------|------------------|----------|----------|----------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------|-------------|
|         |                  |          |          |          |                         |                               |                                                        | растянутой зоны | сжатой зоны |
| I       | C1-Б1,а          | 200      | 98       | 1200     | 1                       | 250                           | Ø6A240C                                                | B25             |             |
|         | C1-Б2,б          | 200      | 98       | 1200     | 1                       | 250                           | Ø6A240C                                                | B25             |             |
| II      | C2-Б1,а          | 200      | 98       | 1200     | 2                       | 250                           | Ø6A240C                                                | B25             |             |
|         | C2-Б2,б          | 200      | 98       | 1200     | 2                       | 250                           | Ø6A240C                                                | B25             |             |
| III     | C3-Б1,а          | 200      | 98       | 1200     | 3                       | 250                           | Ø6A240C                                                | B25             |             |
|         | C3-Б2,б          | 200      | 98       | 1200     | 3                       | 250                           | Ø6A240C                                                | B25             |             |
| IV      | C4-Б1,а          | 200      | 98       | 1200     | 4                       | 250                           | Ø6A240C                                                | B25             |             |
|         | C4-Б2,б          | 200      | 98       | 1200     | 4                       | 250                           | Ø6A240C                                                | B25             |             |
| V       | C5-Б1,а          | 200      | 98       | 1200     | 5                       | 250                           | Ø6A240C                                                | B25             |             |
|         | C5-Б2,б          | 200      | 98       | 1200     | 5                       | 250                           | Ø6A240C                                                | B25             |             |
| VI      | C6-Б1,а          | 200      | 98       | 1200     | 6                       | 250                           | Ø6A240C                                                | B25             |             |
|         | C6-Б2,б          | 200      | 98       | 1200     | 6                       | 250                           | Ø6A240C                                                | B25             |             |
| VII     | C7-БС1           | 200      | 98       | 1200     | 1                       | 250                           | Ø6A240C                                                | B20             | B30         |
|         | C7-БС2           | 200      | 98       | 1200     | 1                       | 250                           | Ø6A240C                                                | B20             | B30         |
|         | C7-БС3           | 200      | 98       | 1200     | 1                       | 250                           | Ø6A240C                                                | B20             | B30         |
| VIII    | C8-БС1           | 200      | 98       | 1200     | 2                       | 250                           | Ø6A240C                                                | B20             | B30         |
|         | C8-БС2           | 200      | 98       | 1200     | 2                       | 250                           | Ø6A240C                                                | B20             | B30         |
|         | C8-БС3           | 200      | 98       | 1200     | 2                       | 250                           | Ø6A240C                                                | B20             | B30         |

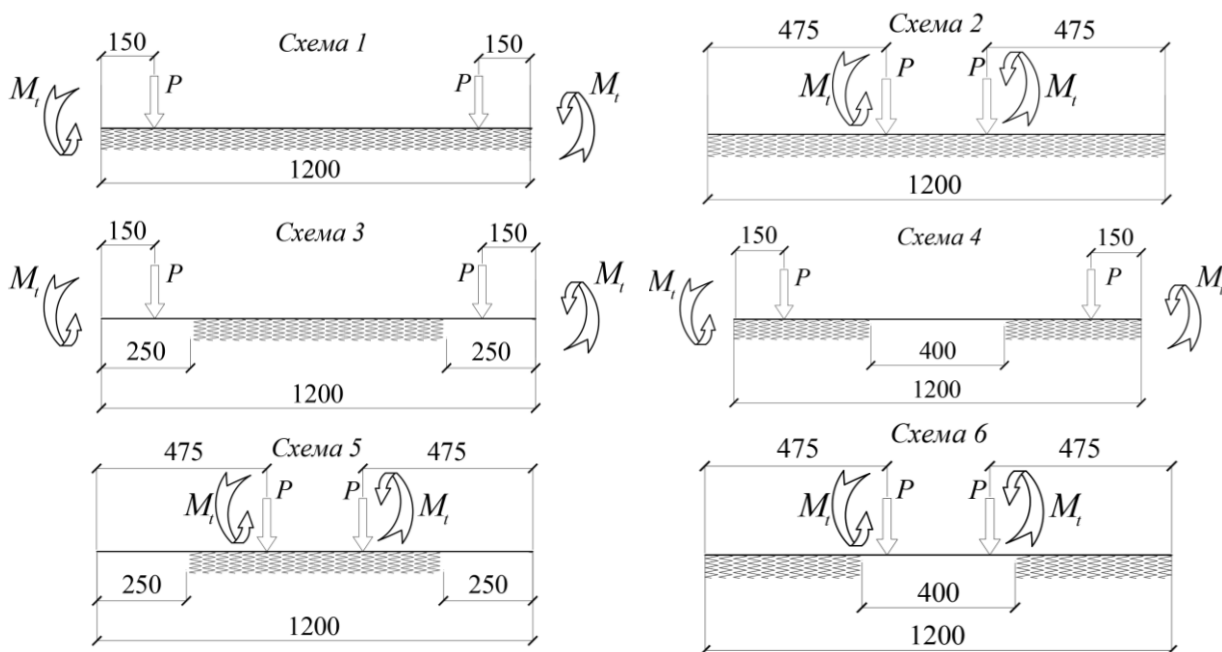


Рис. 1. Схема проведения испытаний

Для выбора схемы уплотнения грунтового основания в стенде «КРАБ», было проанализированы три различных варианта: уплотнение каждого отсека отдельно; попарное уплотнение отсеков (1 и 2, 3 и 4, 5 и 6), а также попарное уплотнение отсеков с одним видом заполнителя (1 и 3,

2 и 4, 5 и 6). Согласно построенным графикам, «нагрузка-осадка», наиболее эффективной оказалась третья схема уплотнения, которая и была принята для проведения испытаний, как наиболее рациональная.

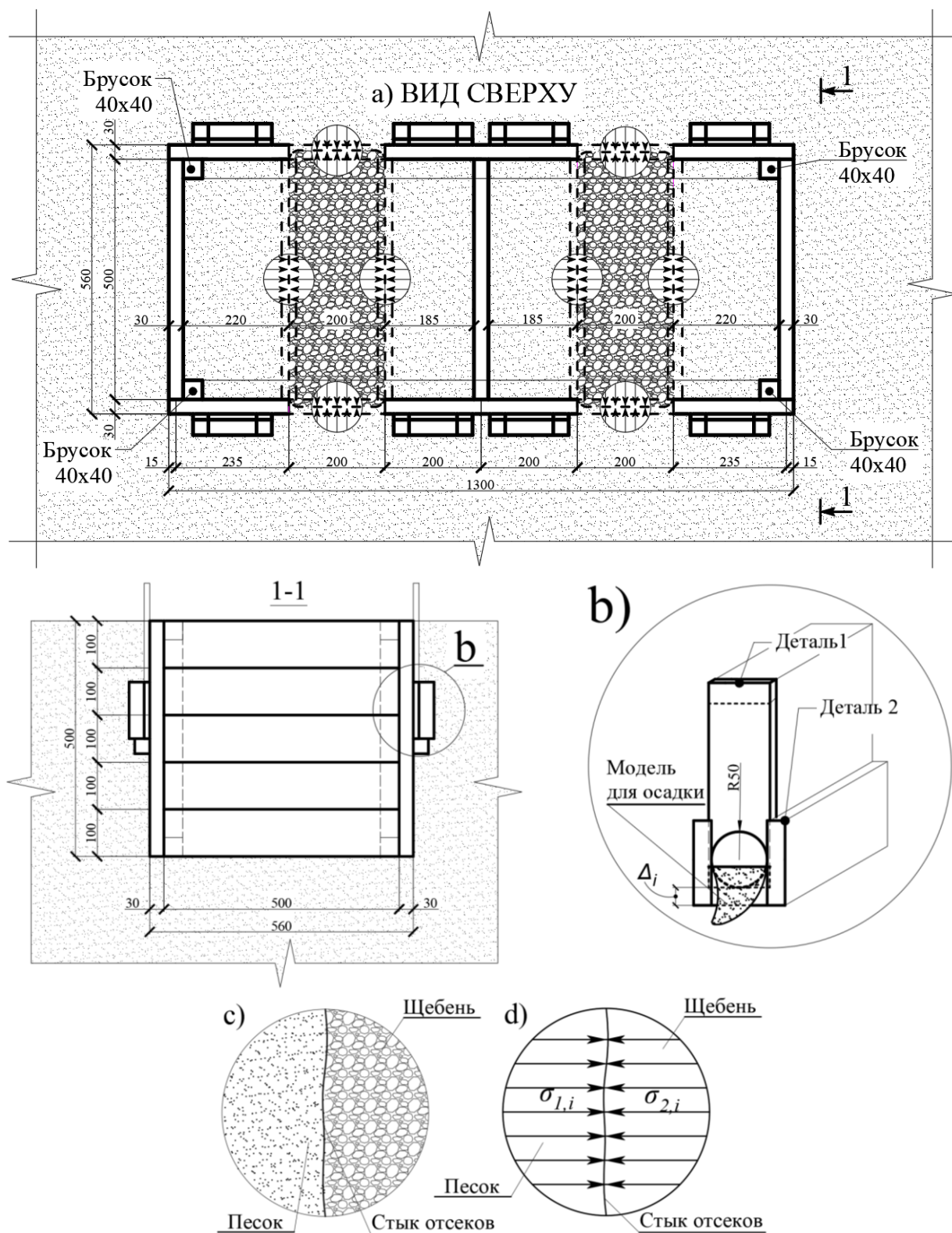


Рис. 2. Схема испытательной установки:  
а) вид сверху и разрез 1-1; б) модель для осадки; в) стык отсеков; г) напряжения в стыке отсеков

На предварительно просеянный, уплотненный и выровненный контактный слой песка мембраной вниз укладывались месдозы. После укладки месдоз на глубину не более 15 мм, зона равномерно обсыпалась песком, а новый слой основания уплотнялся и выравнивался. Мембрана

прогибалась при воздействии нагрузки, что вызывало растяжение тензорезистора и изменение его внутреннего сопротивления. Показания месдоз регистрировали через коммутатор.

Перед испытанием месдозы градуировались в экспериментальной установке под жестким





Прогибомеры марки ПАУ-6, устанавливаемые в середине конструкции, а также в точках приложения нагрузок, представлены на рис. 3. (П1-П6). Объемная модель испытательного стенда с закрепленным образцом представлена на рис. 4. Конструкция стенда позволила получить доступ к растянутой зоне бетона для детального изучения картины образования, развития и раскрытия трещин.

**Результаты исследований.** Перед испытанием осуществлялся осмотр конструкций на предмет естественных дефектов (сколов, начальных трещин и др.). Деформирование проводилось до разрушения с целью получения наибольшего числа экспериментальных данных. На каждом этапе нагружения конструкции осматривались на предмет образования и развития трещин. Фиксация трещин осуществлялась графически на специализированных планшетах. Измерение

ширины раскрытия трещин производилось на уровне рабочей арматуры, а также на удалении двух с половиной диаметров от ее оси ввиду деформационного эффекта в виде эллипсоида трещины.

Линейные деформации испытуемых конструкций фиксируются при помощи электротензорезисторов базой 50 мм, которые устанавливаются в фибровых волокнах или сжатой зоне бетона под концом опасной пространственной трещины.

По результатам испытания получены зависимости относительных деформаций по показаниям электротензорезисторов, углов поворота и прогибов конструкции от прикладываемой нагрузки (рис. 5). Значения прогибов и углов поворота были определены на каждом этапе нагружения конструкций.

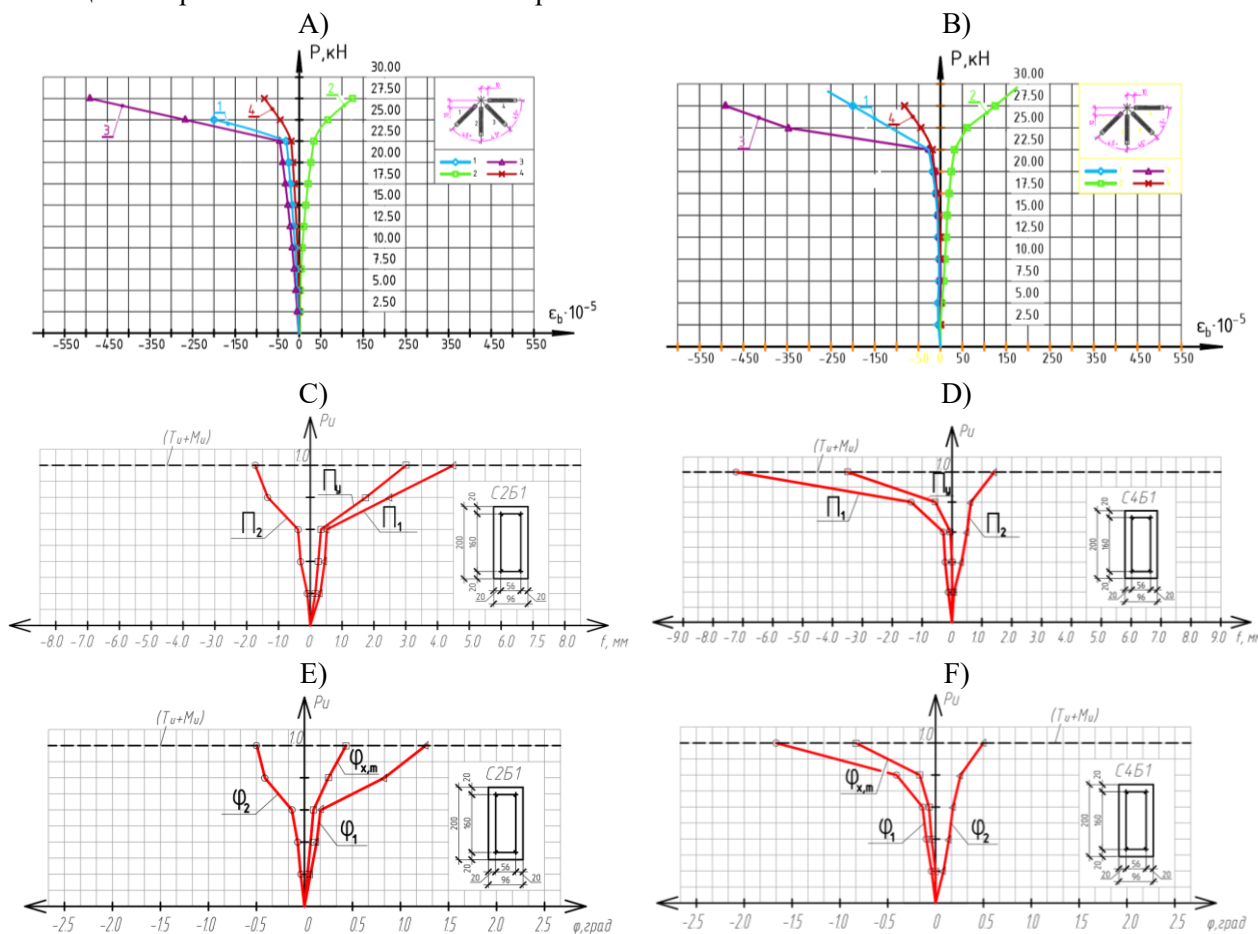


Рис. 5. График зависимости «нагрузка-деформации» по показаниям розетки электротензорезисторов для балки 1 серии II (A) и IV (B), а также зависимости прогибов и углов поворота от деформации для балки 1 серии II (C, D) и IV (E, F) соответственно

Появление и развитие трещин в растянутой зоне фиксируется микроскопом МПБ-3 с 30-ти кратным увеличением, ценой деления 0.05 мм и точностью до 0.025 мм. Картины образования и

развития трещин при проведении испытаний железобетонных конструкций на деформируемом основании при кручении с изгибом приведены на рис. 6 и 7.

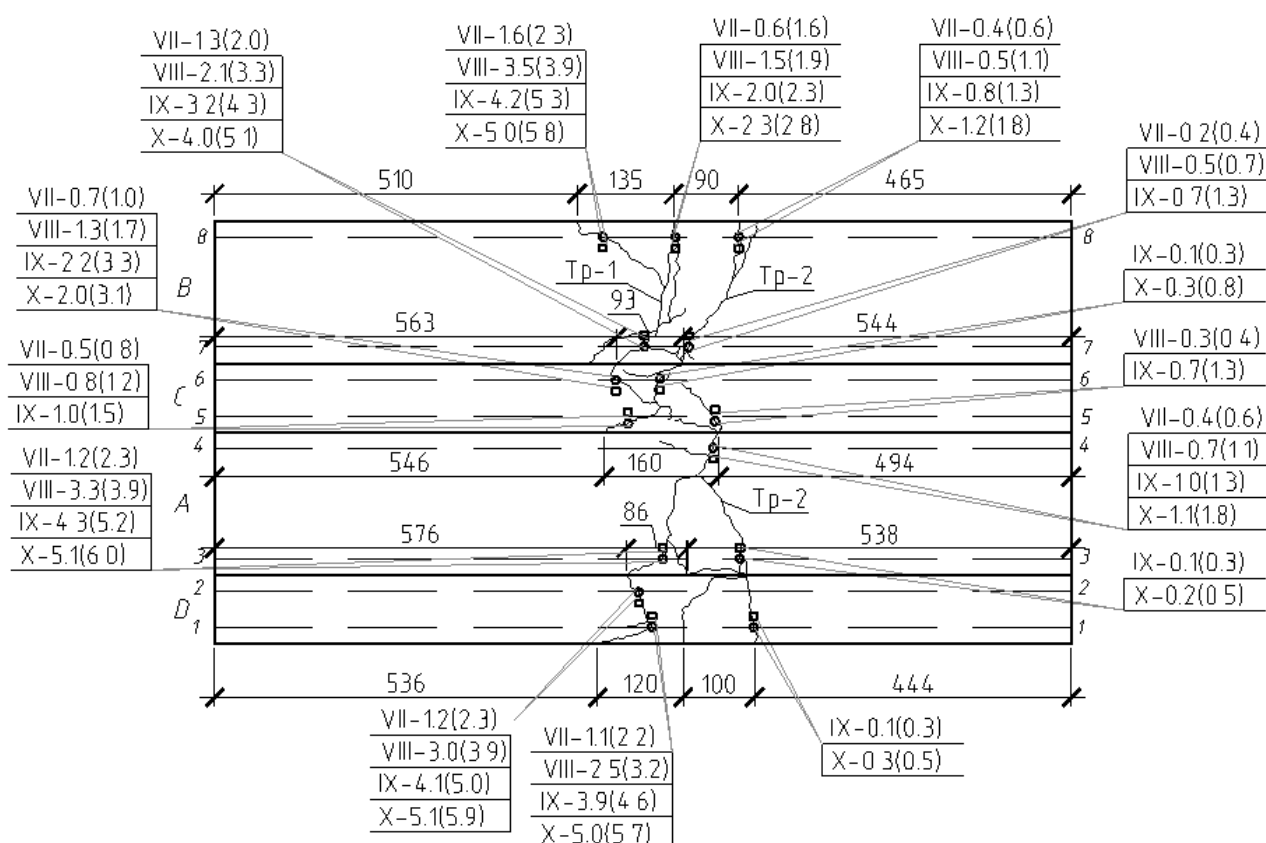


Рис. 6. Раскрытие трещин в экспериментальной железобетонной конструкции С2-Б1

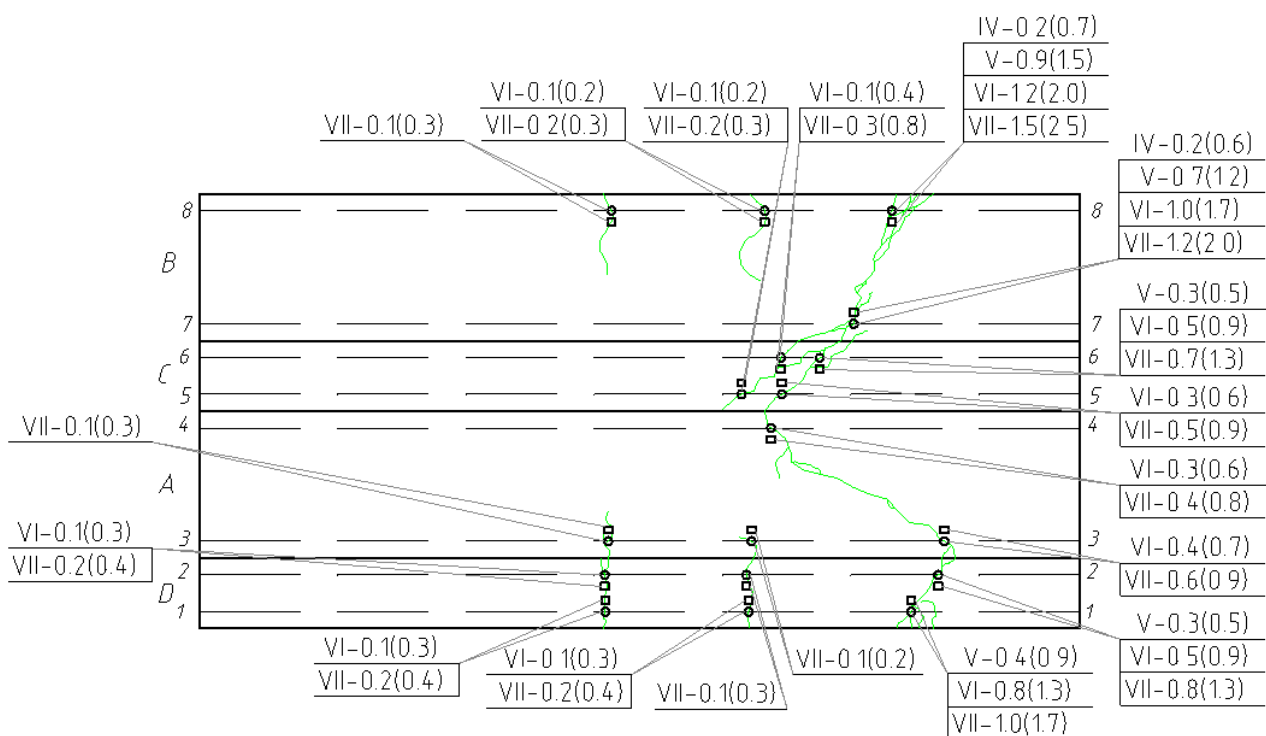


Рис. 7. Раскрытие трещин в экспериментальной железобетонной конструкции С4-Б1

\*Без скобок приведены значения ширины раскрытия трещин, замеренные вдоль оси рабочей арматуры, в скобках – то же, на удалении двух с половиной диаметров от оси рабочей арматуры

Информация о максимальной ширине раскрытия трещин дополнительно фиксировалась в специализированном журнале испытаний. Значения

максимальной ширины раскрытия на боковой стороне конструкции и минимального расстояния между трещинами сведены в таблицу 3.

Таблица 3

## Экспериментальные значения ширины раскрытия трещин и расстояния между трещинами

| № серии | Шифр конструкции | Р <sub>и</sub> , кН | Степень нагружения Р <sub>и</sub> / Р <sub>max</sub> | Ширина раскрытия трещин на боковой стороне А, мм |               | Ширина раскрытия трещин на боковой стороне В, мм |               | Расстояние между трещинами $l_{crc,min}$ , мм |           |
|---------|------------------|---------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------|-----------|
|         |                  |                     |                                                      | $a_{crc-s}$                                      | $a_{crc,max}$ | $a_{crc-s}$                                      | $a_{crc,max}$ | Сторона А                                     | Сторона В |
| I       | С1-Б1            | 7,35                | 0,55                                                 | 1,2                                              | 2,5           | 0,5                                              | 0,8           | 235                                           | 190       |
|         |                  |                     | 0,70                                                 | 2,5                                              | 3,9           | 1,2                                              | 1,5           |                                               |           |
|         |                  |                     | 0,85                                                 | 4,0                                              | 6,5           | 1,8                                              | 2,1           |                                               |           |
|         |                  |                     | 1,0                                                  | 4,5                                              | 8,5           | 3,0                                              | 3,5           |                                               |           |
|         | С1-Б2            | 7,35                | 0,4                                                  | 1,0                                              | 1,6           | 1,0                                              | 1,6           | 360                                           | 370       |
|         |                  |                     | 0,6                                                  | 1,5                                              | 2,0           | 1,5                                              | 2,0           |                                               |           |
|         |                  |                     | 0,8                                                  | 1,9                                              | 2,5           | 1,9                                              | 2,5           |                                               |           |
|         |                  |                     | 1,0                                                  | 2,6                                              | 2,9           | 3,3                                              | 3,9           |                                               |           |
| II      | С2-Б1            | 22,05               | 0,4                                                  | 2,3                                              | 2,9           | 1,0                                              | 1,8           | 70                                            | 130       |
|         |                  |                     | 0,6                                                  | 3,1                                              | 3,1           | 2,5                                              | 2,9           |                                               |           |
|         |                  |                     | 0,8                                                  | 4,7                                              | 4,7           | 3,1                                              | 3,5           |                                               |           |
|         |                  |                     | 1,0                                                  | 5,2                                              | 5,2           | 4,0                                              | 4,9           |                                               |           |
|         | С2-Б2            | 22,05               | 0,4                                                  | 1,2                                              | 2,3           | 1,6                                              | 2,3           | 86                                            | 135       |
|         |                  |                     | 0,6                                                  | 3,3                                              | 3,9           | 3,5                                              | 3,9           |                                               |           |
|         |                  |                     | 0,8                                                  | 4,3                                              | 5,2           | 4,2                                              | 5,3           |                                               |           |
|         |                  |                     | 1,0                                                  | 5,1                                              | 6,0           | 5,0                                              | 5,8           |                                               |           |
| III     | С3-Б1            | 8,58                | 0,55                                                 | —                                                | —             | 0,3                                              | 0,8           | 260                                           | 350       |
|         |                  |                     | 0,70                                                 | 0,1                                              | 0,3           | 0,6                                              | 1,5           |                                               |           |
|         |                  |                     | 0,85                                                 | 0,2                                              | 0,4           | 1,0                                              | 2,1           |                                               |           |
|         |                  |                     | 1,0                                                  | 0,2                                              | 0,5           | 1,2                                              | 2,5           |                                               |           |
|         | С3-Б2            | 8,58                | 0,55                                                 | 1,2                                              | 2,5           | 0,5                                              | 0,8           | 320                                           | 465       |
|         |                  |                     | 0,70                                                 | 2,5                                              | 3,9           | 1,2                                              | 1,5           |                                               |           |
|         |                  |                     | 0,85                                                 | 4,0                                              | 6,5           | 1,8                                              | 2,1           |                                               |           |
|         |                  |                     | 1,0                                                  | 4,5                                              | 8,5           | 3,0                                              | 3,5           |                                               |           |
| IV      | С4-Б1            | 7,35                | 0,25                                                 | —                                                | —             | 0,2                                              | 0,7           | 455                                           | 200       |
|         |                  |                     | 0,5                                                  | —                                                | —             | 0,9                                              | 1,5           |                                               |           |
|         |                  |                     | 0,75                                                 | 0,4                                              | 0,7           | 1,2                                              | 2,0           |                                               |           |
|         |                  |                     | 1,0                                                  | 0,6                                              | 0,9           | 1,5                                              | 2,5           |                                               |           |
|         | С4-Б2            | 7,35                | 0,25                                                 | —                                                | —             | —                                                | —             | 170                                           | 160       |
|         |                  |                     | 0,5                                                  | 0,2                                              | 0,5           | —                                                | —             |                                               |           |
|         |                  |                     | 0,75                                                 | 0,3                                              | 0,8           | 0,1                                              | 0,3           |                                               |           |
|         |                  |                     | 1,0                                                  | 0,5                                              | 1,1           | 0,3                                              | 0,6           |                                               |           |
| V       | С5-Б1            | 9,8                 | 0,7                                                  | 0,9                                              | 1,2           | 0,2                                              | 0,3           | 140                                           | 90        |
|         |                  |                     | 0,8                                                  | 1,3                                              | 1,8           | 0,4                                              | 0,7           |                                               |           |
|         |                  |                     | 0,85                                                 | 2,5                                              | 2,9           | 0,6                                              | 1,2           |                                               |           |
|         |                  |                     | 1,0                                                  | 3,0                                              | 3,7           | 0,8                                              | 1,6           |                                               |           |
|         | С5-Б2            | 9,8                 | 0,7                                                  | —                                                | —             | 0,5                                              | 0,9           | 110                                           | 80        |
|         |                  |                     | 0,8                                                  | 0,3                                              | 0,9           | 0,9                                              | 1,5           |                                               |           |
|         |                  |                     | 0,85                                                 | 0,7                                              | 1,1           | 1,4                                              | 1,9           |                                               |           |
|         |                  |                     | 1,0                                                  | 0,8                                              | 1,7           | 2,0                                              | 2,5           |                                               |           |
| VI      | С6-Б1            | 12,25               | 0,3                                                  | —                                                | —             | 0,7                                              | 1,2           | 60                                            | 50        |
|         |                  |                     | 0,5                                                  | 0,1                                              | 0,2           | 1,1                                              | 1,7           |                                               |           |
|         |                  |                     | 0,7                                                  | 0,3                                              | 0,4           | 1,8                                              | 2,2           |                                               |           |
|         |                  |                     | 0,9                                                  | 0,3                                              | 0,7           | 2,2                                              | 2,7           |                                               |           |
|         | С6-Б2            | 12,25               | 0,3                                                  | 0,9                                              | 1,5           | —                                                | —             | 100                                           | 130       |
|         |                  |                     | 0,5                                                  | 1,6                                              | 2,1           | 0,2                                              | 0,4           |                                               |           |
|         |                  |                     | 0,7                                                  | 2,1                                              | 2,8           | 0,5                                              | 1,4           |                                               |           |
|         |                  |                     | 0,9                                                  | 2,9                                              | 3,3           | 0,9                                              | 1,7           |                                               |           |

**Выводы.**

1. Сформулированы цель и задачи проводимых исследований. Определены число испытываемых конструкций, схемы испытаний. Испытательный стенд используется для получения данных трещинообразующей нагрузки, координат образования трещин, прогибов и углов поворота, ширины раскрытия трещин и расстояний между ними, а также главных деформаций при изменении точек приложения нагрузки, величины изгибающего и крутящего моментов для сложного сопротивления в виде изгиба с кручением на деформируемом основании

2. Разработанная методика испытаний конструкций позволяет проверить расчетную модель и данные о напряженно-деформированном состоянии опытных образцов под действием изгиба с кручением на сложном деформируемом грунтовом основании. При этом технология включает отдельные области для песчаных и щебеночных грунтов и их границы между отдельными областями с мездозами, а также специальный способ для определения просадки.

3. Разработаны технология и алгоритм проведения испытаний, Описан порядок сборки испытательного стенда «КРАБ», схема уплотнения отсеков для слоев основания с помощью домкрата с манометром на  $250 \text{ кг/см}^2$  с приведением к расчетному давлению  $400 \text{ кг/см}^2$  для каждого отсека.

4. В соответствии с программой экспериментальных исследований определены достоверные данные о напряженно-деформированном состоянии железобетонной конструкции на деформируемом основании, по показаниям розеток тензореисторов получены графики зависимости деформаций от нагрузки, определены ширина раскрытия трещин, расстояние между трещинами, прогибы и углы поворота.

5. По результатам испытаний определены соотношения между опытными величинами и проведен анализ. Наименьшие значения прогибов железобетонной конструкции резонно получено при использовании первой схемы испытаний с шестью песчаными отсеками. Наибольшие прогибы и углы поворота конструкции наблюдаются при использовании четвертой схемы испытаний. По сравнению с первой серией величины прогиба отличаются более чем в 2–2,1 раза в отсеках с песчаным и щебеночным основанием и в 2,5–3 раза для 3 и 4 отсеков с просадкой грунта в сравнении с аналогичными песчаными отсеками. Для 4 схемы испытаний наибольший изгибающий момент находится в центре железобетонной конструкции, поэтому характер полученных результатов хорошо описывается теорией. При этом величина углов поворота отличается не так

незначительно: порядка 1,8–2 раз в зависимости от замеряемой точки. Также 4 схема испытаний имеет наименьшую ширину раскрытия трещин.

Отношения прогибов конструкции составляет 1,1–6 раз (отношение серии 2 к серии 1), 1,2–1,3 раза (серия 3 к серии 1), 2–2,5 раза (серия 4 к серии 1), 1,4–4 раза (серия 5 к серии 1), 1,2–2,4 раза (серия 6 к серии 1).

6. Наибольшие разрушающие нагрузки имеют 2, 5 и 6 схема испытаний за счет обеспечения минимального изгибающего и крутящего моментов. В случае, когда отсеки с просадкой грунта остаются ненагруженными, разрушение происходит при наименьшем усилии, за счет большей величины реакции грунтов основания в точках приложения внешних моментов. Прогиб конструкции в точках приложения сил на грунтовое основание выше по сравнению с просадкой основания 1,5–1,8 раза, а угол поворота в 1,4–1,6 раза.

Отношения углов поворота конструкции составляет 1,2–5,6 раз (отношение серии 2 к серии 1), 1,5–1,8 раза (серия 3 к серии 1), 1,3–2,7 раза (серия 4 к серии 1), 1,5–3,3 раза (серия 5 к серии 1), 1,1–2,8 раза (серия 6 к серии 1).

7. Ширина раскрытия трещин при нагружении пустотных отсеков основания выше в 1,2–1,8 раза чем при нагружении песчаных отсеков. При этом наибольшие значения ширины раскрытия трещин наблюдаются для 1, 2 и третьей схемы испытаний 6–8,5 мм. Значения ширины раскрытия трещин на расстоянии двух с половиной диаметров отличается от 1,2 до 2 раз в зависимости от серии конструкций.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Голышев А. Б., Колчунов Вл. И. Сопротивление железобетона К.: Основа. 2009. 432 с.
2. Бондаренко В.М., Колчунов Вл.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: АСВ, 2004. 471 с.
3. Верюжский Ю.В., Колчунов Вл.И. Методы механики железобетона. Учебное пособие. К.: Книжное издательство НАУ, 2005. 653 с
4. Голышев А. Б., Колчунов Вл. И., Яковенко И. А. Сопротивление железобетонных конструкций, зданий и сооружений, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях. К.: Талком, 2015. 371 с.
5. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 410 с.
6. Kim C., Kim S., Kim K.-H., Shin D., Haroon, M., Lee, J.-Y. Torsional Behavior of Reinforced Concrete Beams with High-Strength Steel Bars // ACI Structural Journal. 2019. 116. Pp. 251–233. DOI:10.14359/51718014

7. Bernardo L. Modeling the Full Behavior of Reinforced Concrete Flanged Beams under Torsion // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9: 2730. Pp. 1–16. DOI:10.3390/app9132730
8. Karpyuk V.M., Kostyuk A.I., Semina Y.A. General Case of Nonlinear Deformation-Strength Model of Reinforced Concrete Structures // *Strength of Materials*. 2018. Vol. 50, №. 3. Pp. 453–454. DOI: 10.1007/s11223-018-9990-9
9. Krístek V., Průša J., Vitek J.L. Torsion of Reinforced Concrete Structural Members // *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 272. Pp. 178–184. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.272.178
10. Santhakumar R., Dhanaraj R., Chandrasekaran E. Behaviour of retrofitted reinforced concrete beams under combined bending and torsion: A numerical study // *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2007. No. 7. Pp. 1–7. DOI: 10.56748/ejse.769
11. Kalkan I., Kartal S. Torsional Rigidities of Reinforced Concrete Beams Subjected to Elastic Lateral Torsional Buckling // *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 11. No.7. Pp. 969–972.
12. Lin W. Experimental investigation on composite beams under combined negative bending and torsional moments // *Advances in Structural Engineering*, 2020. Vol. 24(6). Pp. 1456–1465. DOI: 10.1177/1369433220981660
13. Nahvi H., Jabbari M. Crack detection in beams using experimental modal data and finite element model // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2005. Vol. 47. Pp.1477–1497. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2005.06.008
14. Vishnu H. Jariwalaa, Paresh V. Patel, Sharadkumar P. Purohit. Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 51. Pp. 282–289. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.01.038
15. Tsai H.-C., Liao M.-C. Modeling Torsional Strength of Reinforced Concrete Beams using Genetic Programming Polynomials with Building Codes // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2019. Vol. 23. Pp. 3464–3475. DOI: 10.1007/s12205-019-1292-7
16. Kolchunov, V., Dem'yanov, A., Naumov N. Analysis of the “nagel effect” in reinforced concrete structures under torsion with bending // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, Pp. 95
17. Колчунов В.И., Федоров В.С. Понятийная иерархия моделей в теории сопротивления строительных конструкций // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. Vol. 8. Pp. 16–23. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.08.16-23
18. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов В.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Конорев А.В. Результаты экспериментальных исследований конструкций квадратного и коробчатого сечений из высокопрочного бетона при кручении с изгибом // *Строительство и реконструкция*. 2018. Vol. 6 (80). с. 32–43.
19. Колчунов В.И., Демьянов А.И., Печенев И.В. Результаты экспериментальных исследований конструкций квадратного сечения при кручении с изгибом // *Строительство и реконструкция*. 2020. №5. С. 3–12. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-91-5-3-12
20. Dem'yanov A., Kolchunov V., Iakovenko I., Kozarez A. Load bearing capacity calculation of the system "reinforced concrete beam - deformable base" under torsion with bending // *E3S Web of Conferences: 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM* 2019. 04059. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704059

*Информация об авторах*

**Колчунов Владимир Иванович**, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Уникальные здания и сооружения». E-mail: vlik52@mail.ru Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ), Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

**Козарез Анастасия Вадимовна**, аспирант Академии Строительства и Архитектуры. E-mail: kozarez.1995@mail.ru Крымский федеральный университет им. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского), Россия, 295007, Симферополь, просп. Академика Вернадского, 4.

**Протченко Максим Владимирович**, аспирант кафедры «Строительные конструкции». E-mail: maxBROMmax@ua.ru Брянский инженерно-технологический университет (БГИТУ), Россия, 241037, Брянск, просп. Станке Димитрова, 3.

*Поступила 17.09.2022 г.*

© Колчунов В.И., Козарез А.В., Протченко М.В., 2023

<sup>1,\*</sup>Kolchunov V.I., <sup>2</sup>Kozarez A.V., <sup>1</sup>Protchenko M.V.<sup>1</sup>Southwestern State University<sup>2</sup>Vernadsky Crimean Federal University. Vernadsky Crimean Federal University<sup>3</sup>Bryansk Engineering and Technological University

\*E-mail: vlik52@mail.ru

## RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES RESISTANCE ON A DEFORMABLE BASE IN BENDING WITH TORSION

**Abstract.** The article obtains the results of experimental studies of reinforced concrete structures under torsion with bending. The basic parameters of the stress-strain state of eight series of structures, including those on the deformable base and composite ones, have been determined. A test stand is developed for realization of the chosen loading schemes and getting of reliable experimental values of crack loading, deflections, angles of turn, crack opening width, distance between cracks and other parameters of the structures. Loading is carried out smoothly, in small steps with endurance at each stage. The value of crack opening width is fixed in the compressed and stretched working reinforcement, at the distance of two diameters from the reinforcement axis, in the middle of the height of an experimental reinforced concrete structure, and at characteristic points along the entire crack profile. Tests is conducted for structures on a deformable base and for composite structures of two layers of different concrete classes. The deflections are measured at six points, with simultaneous determination of the rotation angles. The research results show, that the values of relative deformations according to the readings of electrical resistors, deflections and angles of rotation in the center of the tested structure and in the places where the load is applied are obtained.

**Keywords:** bending with torsion, reinforced concrete structures, experimental studies, spatial cracks, crack opening width, deflection, rotation angle

### REFERENCES

1. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. Resistance of reinforced concrete [Soprotivlenie zhelezobetona]. K.: Osnova. 2009. 432 p.(rus)
2. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Calculation models of strength resistance of reinforced concrete [Raschetnye modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona]. M.: ASV, 2004. 471 p. (rus)
3. Veryuzhskij Yu.V., Kolchunov V.I. Methods of mechanics of reinforced concrete [Metody mekhaniki zhelezobetona]. K.: NAU, 2005. 653 p. (rus)
4. Golyshev A.B., Kolchunov V.I., YAKOVENKO I. A. Resistance of reinforced concrete structures, buildings and structures erected in complex engineering and geological conditions [Soprotivlenie zhelezobetonnykh konstrukcij, zdaniy i sooruzhenij, vozvodimyh v slozhnyh inzhenerno-geologicheskikh usloviyah]. K.: Talkom, 2015. 371 p. (rus)
5. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics [Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona]. M.: Strojizdat, 1996. 410 p. (rus)
6. Kim C., Kim S., Kim K.-H., Shin D., Haroon, M., Lee, J.-Y. Torsional Behavior of Reinforced Concrete Beams with High-Strength Steel Bars. ACI Structural Journal. 2019. 116. Pp. 251–233. DOI:10.14359/51718014
7. Bernardo L. Modeling the Full Behavior of Reinforced Concrete Flanged Beams under Torsion. Applied Sciences. 2019. Vol. 9. Pp. 2730. DOI:10.3390/app9132730
8. Karpyuk V.M., Kostyuk A.I., Semina Y.A. General Case of Nonlinear Deformation-Strength Model of Reinforced Concrete Structures. Strength of Materials. 2018. Vol. 50, No. 3. Pp. 453–454. DOI: 10.1007/s11223-018-9990-9
9. Křístek V., Průša J., Vitek J.L. Torsion of Reinforced Concrete Structural Members. Solid State Phenomena. 2018. Vol. 272. Pp. 178–184. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.272.178
10. Santhakumar R., Dhanaraj R., Chandrasekaran E. Behaviour of retrofitted reinforced concrete beams under combined bending and torsion: A numerical study. Electronic Journal of Structural Engineering. 2007. No. 7. Pp. 1–7. DOI: 10.56748/ejse.769
11. Kalkan I., Kartal S. Torsional Rigidities of Reinforced Concrete Beams Subjected to Elastic Lateral Torsional Buckling. International Journal of Civil and Environmental Engineering. 2017. Vol. 11. No.7. Pp. 969–972.
12. Lin W. Experimental investigation on composite beams under combined negative bending and torsional moments. Advances in Structural Engineering, 2021. Vol. 24(6). Pp. 1456–1465. DOI:10.1177/1369433220981660
13. Nahvi H., Jabbari M. Crack detection in beams using experimental modal data and finite element model. International Journal of Mechanical Sciences. 2005. Vol. 47. Pp. 1477–1497. DOI:10.1016/j.ijmecsci.2005.06.008



14. Vishnu H. Jariwala, Paresh V. Patel, Sharadkumar P. Purohit. Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 51. Pp. 282–289. DOI:10.1016/j.proeng.2013.01.038

15. Tsai H.-C., Liao M.-C. Modeling Torsional Strength of Reinforced Concrete Beams using Genetic Programming Polynomials with Building Codes. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2019. Vol. 23. Pp. 3464–3475. DOI:10.1007/s12205-019-1292-7

16. Kolchunov, V., Dem'yanov, A., Naumov N. Analysis of the "nagel effect" in reinforced concrete structures under torsion with bending. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, Pp. 95

17. Kolchunov V.I., Fedorov V. S. Conceptual Hierarchy of Models in the Theory of Resistance of Building Structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe Stroitelstvo*. 2020. Vol. 8, Pp. 16–23. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.08.16-23

18. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kaprielov S.S., Dem'yanov A.I., Konorev A.V.

The results of experimental studies of structures square and box sections in torsion with bending [Rezultaty eksperimental'nyh issledovanij konstrukcij kvadratnogo i korobchatogo sechenij iz vysokopropnogo betona pri kruchenii s izgibom]. *Building and Reconstruction*. 2018. No. 6 (80). Pp. 32–43.

19. Kolchunov V.I., Dem'yanov A.I., Pechenev I.V. Results of experimental studies of reinforced concrete structures with square cross sections in torsion with bending [Rezultaty eksperimental'nyh issledovanij konstrukcij kvadratnogo secheniya pri kruchenii s izgibom]. *Building and Reconstruction*. 2020. No 5. Pp. 3–12. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-91-5-3-12

20. Dem'yanov A., Kolchunov V., Iakovenko I., Kozarez A. Load bearing capacity calculation of the system "reinforced concrete beam - deformable base" under torsion with bending. *E3S Web of Conferences: 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM* 2019. 04059. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704059

#### *Information about the authors*

**Kolchunov, Vladimir I.** Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, DSc, Professor, Professor of the Department "Unique buildings and structures". Southwestern State University (SWSU). Russia, 305040, Kursk, 50 let Oktyabrya street, 94.

**Kozarez, Anastasia V.** Post-graduate student of the Academy of Civil Engineering and Architecture. V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Russia, 295007, Simferopol, ave. Academician Vernadsky, 4.

**Protchenko, Maksim V.** Post-graduate student of the Building Structures Department, Bryansk State Engineering Technological University. Russia, 241037, Bryansk, ave. Stanke Dimitrova, 3.

---

*Received 17.09.2022*

#### **Для цитирования:**

Колчунов В.И., Козарез А.В., Протченко М.В. Результаты экспериментальных исследований сопротивления железобетонных конструкций на деформируемом основании при изгибе с кручением // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 2. С. 41–52. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-41-52

#### **For citation:**

Kolchunov V.I., Kozarez A.V., Protchenko M.V. Results of experimental studies for reinforced concrete structures resistance on a deformable base in bending with torsion. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023. No. 2. Pp. 41–52. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-41-52

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-53-66

<sup>1</sup>Боровской А.Е., <sup>1\*</sup>Смирнова А.Ю., <sup>2,3</sup>Перькова М.В., <sup>1</sup>Смирнов К.Л., <sup>1</sup>Бердников М.Н.<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого<sup>3</sup>Российский университет Дружбы Народов

\*E-mail: alex.perkova2000@mail.ru

## МАЯТНИКОВЫЕ МИГРАЦИОННЫЕ ПОТОКИ БЕЛГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ

**Аннотация.** Транспортные вопросы развития крупнейших городских агломераций связаны с маятниковыми трудовыми миграциями. Маятниковые трудовые и социально-бытовые миграции в настоящее время являются одним из главных факторов, влияющих на улично-дорожную сеть города. Исследование направлено на анализ миграционных транспортных потоков г. Белгорода и субурбанизированных пригородных территорий на основе больших данных: сведений о количестве и плотности проживающего населения в зависимости от застройки; численности и плотности работающего населения; количестве малоэтажной, высокоэтажной застройки и промышленных зон, распределение рабочих мест в зависимости от застройки и расстояния от центра города. Исследование производилось в ГИС-системе с учётом особенностей сетей операторов, предоставляющих услуги подвижной радиотелефонной связи для возможности разделения исследуемой территории г. Белгорода на требуемые участки. Использовалась информация об административных границах районов, транспортных зон, матриц корреспонденции, данные о промышленных зонах, ИЖС, малоэтажных, среднеэтажных и многоэтажных застройках Белгорода. Исследования показали максимальную интенсивность перемещения из четырех населенных пунктов в центр города. Для оптимизации маршрутной сети предлагается: корректировка магистральных маршрутов и строительство новых остановок общественного транспорта; введение подвозных маршрутов, которые будут охватывать удалённые районы; формирование транспортно-пересадочных узлов на въездах в город и на территории Белгорода в местах концентрации основных маршрутов.

**Ключевые слова:** агломерация, пригородная субурбанизированная территория, транспортная инфраструктура, маятниковые миграции, большие данные, транспортно-пересадочный узел.

**Введение.** Управление процессом формирования оптимальных эффективных территориальных структур и устойчивое развитие агломерационных территорий является задачей XXI века не только для отечественного градостроительства, но и для большинства стран мира. Например, в исследованиях зарубежных авторов (Х. Арбаби, К. ДеРанго, М. Ю. Манги) рассматриваются транспортные и экономические вопросы развития крупнейших мировых городских агломераций, связанные с маятниковыми трудовыми миграциями. Вопросами изучения теоретических моделей агломераций как полицентричной системы занимались С. С. Артоболевский, О.А.Баевский, Д. Н. Власов, В. Г. Глушкова, А. Э. Гутнов, Н. Д. Кострикин, П.И. Лапшёв, И. Г. Лежава, Ф. С. Кудрявцев, Г.М.Лаппо, А. М. Лола, В. Я. Любовный, А. Г. Махрова, А.И. Трейвиш, Т.Г. Нефёдова, Е.Н. Перчик, Е. Г. Прохорская, З.В. Харитоновна, В. П. Юдинцев. Первые работы, посвящённые развитию Московской агломерации, принадлежали М. Г. Диканскому, М. А. Охитовичу, А. В. Щусеву, И. В. Жолтовскому, С. С. Шестакову, Б.В. Сакулину, Н.А. Ладовскому. Развивают теоретические модели маятниковых

трудовых миграций и их связи с развитием агломераций работы А. Г. Махровой, Т.И. Нефедовой, А.И. Трейвиша, О.И. Вендиной, А. Р. Воронцова, Ю.Э. Григоряна.

На законодательном уровне тема взаимосвязи характера МТМ и структуры агломерации затрагивалась в Указе Президента РФ “Об Основах стратегического планирования в Российской Федерации”, в Федеральном законе “О государственном стратегическом планировании”, Стратегии пространственного развития Российской Федерации, Стратегии инновационного развития России, Стратегии социально-экономического развития России (Стратегия-2020), Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Регламентация терминологии территориально-пространственного планирования представлена в докладе Европейской экономической комиссии ООН “Территориально-пространственное планирование - ключевой инструмент развития и эффективного управления”, где особое внимание было уделено странам с переходной экономикой” (ООН, Нью-Йорк и Женева, 2008 г.).

**Материалы и методы.** В представленной работе исследуются перемещения (миграцион-

ные потоки) населения в г. Белгороде и в пригородных субурбанизированных территориях. Проводилось исследование плотности населения, распределение рабочих мест в зависимости от застройки и расстояния от центра города. Исследование производилось в ГИС-системе с учётом особенностей сетей операторов, предоставляющих услуги подвижной радиотелефонной связи для возможности разделения исследуемой территории г. Белгорода на требуемые участки (сетка 500×500 метров). Использовалась информация об административных границах районов, транспортных зон, матриц корреспонденции, данные о промышленных зонах, ИЖС, малоэтажных, среднеэтажных и многоэтажных застройках Белгорода.

**Основная часть.** Изучая агломерацию как явление не только экономическое, но и социальное нельзя не обращать внимания на такое проявление его функционирования как маятниковая миграция. На основе рассмотренных источников в работе понятие маятниковой миграции используется как условное название регулярных поездок населения с определенной периодичностью. Целью работы является выявление направлений с максимальной интенсивностью перемещения населения из пригорода в Белгород как в ядро субурбанизированной пригородной территории.

Известно, что при неравномерном распределении ресурсов различных типов (например, несоответствия размещения производства и селитебных территорий) начинается процесс объединения населенных пунктов. С одной стороны, агломерационный эффект дает экономическую и социальную выгоду за счёт снижения издержек от пространственной концентрации производств и других экономических объектов, а маятниковые миграции обеспечивают трудоспособное население рабочими местами [1, 2]. Но при преодолении определенного рубежа, маятниковые миграции, которые обеспечивают связи, необходимые для формирования агломерационного эффекта, развиваются до значений, которые снижают уровень комфорта населения. Особенно развиты маятниковые миграции в пределах высокоурбанизированных пригородных территорий с массивами индивидуальной жилой застройки [3, 4].

Специфика развития Белгородской субурбии заключается в том, что массовая застройка пригородных территорий активно поддерживалась более двадцати лет на региональном уровне [5]. Однако в сформировавшихся по плану микрорайонах не в полной мере развиты система первичного обслуживания объектами социальной инфраструктуры и рекреационных террито-

рий, что влечет за собой транспортные, социальные и культурно-бытовые миграции. Фрагментарная зеленая буферная зона не способствует устойчивости природного каркаса территории г. Белгорода. Объекты социальной инфраструктуры сосредоточены в границах города Белгорода. Как следствие, население вынуждено совершать ежедневные транспортные маятниковые миграции для того, чтобы реализовать свои потребности [6, 7]. При этом жизненный цикл развития субурбии ещё до конца не изучен, не сформирована политика по его развитию, т.е. непонятно, что будет с населёнными пунктами через 10, 20 или 30 лет.

Как правило, маятниковые миграции преимущественно функционируют по нескольким моделям, которые развиваются в соответствии со стадиями развития пространственной структуры агломерации [8, 9]:

*А. Центр-периферийные:* с выраженными лучевыми направлениями, собирающимися в один центр. В случае трудовых миграций – ежедневные поездки с понедельника по пятницу (субботу): утром люди едут на работу из спальных районов мегаполиса или его пригородов в ядро агломерации/центры агломераций 2-го порядка (в том числе, проходя через нее транзитом), а вечером обратно:

- 1) в ядро агломерации 1-го порядка из пригородов;
- 2) в ядро агломерации 1-го порядка из спальных районов;
- 3) в центры агломерации 2-го порядка из окружающих сельских поселений или малых городов.

На основании города Белгорода можно привести пример такой многоуровневой миграции: в соответствии с уровнем затрат (экономических и социальных показателей) из г. Строитель высококвалифицированный персонал ездит на работу в г. Белгород, а в Строитель приезжает из близлежащих сёл малоквалифицированный персонал.

*Б. Подобные А,* но еженедельные циклы с пребыванием в ядре агломерации в течение рабочих дней.

*В. Субурбанизационные* – образующие направленные потоки, в том числе - сети между центрами вне основного ядра (меняется направление миграций).

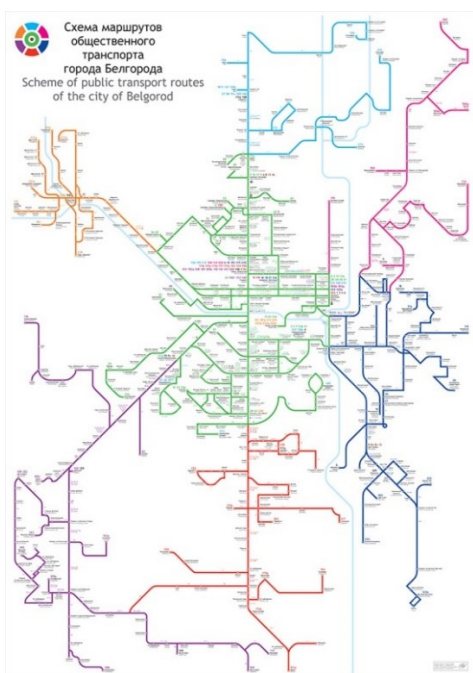
*Г. Постсубурбанизационные* – близкие к равномерным разнонаправленные сети потоков без выраженных доминирующих направлений или центров концентрации.

Начальной точкой маятниковых миграций, независимо от их моделей в большинстве случаев является постоянное место жительства. Оно

выступает более стабильной точкой в траектории ДОМ – РАБОТА – ДОМ, так как потребности в безопасности, комфорте и постоянстве условий жизни являются вторыми по важности для психики человека. Это позволяет сделать заключение, что в пространственной организации агломерации жилые территории могут рассматриваться как центры притяжения не в меньшей степени, чем места концентрации мест приложения труда, доминирующие в её экономической организации [10, 11].

Транспортная сеть города Белгорода и его пригородных территорий нуждается в реоргани-

зации. Это связано с увеличивающимся количеством автомобилей, увеличением количества ежедневных маятниковых трудовых и социально-бытовых миграций. Сеть общественного транспорта, как правило, развивается вместе с развитием существующих и формированием новых селитебных территорий. Сеть общественного транспорта отражает развитие транспортно-планировочной инфраструктуры территории [12]. Большинство маршрутов общественного транспорта проходят по одной из основных лучевых магистралей города Белгорода и связывают центр города и одну определенную периферийную территорию (рис. 1)

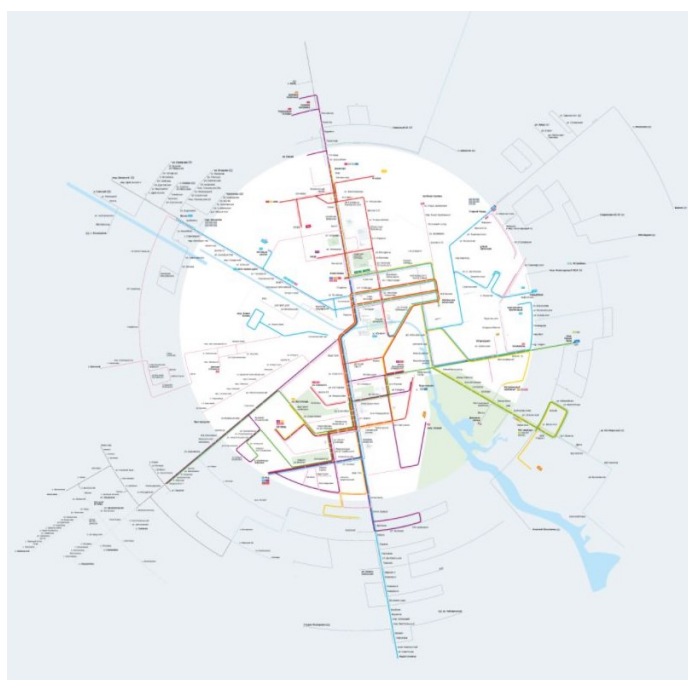


1) Существующая система организации маршрутов общественного транспорта

Источник:

<https://www.artlebedev.ru/kovodstvo/business-lynch/2017/09/18/commented/>

Рис. 1. Схема маршрутов общественного транспорта г. Белгорода и пригородных субурбанизированных территорий



2) Предложения по оптимизации транспортной сети

Источник: [https://asmobel.ru/media/uploads/1\\_qHbJTrT.jpg](https://asmobel.ru/media/uploads/1_qHbJTrT.jpg)

Следовательно, в некоторых пригородных районах Белгорода общественный транспорт малодоступен. В результате планируемой транспортной реформы Белгородской агломерации Ассоциация «Совет муниципальных образований Белгородской области» сообщала, что осенью 2020 года будет функционировать оптимизированная сеть общественного транспорта (рис. 2). Предполагалось, что она будет включать 47 муниципальных и 4 межмуниципальных маршрута. Три предполагаемых типа маршрута объединят движение транспортных средств [13]:

- магистральные маршруты свяжут основные районы города, в качестве транспортных средств предполагалось использовать автобусы и троллейбусы большого класса (БК);

- городские маршруты свяжут больницы, поликлиники, МФЦ и прочие значимые на муниципальном уровне социальные объекты;

- подвозящие маршруты будут осуществлять перевозки маршрутными транспортными средствами малого класса (МК) в пригородной зоне с целью кратчайшего доступа до остановок магистральных маршрутов.

Подвозящие маршруты предназначены для того, чтобы доставлять пассажиров к планируемым 9-ти транспортно-пересадочным узлам (ТПУ). В местах размещения ТПУ пассажиры могут осуществлять пересадку на магистральные маршруты. Формирование транспортно-пересадочных узлов планировалось осуществлять в ПГТ Майский, с. Стрелецкое, ПГТ Разумное,



ПГТ Северный, г. Белгород на ул. Кутузова и в районе «Старый город», ПГТ Дубовое, ПГТ Таврово, с. Никольское, так как именно по этим направлениям имеются активные маятниковые миграции и, как следствие, проблемы, связанные с перегруженностью транспортной сети, количеством заторов в часы пиковых нагрузок.

Также планировалось обеспечить общественным транспортом жителей микрорайонов ИЖС: «Шишино-39», «Севрюково 62.25», «Ближняя Игуменка 62.25.1», «Стрелецкое-73/2», «Стрелецкое-23А». Необходима и плани-

ровалась транспортная связь между ПГТ Разумное и микрорайоном «Разумное-54», п. Дубовое и микрорайоном «Улитка».

В исследовании проведен анализ доступности общественного транспорта и разработаны схемы доступности остановок общественного транспорта высокоэтажной застройки г. Белгорода и пригородных субурбанизированных территорий с малоэтажной застройкой. Доступность остановок общественного транспорта для малоэтажной и высокоэтажной застройки представлена на рисунке 2.

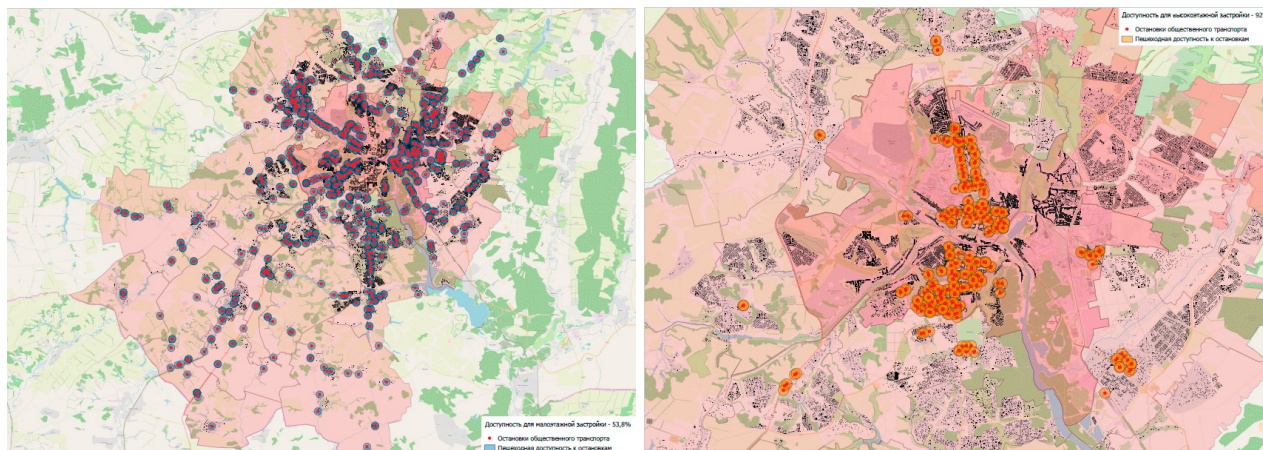


Рис. 2. Схемы доступности остановок общественного транспорта для малоэтажной и высокоэтажной застройки.

Разраб. Боровской А.Е., Гребенников М.В., К.Л. Смирнов, М.Н. Бердников

Для исследования пешеходной доступности были использованы данные из открытых источников: публичная кадастровая карта и OpenStreetMap. Все данные после фильтрации и классификации были приведены в единый вид полигональных объектов, содержащих табличные данные. От остановок общественного транспорта построены буферные зоны фиксированного радиуса 2-ух размеров, зависящие от этажности строений, преимущественно расположенных вблизи остановок. Анализ доступности выполнялся с помощью встроенных инструментов QGIS определением пересечений полигональных объектов.

Анализ пешеходной доступности с коэффициентом не прямолинейности показал, что на данный момент районы с индивидуальным жилищным строительством (ИЖС) ориентированы на использование личного транспорта (рис. 3). Только 53,8 % жителей малоэтажной застройки имеют пешеходную доступность к остановкам общественного транспорта по нормам СНиП (2.07.01-89).

Таким образом, анализируя работу общественного транспорта можно сделать вывод о том, что существующие на сегодняшний день пригородные маршруты малоэффективны. Их

провозной способности недостаточно для организации быстрого и доступного передвижения живущих из пригорода в город и наоборот. Необходимо также отметить, что маршруты автобусов в сформированных новых микрорайонах пригородных субурбанизированных территорий проложены по центральным улицам.

Для оптимизации маршрутной сети требуется корректировка магистральных маршрутов и строительство новых остановок общественного транспорта. Одним из вариантов обеспечения доступности магистральных маршрутов рассматривается введение подвозных маршрутов, которые будут охватывать все удалённые районы, а также увеличение частоты хождения маршрутных транспортных средств по расписанию [14, 15].

В данном исследовании на основании больших данных проводился анализ перемещения (миграционных потоков) населения в г. Белгороде и в пригородных субурбанизированных территориях. Исследование проводилось в ГИС-системе с учётом особенностей сетей операторов, предоставляющих услуги подвижной радиотелефонной связи для возможности разделения исследуемой территории г. Белгорода на требуемые участки.



Рис. 3. Схема расчёта пешеходной доступности с коэффициентом не прямолинейности в районах ИЖС Разраб. Боровской А.Е.

Современные мобильные устройства могут обеспечивать постоянную связь с интернетом. Большинство приложений для смартфонов и планшетов рассчитаны на регулярную синхронизацию с интернетом [16, 17]. Поэтому на основе данных сотовых операторов были собраны данные о количестве проживающего и работающего населения на территории Белгорода и созданы матрицы перемещения населения из одной транспортной зоны в другую для наиболее точного определения направлений по максимальной интенсивности перемещения. При помощи программного обеспечения QGIS была проведена разбивка сетки на транспортные зоны (сетка 500×500 метров): 1 – центр города; 2 – Ячево

(аэропорт); 3 – Харьковская гора - 1; 4 – Харьковская гора - 2; 5 – Сосновка; 6 – Старый город; 7 – Юго-западный-1; 8 – Юго-западный-2; 9 – Болхолец; 10 – Гринёвка; 11 – Крейда (рис.4).

Представленные на рис. 4 транспортные зоны необходимы для построения матрицы корреспонденции. Также при помощи разбивки на транспортные зоны можно наглядно увидеть, сколько проживает населения в той или иной зоне. Использовалась информация об административных границах районов, транспортных зон, данные о промышленных зонах, ИЖС, малоэтажных, среднеэтажных и многоэтажных застройках Белгорода.

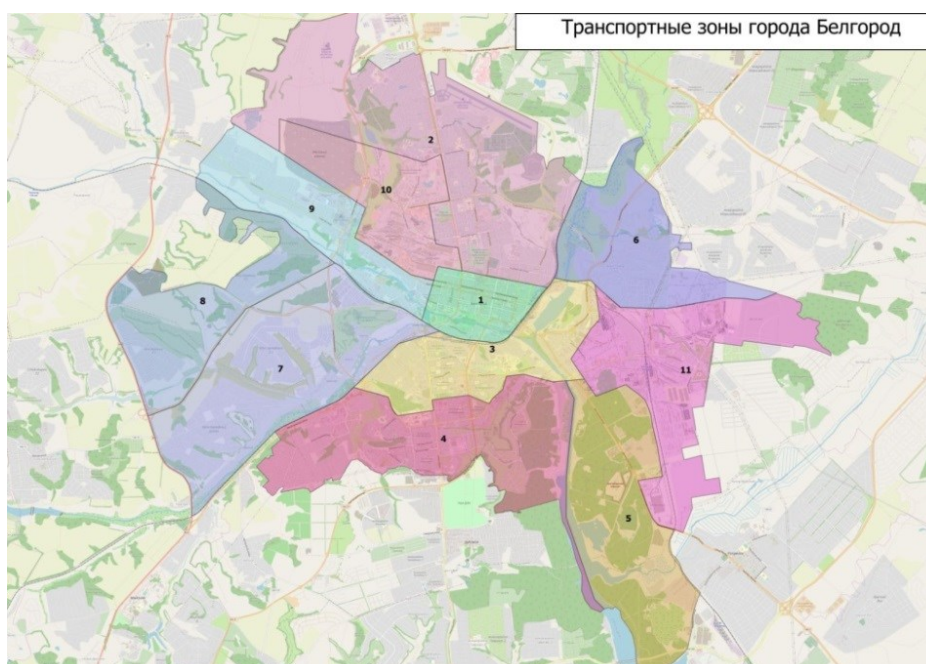


Рис. 4. Разбивка территории г. Белгорода на транспортные зоны.  
Разраб. Боровской А.Е., Гребенников М.В., К.Л. Смирнов, М.Н. Бердников



Компания «ИнфоНет Мобил» предоставила данные о перемещениях по городу Белгород в формате XLS за 2020 г. При помощи программы MapLab была произведена обработка данных и создана матрица о перемещениях населения по городу Белгород. С помощью матриц в программе QGIS построена карта корреспонденции,

на которой наглядно видно перемещение населения из одной транспортной зоны в другую (рис. 5). Исследования показали, что максимальная интенсивность перемещения приходится из субурбанизированных территорий ПГТ Северный, ПГТ Дубовое, ПГТ Майский, ПГТ Разумное в центр города.

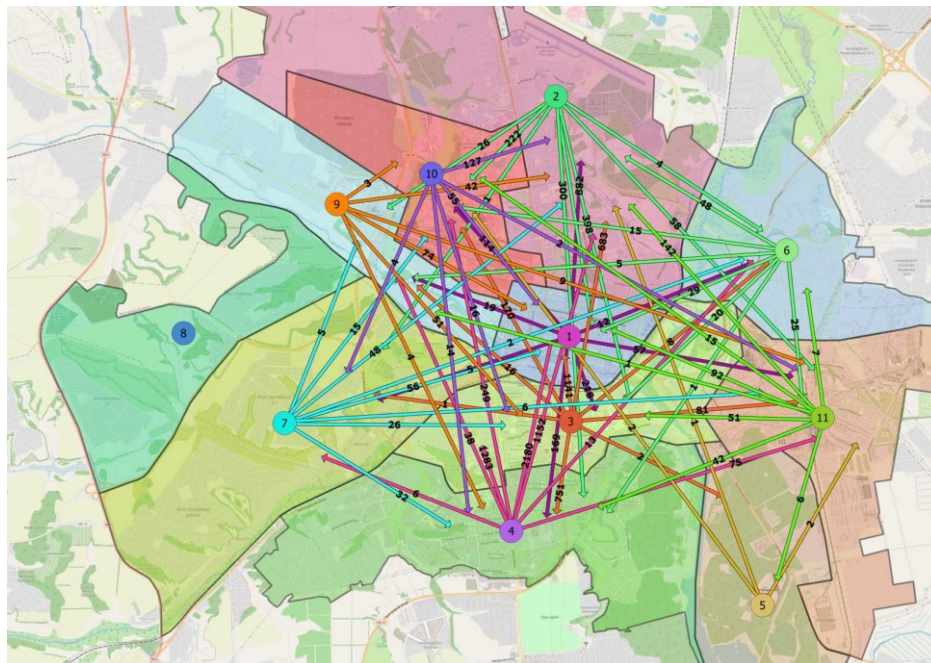


Рис. 5. Картограмма перемещения населения из одной транспортной зоны в другую в г. Белгород  
Разраб. Боровской А.Е., Гребенников М.В., К.Л. Смирнов, М.Н. Бердников, Смирнова А.Ю.

На основе генплана города Белгорода при помощи платформы QGIS и его инструмента «Полигоны» была создана схема расположения малоэтажных и высокоэтажных застроек, промышленных зон (рис. 6). Помимо вышеизложенного, с помощью имеющегося генерального плана города были созданы слои, в которых присутствуют данные о городской черте, многоэтажной и среднеэтажной застройке, массивах с индивидуальной жилой застройке (ИЖС), общественно-деловых центрах, культурно-бытовых центров, торговых центрах, местах растениеводства, садоводства, лесопитомниках, учреждений отдыха, лесопарках, пляжах, кладбищах, промышленных предприятий, коммунально-складских территорий [18, 19, 20]. В соответствии с имеющимися данными была определена плотность населения в зависимости от типа застройки. В пригороде на субурбанизированных территориях новых микрорайонах с ИЖС плотность застройки достаточно высокая, что приводит к перегруженности основных магистральных улиц из-за трудовых маятниковых миграционных потоков населения. В центре города преобладает многоэтажная и среднеэтажная застройка (рис. 6).

В связи с активной автомобилизацией населения увеличивается трудовой миграционный поток населения из субурбанизированных территорий в центр города, перегружаются основные транспортные магистрали, увеличивается время нахождения населения в пути, что впоследствии отрицательно сказывается на качестве жизнедеятельности.

**Результаты.** Исходя из комплексного анализа миграционных потоков Белгородской городской агломерации на основании больших данных, выявлено:

- резкое увеличение плотности в пригородах Белгорода;
- нехватка мест приложения труда в пригороде Белгорода (ПГТ Таврово, с. Никольское с. Стрелецкое, пос. Новосадовый);
- нехватка объектов социальной инфраструктуры на субурбанизированных пригородных территориях (ПГТ Таврово, с. Никольское, пос. Новосадовый);
- нехватка объектов отдыха и рекреации в с. Стрелецкое, ПГТ Разумное, ПГТ Северный, ПГТ Таврово, с. Никольское, пос. Новосадовый;



- увеличение нагрузки на улично-дорожную сеть города по семи направлениям по периметру города Белгорода, особенно с севера и юга;

- недостаточное развитие маршрутов движения общественного транспорта в пригородах.

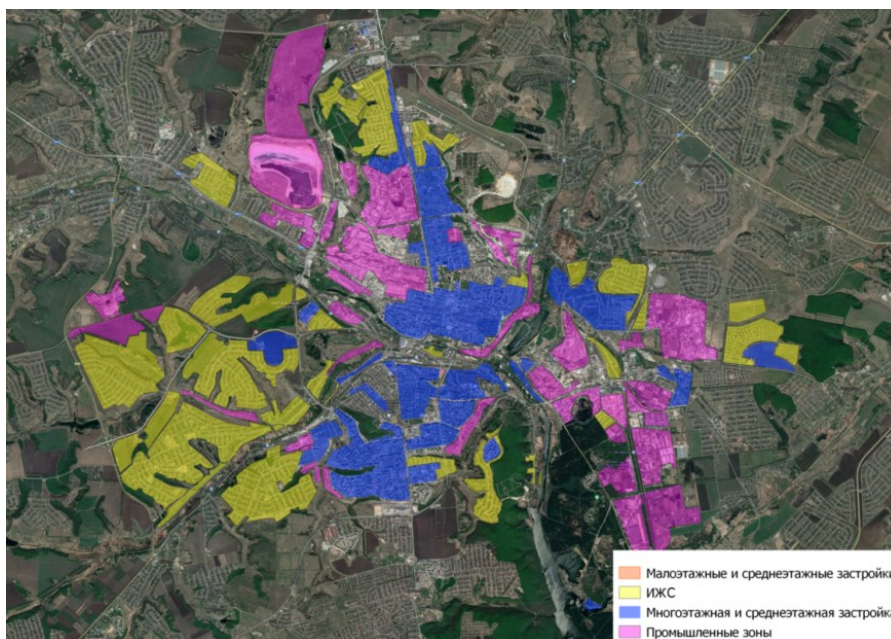


Рис. 6. Схема расположения малоэтажных и высокоэтажных застроек, промышленных зон.  
Разраб. А.Ю. Перькова, К.Л. Смирнов

Выявлено, что с каждым годом из-за маятниковых трудовых миграционных потоков увеличивается нагрузка на улично-дорожную сеть (УДС) города по основным магистральным артериям. Поскольку одной из важных проблем Белгородской субурбии является отсутствие/неправильное распределение в пригородных населенных пунктах мест приложения труда, общественных центров и объектов социальной инфраструктуры (рис.7). Например, на территории Белгородской агломерации зафиксированы самые низкие показатели по обеспеченности детскими до-

школьными и общеобразовательными учреждениями. Это обусловлено достаточно высокой плотностью населения в населенных пунктах Белгородского района, наиболее близко расположенных к г. Белгороду. Однако общественные центры пешеходной доступности на сегодняшний день сформированы не во всех микрорайонах пригородной зоны [21]. Действующие детские дошкольные учреждения и общеобразовательные школы не справляются с возрастающей нагрузкой. В результате возникают неконтролируемые трудовые и социально-бытовые миграции.

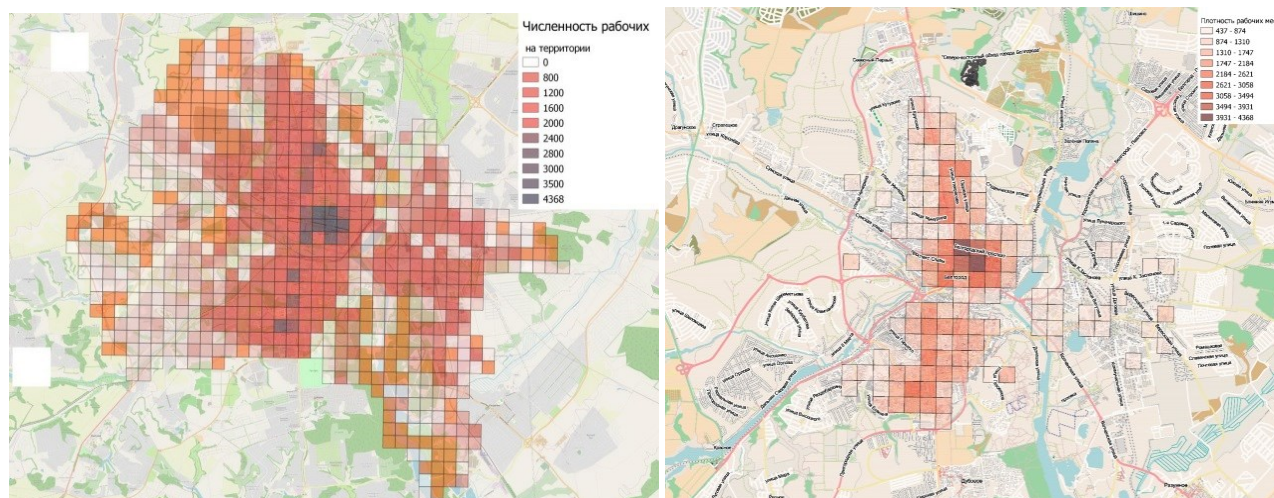


Рис. 7. Численность и плотность рабочих мест на территории  
Белгородской городской агломерации

Разраб. Боровской А.Е., Гребенников М.В., К.Л. Смирнов, М.Н. Бердников



На основании рисунка 8 о количестве проживающих и работающих на территории Белгородской субурбии, выполненного на основе больших данных, видно, что основной поток населения, живущий в пригороде, совершает ежедневные трудовые миграции в центр города.

Таким образом, происходит загрузка основных магистралей города и увеличивается время нахождения в пути, что в конечном итоге влияет на качество среды жизнедеятельности и психологическое состояние населения.

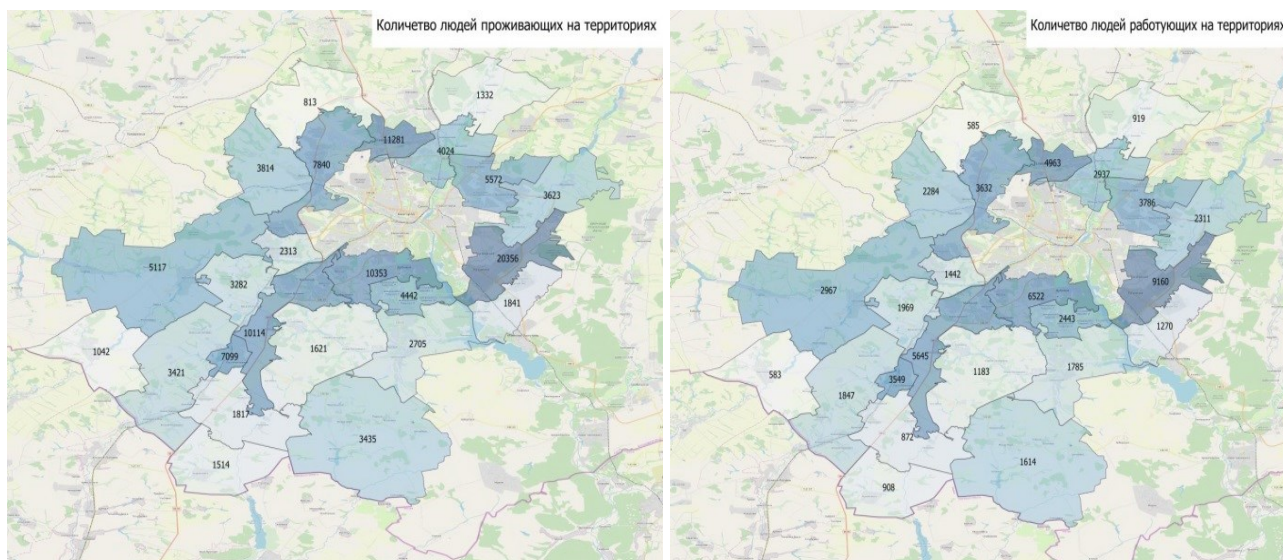


Рис. 8. Схема проживающих и работающих на территории Белгородского района  
Разраб. Боровской А.Е., Гребенников М.В., К.Л. Смирнов, М.Н. Бердников

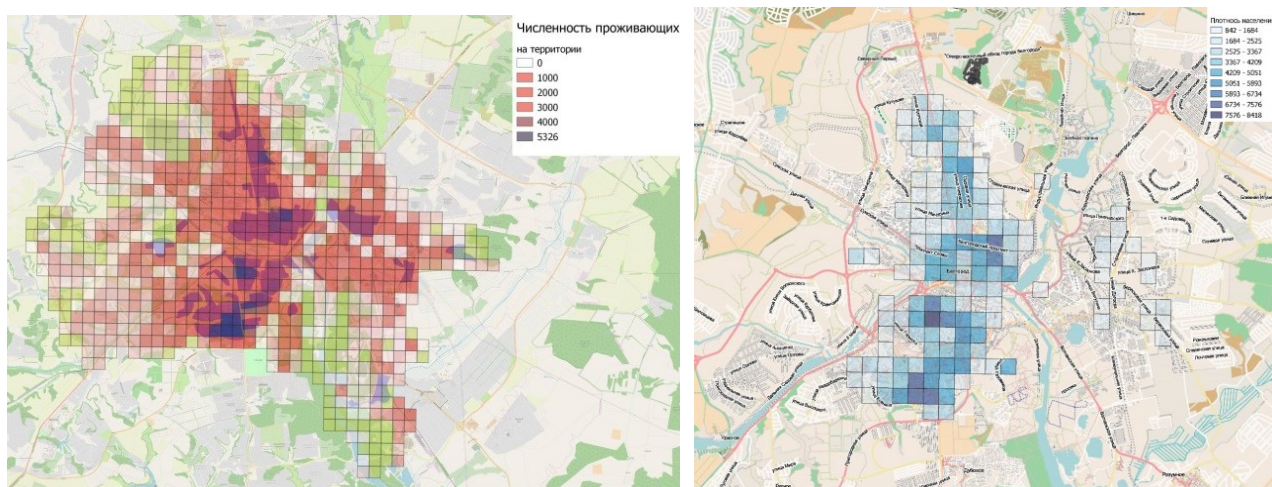


Рис. 9. Результаты обработанных данных сотовых операторов. Численность и плотность проживающих на территории Белгородской городской агломерации  
Разраб. Боровской А.Е., Гребенников М.В., К.Л. Смирнов, М.Н. Бердников

Обработанные при исследовании данные сотовых операторов компании «ИнфоНет Мобил» (рис. 9), позволили с помощью ГИС-систем определить численность и плотность населения, максимально интенсивные миграционные потоки населения в Белгородской городской агломерации (табл. 1).

**Выводы.** Исследования показали, что максимальная интенсивность перемещения приходится из субурбанизированных территорий: п. Северный, п. Дубовое, п. Майский, п. Разумное в центр города. Наивысшее количество перемещений происходит по направлениям со стороны п.

Северный (10,2), п. Дубовое (4), п. Разумное (6,1) в центр города Белгород.

В целях создания комфортной среды жизнедеятельности необходимым является снижение маятниковых трудовых и социально-бытовых миграционных потоков пригородных территорий г. Белгорода, а также оптимизация функционально-планировочной структуры территории и системы организации общественного транспорта. Для оптимизации маршрутной сети требуется корректировка магистральных маршрутов и строительство новых остановок общественного транспорта. Одним из вариантов обеспечения до-

ступности магистральных маршрутов рассматривается введение подвозных маршрутов, которые будут охватывать все удалённые районы. Целеобразным также является формирование

транспортно-пересадочных узлов на въездах в город и на территории Белгорода в местах концентрации основных маршрутов.

Таблица 1

**Объемы перемещения населения из субурбанизированных территорий г. Белгород (пример)**

| №  | С территории                 | На территорию                                    | Стат. Функции | 7:00 | 8:00 | 9:00 | Сумма |
|----|------------------------------|--------------------------------------------------|---------------|------|------|------|-------|
| 1  | Беловское сельское поселение | Дубовое сельское поселение                       | Медианна      | 3,5  | 2    | 0    | 5,5   |
| 2  | Беловское сельское поселение | Журавлёвское сельское поселение                  | Медианна      | 0    | 0    | 0    | 0     |
| 3  | Беловское сельское поселение | Бессоновское сельское поселение                  | Медианна      | 0    | 0    | 0    | 0     |
| 4  | Беловское сельское поселение | Щетиновское сельское поселение                   | Медианна      | 0    | 0    | 0    | 0     |
| 4  | Беловское сельское поселение | Белгород                                         | Медианна      | 568  | 325  | 121  | 1014  |
| 5  | Беловское сельское поселение | Городское поселение Северный                     | Медианна      | 0    | 1    | 0    | 1     |
| 6  | Беловское сельское поселение | Краснооктябрьское сельское поселение             | Медианна      | 0    | 0    | 0    | 0     |
| 7  | Беловское сельское поселение | Головинское сельское поселение                   | Медианна      | 0    | 0    | 0    | 0     |
| 7  | Беловское сельское поселение | Городское поселение Разумное                     | Медианна      | 16   | 8,5  | 4    | 28,5  |
| 8  | Беловское сельское поселение | Пушкарское сельское поселение                    | Медианна      | 0    | 0    | 0    | 0     |
|    | Беловское сельское поселение | Яснозоренское сельское поселение                 | Медианна      | 0    | 0    | 0    | 0     |
| 9  | Беловское сельское поселение | Стрелецкое сельское поселение                    | Медианна      | 1    | 0    | 0    | 1     |
| 10 | Беловское сельское поселение | Ериковское сельское поселение                    | Медианна      | 0    | 0    | 0    | 0     |
|    | Беловское сельское поселение | Хохловское сельское поселение                    | Медианна      | 0    | 0    | 0    | 0     |
| 11 | Беловское сельское поселение | Никольское сельское поселение                    | Медианна      | 0    | 0    | 0    | 0     |
| 12 | Беловское сельское поселение | Тавровское сельское поселение                    | Медианна      | 0    | 0    | 0    | 0     |
|    | Беловское сельское поселение | Крутологское сельское поселение                  | Медианна      | 0    | 0    | 0    | 0     |
| 13 | Беловское сельское поселение | городское поселение Октябрьский                  | Медианна      | 0    | 0    | 0    | 0     |
| 14 | Беловское сельское поселение | Все области за пределами исследуемой агломерации | Медианна      | 119  | 66,5 | 19   | 204,5 |
| 15 | Беловское сельское поселение | Беломестненское сельское поселение               | Медианна      | 3    | 1    | 0    | 4     |
|    | Беловское сельское поселение | Малиновское сельское поселение                   | Медианна      | 0    | 0    | 0    | 0     |

На основе результатов исследования предлагается организация транспортно – пересадочных узлов *трёх категорий* по периметру территории

г. Белгорода в местах наиболее насыщенных точек города по количеству маршрутов (рис. 10).



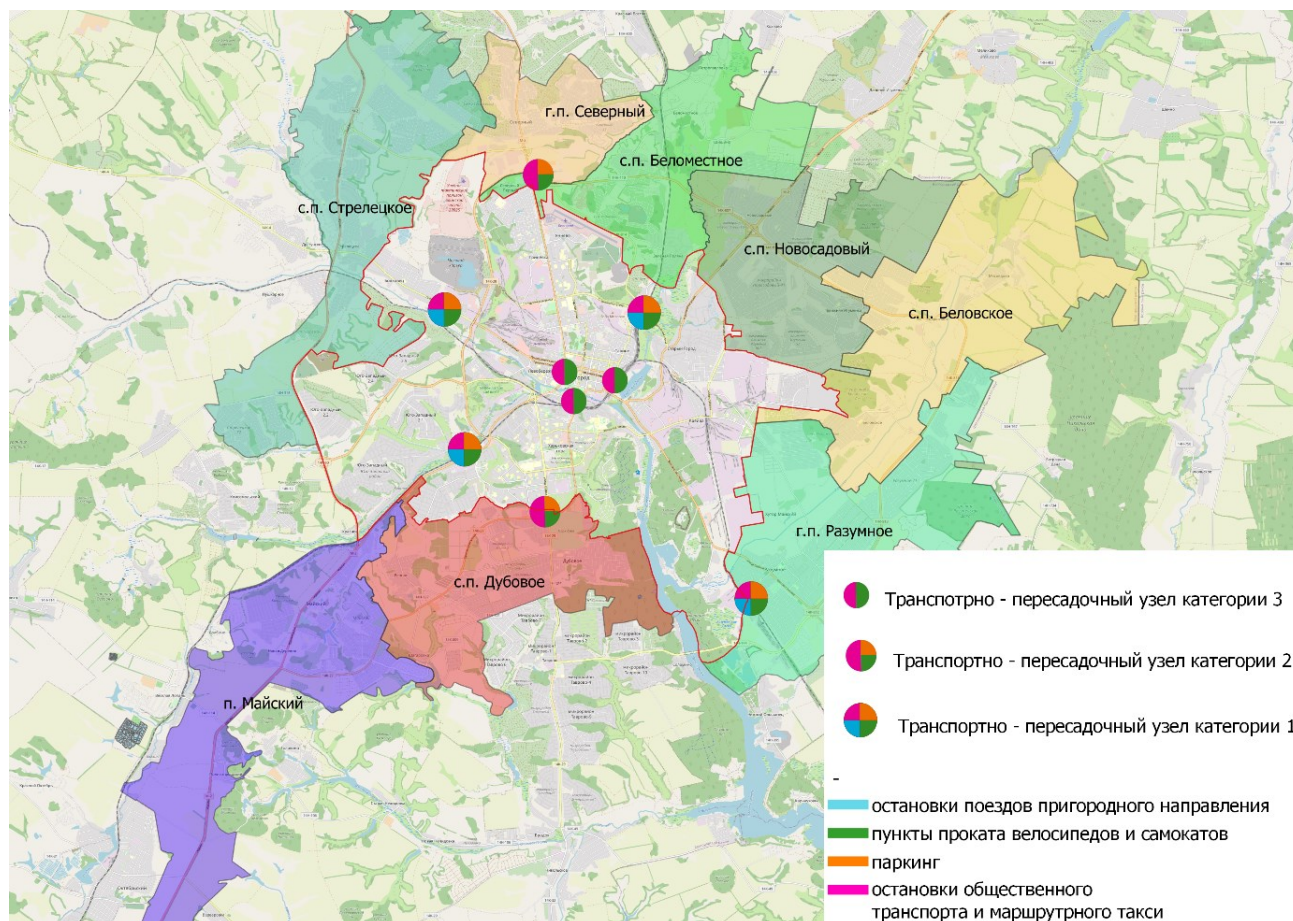


Рис. 10. Предложения по местоположению ТПУ. Разраб. Смирнова А.Ю., Смирнов К.Л.

**1. ТПУ 1 категории.** В состав ТПУ 1 категории будет входить паркинг, остановки рельсового транспорта (поездов пригородного направления), остановки общественного транспорта и маршрутного такси, пункты проката велосипедов и самокатов.

**2. ТПУ 2 категории.** Транспортно-пересадочный узел категории 2 будет состоять из паркинга, остановки общественного транспорта и маршрутного такси, пунктов проката велосипедов и самокатов.

**3. ТПУ 3 категории.** В состав ТПУ 3 категории будут входить остановки общественного транспорта и маршрутного такси, пункты проката велосипедов и самокатов.

Транспортно-пересадочные узлы 1 категории предлагается организовать на территории п. Разумный (при въезде в город), разгрузка улично-дорожной сети с направлений п. Маслова Пристань, п. Крутой Лог, п. Нижний Ольшанец. На улице Студенческой в районе авторынка (из-за доступности ж/д транспорта и строительства нового жилого комплекса), а также разгрузки УДС города и пересадки людей с личного транспорта на общественный с направлений п. Новосадовый, посёлков Ближняя и Дальняя Игуменка и Зелёная Поляна. Организация ТПУ на территории Болховца (на улице Сумская) с целью раз-

грузки УДС с направлений пригородных сельских поселений Драгунское и Пушкарное. На территории комплекса «Спутник», разгрузка с направлений п. Майский, п. Комсомольский, п. Репное.

Транспортно-пересадочные узлы 2 категории предлагается организовать на территории п. Дубовое (рядом с торговым центром «Ситимолл») для разгрузки потока с направления п. Таврово, а также на территории посёлка Северный при въезде в город.

Транспортно-пересадочные узлы 3 категории, подразумевающие пересадку населения с маршрутного пригородного такси на общественный транспорт или велосипед/самокат, будут включать остановочные комплексы, пункты проката велосипедов и самокатов. Такие ТПУ предполагается разместить непосредственно в городе на территориях остановок общественного транспорта рынок «Салют», «Родина» и «Ж/д вокзал», с действующими конечными станциями автобусов, маршруты которых смогут непосредственно довести жителей в различные точки города.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афонин М.В. Маятниковая миграция как фактор субурбанизации // Вестник социально-политических наук. 2012. №11 С. 14–19.

2. Волчкова И.В. Модели управления агломерациями: международный опыт и российская практика // Экономические науки. 2013. № 108. С. 53–57.
3. Алексеев А.Ю., Соколова С.В., Шапошников С.В. Современный опыт формирования городских агломераций // Вестник Университета. 2014. № 16. С. 88–92.
4. Вукан Р. Транспорт в городах, удобных для жизни. М: Территория будущего, 2011. 576 с.
5. Ширина Н.В., Монастырская Е.С. Анализ застройки первичного рынка жилья г. Белгород // Вектор ГеоНаук. 2018. Т. 1. № 3. С. 84–87.
6. Шубенков М.В., Шубенкова М.Ю. Современный город как антропогенно-природная система // Архитектура и современные информационные технологии. 2020. № 4 (53). С. 182–190. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15311.
7. Шубенков М.В. Города будущего: поиск образов // Архитектура и строительство России. 2019. № 1 (229). С. 18–23.
8. Паршуту Е.В., Галямов Ю.Ю. Теоретические аспекты возникновения и развития городских агломераций // Экономика и предпринимательство. 2014. №11 (52). С. 100–105.
9. Аль-Джабери А.А.Х., Аль-савафи М.Х. Аспекты организации транзитно-ориентированного развития городской среды // В сборнике: Образование. Наука. Производство. Материалы X Международного молодежного форума с международным участием. 2018. С. 1–12.
10. Перькова М.В., Иванькина Н.А., Боровской А.Е., Перькова А.Ю. Анализ функционирования транспортной инфраструктуры на территории межмуниципального природного парка в Шебекинском и Белгородском районах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 5. С. 53–63. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-5-53-63.
11. Перькова М.В., Перькова А.Ю., Бик О.В. Влияние градостроительной политики на развитие транспортной инфраструктуры Белгородской субурбии // Архитектура и строительство России. 2021. №3. С. 58–65.
12. Перчик Е.Н. География городов (Геоурбанистика). М.: Высшая школа, 1991. 28 с.
13. Кремец Ю.А. Технические средства организации дорожного движения. М.: Транспорт, 1990. 254 с.
14. Перькова А.Ю., Иванькина Н.А., Смирнов К.Л. Оптимизация транспортного сообщения Белгородской субурбии // Техническая эстетика и дизайн – исследования. 2021. №1. С. 6–71. DOI: 10.34031/2687-0878-2021-3-1-61-71.
15. Перькова М.В., Иванькина Н.А. Совершенствование транспортной инфраструктуры первого пояса Белгородской агломерации по методологии Нового урбанизма. Монография. Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. 109 с.
16. Боровской А.Е., Новиков И.А., Шевцова А.Г. Внедрение интеллектуальных транспортных систем в рамках национальных программ повышения безопасности дорожного движения // Вестник ХНАДУ. 2013. №61-62. С. 279–283.
17. Лапко Е.Г. Городские агломерации России. Электронная версия бюллетеня «Население и общество». 2010. [Электронный ресурс] URL: <https://polit.ru/article/2010/02/16/demoscope407/> (дата обращения 6.07.2022).
18. The Guardian. Cities in Numbers: How Patterns of Urban Growth Change the World. 2015. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.theguardian.com/cities/2015/nov/23/cities-in-numbers-how-patterns-ofurban-growth-change-the-world> (дата обращения: 30.09.2019).
19. Arbaci S., Rae I. Efecto barrio y desigualdades: evidencias para desmitificar las políticas urbanas de diversificación residencial // ACE: Architecture, City and Environment. 2014. № 26. Pp. 147–176.
20. Ortuzar J.D., Willumsen L.G. «Modelling Transport, Third Edition», John Wiley & Sons Ltd., England, 2001. 499 p.
21. Перькова М.В. Градостроительное развитие региональной системы расселения и ее элементов (на примере Белгородской области) // Диссертация на соискание ученой степени доктора архитектуры / Санкт – Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Санкт-Петербург, 2019. 342 с.

#### Информация об авторах

**Боровской Алексей Евгеньевич**, к.т.н., доцент кафедры эксплуатации и организации движения автотранспорта. E-mail: [a.e.borovskoy@gmail.com](mailto:a.e.borovskoy@gmail.com)/ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46.

**Смирнова Александра Юрьевна**, магистрант кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: [alex.perkova2000@mail.ru](mailto:alex.perkova2000@mail.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46. БГТУ им. В.Г. Шухова

**Перькова Маргарита Викторовна**, доктор архитектуры, доцент, директор Высшей школы дизайна и архитектуры, профессор департамента архитектуры РУДН E-mail: [perkova.margo@mail.ru](mailto:perkova.margo@mail.ru). Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

**Смирнов Константин Леонидович**, магистрант кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем. E-mail: kostik\_smirnov\_96@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46.

**Бердников Максим Николаевич**, магистрант кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем. E-mail: pegas9670@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46.

Поступила 18.01.2022 г.

© Боровской А.Е., Смирнова А.Ю., Перькова М.В., Смирнов К.Л., Бердников М.Н., 2023

<sup>1</sup>*Borovskoy A.E., <sup>1</sup>Smirnova A.Y., <sup>2,3</sup>Perkova M.V., <sup>1</sup>Smirnov K.L., <sup>1</sup>Berdnikov M.N.*

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

<sup>2</sup>*St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great*

<sup>3</sup>*Peoples' Friendship University of Russia*

*\*E-mail: alex.perkova2000@mail.ru*

## PENDULUM MIGRATION FLOWS OF THE BELGOROD AGGLOMERATED TERRITORY

**Abstract.** Transport issues in the development of the largest urban agglomerations are associated with commuting labor migrations. Pendulum labor and social migrations are currently one of the main factors affecting the street and road network of the city. The study is aimed at analyzing the migration traffic flows of the city of Belgorod and suburbanized suburban areas based on big data: information on the number and density of the living population depending on the development; the number and density of the working population; the number of low-rise, high-rise buildings and industrial zones, the distribution of jobs depending on the building and the distance from the city center. The study was carried out in a GIS system, taking into account the peculiarities of the networks of operators providing mobile radiotelephone communication services in order to be able to divide the study area of the city of Belgorod into the required sections. Information was used on the administrative boundaries of districts, transport zones, correspondence matrices, data on industrial zones, individual housing construction, low-rise, mid-rise and high-rise buildings in Belgorod. Studies have shown the maximum intensity of movement from four settlements to the city center. To optimize the route network, it is proposed: adjustment of main routes and construction of new public transport stops; introduction of supply routes that will cover remote areas; formation of transport hubs at the entrances to the city and on the territory of Belgorod in places of concentration of the main routes.

**Keywords:** agglomeration, suburban suburban area, transport infrastructure, commuting, big data, transport interchange hub.

### REFERENCES

1. Afonin M.V. Pendulum migration as a factor of suburbanization [Mayatnikovaya migraciya kak faktor suburbanizacii]. Bulletin of socio-political sciences. 2012. No. 11. Pp. 14–19. (rus).
2. Volchkova I.V. Agglomeration management models: international experience and Russian practice. Economic sciences. 2013. No. 108. Pp. 53–57 (rus).
3. Alekseev A.Yu., Sokolova S.V., Shaposhnikov S.V. Modern experience in the formation of urban agglomerations [Sovremennyy opyt formirovaniya gorodskih aglomeracij]. Vestnik Universiteta 2014. No. 16. Pp. 88–92. (rus).
4. Vukan R. Transport v gorodah, udobnyh dlya zhizni [Transport in cities, comfortable]. M.: Territory of the Future, 2011. 576 p. (rus).
5. Shirina N.V., Monastyrskaya E.S. Analysis of the development of the primary housing market in Belgorod [Analiz zastrojki pervichnogo rynka

zhil'ya g. Belgorod]. Vector GeoScience. 2018. Vol.1. No. 3. Pp. 84–87. (rus).

6. Shubenkov M.V., Shubenkova M.Yu. The modern city as an anthropogenic-natural system [Sovremennyy gorod kak antropogennno-prirodnaya sistema]. Architecture and modern information technologies. 2020. No. 4 (53). Pp. 182–190. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15311. (rus)

7. Shubenkov M.V. Cities of the future: search for images [Goroda budushchego: poisk obrazov]. Architecture and construction of Russia. 2019. No. 1 (229). Pp. 18–23. (rus).

8. Parshuto E.V., Galyamov Y.Y. Theoretical aspects of the emergence and development of urban agglomerations [Teoreticheskie aspekty vozniknoveniya i razvitiya gorodskih aglomeracij]. Economics and Entrepreneurship. Tomsk. 2014. No. 11. Pp. 100–105. (rus)

9. Al-Jaberi A.A.H., Al-sawafi M.H. Aspects of the organization of transit-oriented urban environment development [Aspekty organizacii tranzitno-



orientirovannogo razvitiya gorodskoj sredy]. Education. The science. Production. Materials of the X International Youth Forum with international participation. 2018. Pp. 1–12.

10. Perkova M.V., Ivankina N.A., Borovskoy A.E., Perkova A.Y. Analysis of the functioning of the transport infrastructure on the territory of the inter-municipal natural park in the Shebekinsky and Belgorod regions [Analiz funkcionirovaniya transportnoj infrastruktury na territorii mezhmunicipal'nogo prirodnogo parka v Shebekinskom i Belgorodskom rajonah]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 5. Pp. 53–63. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-5-53-63. (rus).

11. Perkova M.V., Perkova A.Y., Bik O.V. Influence of urban planning policy on the development of the transport infrastructure of the Belgorod Suburbia [Vliyanie gradostroitel'noj politiki na razvitie transportnoj infrastruktury Belgorodskoj suburbi]. Journal of Architecture and Construction of Russia. 2021. No. 3. Pp. 58–65. (rus).

12. Pertsik E.N. Geography of cities (Geourbanistics). [Geografiya gorodov (Geourbanistika)]. M.: Higher school, 1991. 282 p. (rus).

13. Kremets Yu.A. Technical means of organizing traffic [Tekhnicheskie sredstva organizacii dorozhnogo dvizheniya]. M.: Transport, 1990. 225 p. (rus).

14. Perkova A.Y., Ivankina N.A., Smirnov K.L. Optimization of the transport communication of the Belgorod suburbia [Optimizaciya transportnogo soobshcheniya Belgorodskoj suburbi]. Journal of technical aesthetics and design – research. 2021. No 1. Pp. 61–71. DOI: 10.34031/2687-0878-2021-3-1-61-71. (rus).

15. Perkova M.V., Ivankina N.A. Improving the transport infrastructure of the first belt of the Belgorod agglomeration according to the methodology of new urbanism [Sovershenstvovanie transportnoj infrastruktury pervogo poyasa Belgorodskoj aglomer-

acii po metodologii Novogo urbanizma]. Monograph. Belgorod: Publishing house of BSTU, 2018. 109 p. (rus).

16. Borovskoy A.E., Novikov I.A., Shevtsova A.G. Implementation of intelligent transport systems within the framework of national programs to improve road safety [Vnedrenie intellektual'nyh transportnyh sistem v ramkah nacional'nyh programm povysheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya]. Bulletin of KhNADU, Belgorod, 2013. 5 p. (rus)

17. Lappo E.G. Urban agglomerations of Russia. [Gorodskie aglomeracii Rossii.]. Electronic version of the bulletin "Population and Society". 2010. [Electronic resource] URL: <https://polit.ru/article/2010/02/16/demoscope407/> (accessed 07/06/2022). (rus).

18. The Guardian. Cities in Numbers: How Patterns of Urban Growth Change the World. 2015. URL: <https://www.theguardian.com/cities/2015/nov/23/cities-in-numbers-how-patterns-ofurban-growth-change-the-world> (date of treatment: 30.09. 2019).

19. Arbaci S., Rae I. Efecto barrio y desigualdades: evidencias para desmitificar las politicas urbanas de diversificación residencial. ACE: Architecture, City and Environment. 2014. No 26. Pp. 147–176

20. Ortuzar J.D., Willumsen L.G. «Modelling Transport, Third Edition», John Wiley & Sons Ltd., England, 2001. 499 p.

21. Perkova M.V. Urban development of the regional settlement system and its elements (on the example of the Belgorod region) [Gradostroitel'noe razvitie regional'noj sistemy rasseleniya i ee elementov (na primere Belgorodskoj oblasti)]. Dissertation for the registration degree of Doctor of Architecture. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. St. Petersburg. 2019. 342 p. (rus)

#### *Information about the authors*

**Borovskoy, Aleksey E.** PhD, Assistant professor. E-mail: [a.e.borovskoy@gmail.com](mailto:a.e.borovskoy@gmail.com). Belgorod State Technological University. V. G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Smirnova, Alexandra Yu.**, Master student. E-mail: [alex.perkova2000@mail.ru](mailto:alex.perkova2000@mail.ru). Belgorod State Technological University. V. G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Perkova, Margarita V.** Doctor of Architecture, Professor. E-mail: [perkova.margo@mail.ru](mailto:perkova.margo@mail.ru). Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politehnicheskaya, 29.

**Smirnov, Konstantin L.** Master student. E-mail: [kostik\\_smirnov\\_96@mail.ru](mailto:kostik_smirnov_96@mail.ru). Belgorod State Technological University. V. G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Berdnikov, Maksim N.** Master student. E-mail: [pegas9670@gmail.com](mailto:pegas9670@gmail.com). Belgorod State Technological University. V. G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

*Received 18.01.2022*

**Для цитирования:**

Боровской А.Е., Смирнова А.Ю., Перькова М.В. Смирнов К.Л., Бердников М.Н. Маятниковые миграционные потоки белгородской агломерированной территории // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 2. С. 53–66. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-53-66

**For citation:**

Borovskoy A.E., Smirnova A.Y., Perkova M.V., Smirnov K.L., Berdnikov M.N. Pendulum migration flows of the Belgorod agglomerated territory. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 2. Pp. 53–66. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-53-66

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-67-76

Бобнева А.Н.

АО «Петербургские дороги»

E-mail: bobneva@mail.ru

## СТРАТЕГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЪЕЗДОВ ТРАНСПОРТНЫХ РАЗВЯЗОК В УСЛОВИЯХ ПЛОТНОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

**Аннотация.** В условиях непрерывно растущей интенсивности движения на городских магистралях, поиск пути решения по устройству транспортных развязок на плотно застроенных городских территориях определяет актуальность данного исследования. Действующие в настоящее время в Российской Федерации нормативные документы значительно ограничивают минимальные значения расчетной скорости и, как следствие, значения радиусов кривых в плане на съездах транспортных развязок. Установление данных параметров ведет к необходимости отказа от реализации части направлений или устройству дополнительных светофорных объектов. В настоящем исследовании были изучены и проанализированы отечественная и зарубежная нормативная документация и материалы научных статей, а также выполнены расчеты минимальных радиусов кривых в плане для съездов и величины уширений полос движения. Результатом исследования стали предварительные выводы о возможности, при соблюдении ряда условий, снизить минимальную расчетную скорость на левоповоротных петлевых съездах. Была определена стратегия по изменению параметров съездов транспортных развязок с учетом комплексного подхода с переоценкой коэффициентов поперечной силы, длин переходно-скоростных полос и ряда иных параметров для обеспечения безопасности дорожного движения на транспортных развязках в плотно застроенной городской территории.

**Ключевые слова:** клеверный лист, левоповоротный петлевой съезд, расчетная скорость на съезде, уширение на кривой, коэффициент поперечной силы, полоса разгона, полоса торможения.

**Введение.** Необходимость организации двухуровневых пересечений появилась при возникновении идеи строительства скоростных автомобильных дорог между отдельными городами. Пересечения в одном уровне в таком случае было бы неприемлемо, снижая скорость преодоления пересечения и увеличивая время в пути [1]. В самом начале пути в Соединенных Штатах

Америки был создан проект двухуровневого пересечения, запатентованный в 1912 году и получивший название «клеверный лист». Реализован первый «клеверный лист» был 16 лет спустя в 1928 году в городе Вудбридже, штата Нью Джерси, США (рис. 1) [2, 3].

В 1941 году на магистрали Пасадена в Лос-Анжелесе было построено первое двухуровневое пересечение по типу «ромб» (рис. 2) [2].

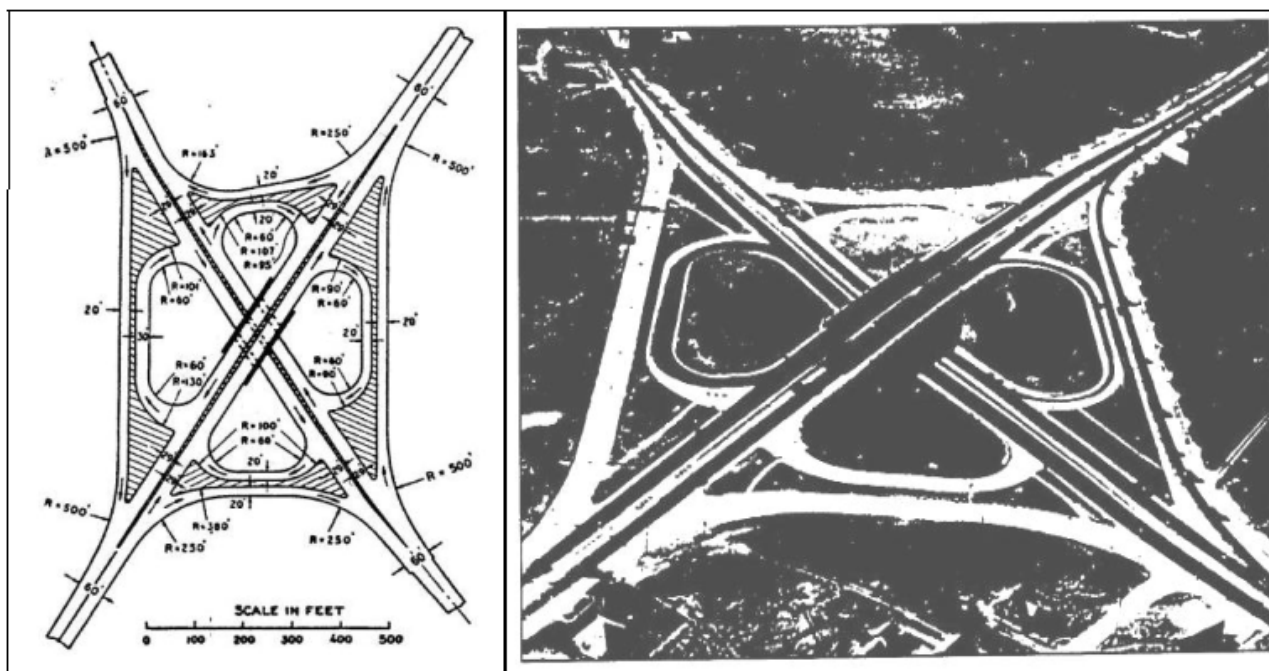


Рис. 1. Чертеж патента США (1912) и первый «клеверный лист» (1928) [2]



Рис. 2. Первая транспортная развязка «ромб», 1941 [2]

Вариации транспортных развязок по типу «клеверный лист» и «ромб» стали основными при выборе способа двухуровневого пересечения в городских условиях.

Устройство ромбовидного пересечения не всегда способно охватить все требуемые к реализации направления движения, кроме того, организация левоповоротного движения со светофорным регулированием на второстепенной дороге также зачастую не позволяет решить транспортные проблемы. Частично вопрос уменьшения

конфликтных точек решается путем устройства ромбовидного пересечения с изменением сторон движения, предложенное Гилбертом Члевецки в 2003 году (рис. 3) [4, 5]. Данная вариация развязки, согласно исследованиям, является самым безопасным типом пересечения в двух уровнях [6, 7]. Однако, еще не применялась в России и требует комплексного подхода по ее внедрению, в том числе затраты на информирование и обучение водителей.



Рис. 3. Ромбовидное пересечение с изменением сторон движения [4]

При таких исходных данных классический «клеверный лист» – тот искомый исторический и экономически выгодный вариант решения. В том случае, если это касается вновь застраиваемых городских территорий и территорий, где предполагается возможность отчуждения земельных участков под нужды транспортной инфраструктуры.

Другой вариант, когда развязывание городских магистралей происходит на плотно застроенной городской территории. Такие ограничения как набережные рек и каналов, железнодорожные ветки, выявленные объекты культурного наследия, только отстроенные жилые кварталы и другие не менее значимые причины, критически уменьшают площадь, отводимую по транспортную развязку. Такие условия приводят к поиску

минимально возможных параметров, при которых развязку по типу «клеверный лист» удастся реализовать. Таковую возможность имеет обжатый тип «клеверного листа», описанный в ранее действующих документах п. 9.3.4. «Рекомендаций по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах» [8] и п. 7.3.10 «Указаний по

обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах» [9], в которых обжатый левоповоротный съезд является сочетанием прямой вставки и двух кривых малых радиусов с углами поворота  $180^\circ$  и  $90^\circ$  (рис. 4).

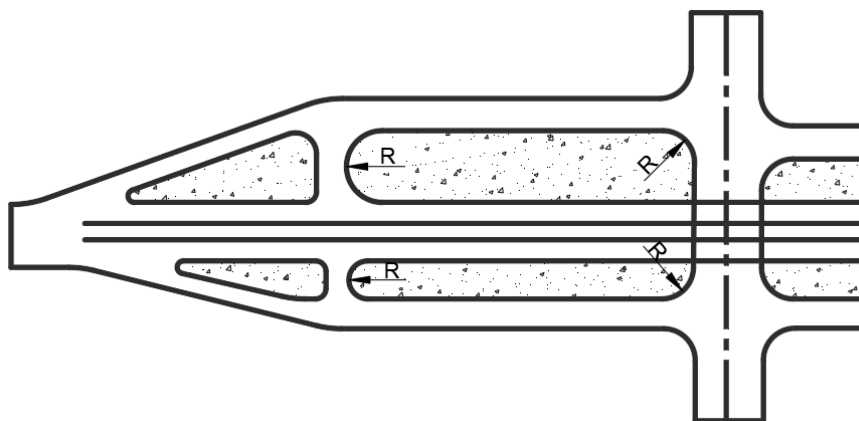


Рис. 4. Схема развязки обжатый «клеверный лист» [9]

Данный тип развязки также описан в действующих ранее «Рекомендациях по проектированию улиц и дорог городов и сельских поселений» [10]. Подобная схема была названа «сплюснутый клеверный лист» и позволяла устройство левоповоротного съезда с радиусом от 8 м в особо сложных условиях.

Действующие в Российской Федерации нормативные документы, строго определяя расчетную скорость на петлевом левоповоротном съезде транспортной развязки, значительно ограничили возможность применения данного типа развязки в условиях плотной городской застройки.

СП 396.1325800.2018 «Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования» п. 5.9.21 табл. 5.18 ограничивает минимальную расчетную скорость на левоповоротных петлевых съездах до 40 км/ч и 30 км/ч в зависимости от отсутствия/наличия конфликтных точек соответственно. Следующий за ним п. 5.9.21а указывает, что минимальные радиусы кривых в плане определяют расчетом в зависимости от указанной расчетной скорости по приложению Ж.1, а также допускается принимать минимальный радиус кривых в плане по табл. 5.5. Согласно табл. 5.5 минимальный радиус кривой в плане при расчетной скорости 40 км/ч – от 60 м до 90 м в зависимости от уклона виража, при расчетной скорости 30 км/ч – от 30 м до 50 м в аналогичной зависимости. Расчеты по формуле из приложения Ж.1 для данной расчетной скорости соответствуют табличным.

Обновленные «Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах» [11] также ограничили минимальный радиус левоповоротного съезда до 30 м.

Ширина коридора для устройства транспортной развязки при таких параметрах левоповоротного съезда зачастую намного превышает ту ширину, которая оказывается доступной в плотной городской застройке.

Когда мы говорим о транспортной развязке типа «клеверный лист» в разрезе увеличения скорости движения и пропускной способности на загородных автомобильных дорогах, мы говорим об увеличении радиусов съездов, но, когда речь идет о необходимости иметь возможность реализовать необходимое направление движение в условиях плотной городской застройки требуется расширение возможностей проектировщика для понижения расчетной скорости движения на съезде.

Отсутствие в нормативной документации возможности понижать расчетную скорость на левоповоротных съездах транспортной развязки ведет к необходимости либо отказа от реализации части направлений, что негативно сказывается на выполнении транспортной развязкой своих функций в городских условиях, либо к устройству дополнительного светофорного объекта, что может привести к уменьшению пропускной способности городской магистрали.

Целью данного исследования является разработка стратегии и поиск возможных решений по оптимизации размера территории, требуемой для устройства транспортной развязки, с внесением

необходимых изменений в градостроительную нормативную документацию.

*Объектом исследования* является нормативная документация, действующая на данный момент в сфере градостроительного проектирования. *Предметом исследования* выступают расчетные параметры, утвержденные для проектирования съездов транспортных развязок в условиях плотной городской застройки.

Основными задачами исследования являются:

- определение минимальных радиусов кривых в плане для транспортной развязки по типу обжатый «клеверный лист» с поэтапным снижением расчетной скорости до выявления оптимального значения;
- вычисление величин уширения полос движения для наиболее характерных видов городского транспорта;
- выявление иных положений нормативной документации, оказывающих влияние на обеспечение безопасности движения и требующих дополнительного исследования и регулирования при изменении расчетных параметров на съездах транспортных развязок.

**Материалы и методы.** В ходе исследования были изучены и проанализированы материалы отечественной и зарубежной нормативной документации, а также научные исследования по вопросу возможности уменьшения требуемой расчетной скорости на петлевых съездах с целью уменьшения радиуса горизонтальной кривой в плане. Были проведены аналогии применительно к местным нормам и требованиям и выполнен расчет необходимых показателей.

**Основная часть.** В ходе поиска возможности обоснования снижения расчетной скорости на левоповоротных съездах было проведено исследование зарубежной нормативной документации AASHTO «A Policy on Geometric Design of Highways and Streets», США [12], а также справочника «Ramp Management and Control», США [13].

П. 10.9.6.2.1 [12] содержит рекомендации по соотношению расчетной скорости на магистрали и съездах (см. табл. 1), а также говорит, что значения расчетной скорости следует принимать не менее данных в таблице, за исключением, где указано иное в обсуждениях ниже.

Таблица 1

**Руководящие значения по выбору расчетной скорости съездов по отношению к расчетной скорости на магистрали [12]**

| Метрическая система                         |                      |    |    |    |    |     |     |     |     |
|---------------------------------------------|----------------------|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| Расчетная скорость на автомагистрали (км/ч) | 50                   | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 |
| Расчетная скорость на съезде (км/ч)         |                      |    |    |    |    |     |     |     |     |
| Наибольшее значение (85 %)                  | 40                   | 50 | 60 | 70 | 80 | 90  | 100 | 110 | 120 |
| Среднее значение (70 %)                     | 30                   | 40 | 50 | 60 | 60 | 70  | 80  | 90  | 100 |
| Наименьшее значение (50 %)                  | 20                   | 30 | 40 | 40 | 50 | 50  | 60  | 70  | 80  |
| Соответствующий минимальный радиус (м)      | см. таблицу 3–7 [12] |    |    |    |    |     |     |     |     |

В обсуждениях ниже, в п. 10.9.6.2.4 [12] сказано, что минимальные значения петлевых съездов обычно устанавливаются для магистралей с расчетной скоростью более 80 км/ч и расчетная скорость предпочтительно должна быть не менее 30 км/ч. Из чего следует, что строгого ограничения по минимальной расчетной скорости на петлевых съездах в данном нормативе не определено.

Задаваясь целью определить минимально допустимые значения радиусов левоповоротных петлевых съездов в зависимости от расчетной скорости были получены следующие данные (табл. 3) согласно формуле (1) [14]:

$$R_{min} = \frac{V_{расч}^2}{127(\mu \pm i_n)}, \quad (1)$$

где,  $R_{min}$  – минимальный радиус кривой в плане, м;  $V_{расч}$  – расчетная скорость, км/ч;  $\mu$  – коэффициент поперечной силы;  $i_n$  – поперечный уклон проезжей части, доли.

Минимальные коэффициенты поперечной силы, принятые для расчета из табл. Ж.1 СП 396.1325800.2018 «Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования» (табл. 2) подтверждаются исследованиями, проведенными Департаментом Транспорта США [15]. Однако, данные коэффициенты были установлены в 1940-х годах и требуют пересмотра для более эффективного учета текущего парка транспортных средств, о чем говорится в исследовании [16]. Для текущего исследования принимаются значения из действующей нормативной документации.

Учитывая, полученные данные, определяем величину уширения полосы движения (табл. 5) согласно формуле (2) СП 396.1325800.2018 «Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования» для поперечного уклона проезжей части (виража) 0,03 (30 ‰):



$$\Delta = \frac{L^2}{2R}, \quad (2)$$

где,  $\Delta$  – величина уширения, м;  $L$  – длина расчетного транспортного средства от переднего бампера до задней оси, м;  $R$  – радиус кривой в плане, м.

Таблица 2

**Расчетные значения коэффициентов поперечной силы (табл. Ж.1 СП 396.1325800.2018)**

| Расчетная скорость, км/ч                                                                           | Коэффициент поперечной силы $\mu$ |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 130                                                                                                | 0,09                              |
| 120                                                                                                | 0,09                              |
| 100                                                                                                | 0,12                              |
| 80                                                                                                 | 0,14                              |
| 60                                                                                                 | 0,15                              |
| 50                                                                                                 | 0,16                              |
| 40                                                                                                 | 0,17                              |
| 30 и менее                                                                                         | 0,18                              |
| Примечание: Промежуточные значения коэффициентов поперечной силы следует определять интерполяцией. |                                   |

Таблица 3

**Значения минимальных радиусов кривых в плане в зависимости от расчетной скорости и поперечного уклона проезжей части**

| 0,02  | 0,03  | 0,04  | $i_n \backslash v_{расч}$ |
|-------|-------|-------|---------------------------|
| 66,31 | 62,99 | 59,99 | 40                        |
| 49,46 | 47,05 | 44,86 | 35                        |
| 35,43 | 33,75 | 32,21 | 30                        |
| 24,61 | 23,43 | 22,37 | 25                        |
| 15,75 | 15,00 | 14,32 | 20                        |
| 8,86  | 8,44  | 8,05  | 15                        |

Основные параметры расчетных транспортных средств приняты согласно табл. Е.1 СП 396.1325800.2018 «Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования» (табл. 4).

Таблица 4

**Расчетные транспортные средства (табл. Е.1 СП 396.1325800.2018)**

| Тип расчетного транспортного средства | Обозначение    | База/расстояния между осями, м | Размеры, м |        |          |        |
|---------------------------------------|----------------|--------------------------------|------------|--------|----------|--------|
|                                       |                |                                | общие      |        | свес     |        |
|                                       |                |                                | длина      | ширина | передний | задний |
| Легковой автомобиль                   | Л              | 2,90                           | 4,90       | 1,90   | 0,90     | 1,10   |
| Автобус                               | А              | 6,90/1,30                      | 15,0       | 2,50   | 2,60     | 4,20   |
| Городской автобус                     | А <sub>г</sub> | 6,20                           | 12,0       | 2,50   | 2,75     | 3,05   |
| Сочлененный автобус                   | А <sub>с</sub> | 5,96/6,05                      | 18,4       | 2,55   | 2,68     | -      |
| Грузовой автомобиль                   | Г              | 5,70/1,40                      | 12,0       | 2,50   | 1,50     | 3,70   |
| Автопоезд                             | А16            | 3,80/5,69/1,33/1,33            | 16,50      | 2,50   | 1,43     | 2,98   |
| Автопоезд                             | А20            | 5,70/1,40/6,20/4,30            | 19,80      | 2,50   | 1,50     | 0,70   |

Расчет производился для автобуса (А), городского автобуса (А<sub>г</sub>), грузового автомобиля (Г). Оценка величины уширения транспортных средств с шарнирными соединениями, такие как

сочлененный автобус и автопоезда должна производиться с помощью моделирования траекторий движения в специализированных программных продуктах [1717].

Таблица 5

**Величина уширения полосы движения в зависимости от длины расчетного транспортного средства и радиуса кривой в плане**

| Автобус (А), $L=10,80$ | Городской автобус (А <sub>г</sub> ), $L=8,95$ | Грузовой автомобиль (Г), $L=8,30$ | $R$<br>( $i_n = 0,03$ ) |
|------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 0,93                   | 0,64                                          | 0,55                              | 62,99                   |
| 1,24                   | 0,85                                          | 0,73                              | 47,05                   |
| 1,73                   | 1,19                                          | 1,02                              | 33,75                   |
| 2,49                   | 1,71                                          | 1,47                              | 23,43                   |
| 3,89                   | 2,67                                          | 2,30                              | 15,00                   |
| 6,91                   | 4,75                                          | 4,08                              | 8,44                    |

Уменьшение радиуса кривой в плане и снижение расчетной скорости требует оценки возможности транспортного средства изменить скорость движения на автомобильной дороге до тре-

буемого значения. Для этого необходимо определить достаточность длины полос торможения и разгона на подходах к кривым уменьшенного радиуса.

Данные табл. 5.14 п. 5.9.10 СП 396.1325800.2018 «Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования» не отражают зависимости от расчетных

скоростей на основной дороге и съезде и видятся недостаточными для принятия решения о необходимых длинах переходно-скоростных полос (табл. 6).

Таблица 6

**Длина переходно-скоростных полос (табл. 5.14 СП 396.1325800.2018)**

| Элемент переходно-скоростной полосы          | Длина, м, при расчетной скорости движения основного направления |                                           |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                                              | Магистральные дороги                                            | Магистральные улицы непрерывного движения |
| Отгон $L_o$                                  | 60                                                              | 30                                        |
| Длина переходно-скоростной полосы $L_T, L_P$ | 190                                                             | 120                                       |

В нормативной документации AASHTO [12] определены значения переходно-скоростных полос разгона и торможения, учитывая скорость основного направления и расчетную скорость на

съезде. В табл. 7 и табл. 8 приведены данные значения соответственно.

Таблица 7

**Минимальная длина полос разгона при уклоне менее 3 процентов [12]**

| Метрическая система                                                           |                                |                                                                               |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Длина полосы разгона, $L_a$ (м) для расчетной скорости на съезде, $V'$ (км/ч) |                                |                                                                               |     |     |     |     |     |     |     |
| Автомостраль                                                                  |                                | Условие остановки                                                             | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  |
| Расчетная скорость, $V$ (км/ч)                                                | Скорость слияния, $V_a$ (км/ч) | Средняя скорость движения (т.е., начальная скорость) на съезде, $V'_a$ (км/ч) |     |     |     |     |     |     |     |
|                                                                               |                                | 0                                                                             | 20  | 28  | 35  | 42  | 51  | 63  | 70  |
| 50                                                                            | 37                             | 60                                                                            | 50  | 30  | –   | –   | –   | –   | –   |
| 60                                                                            | 45                             | 95                                                                            | 80  | 65  | 45  | –   | –   | –   | –   |
| 70                                                                            | 53                             | 150                                                                           | 130 | 110 | 90  | 65  | –   | –   | –   |
| 80                                                                            | 60                             | 200                                                                           | 180 | 165 | 145 | 115 | 65  | –   | –   |
| 90                                                                            | 67                             | 260                                                                           | 245 | 225 | 205 | 175 | 125 | 35  | –   |
| 100                                                                           | 74                             | 345                                                                           | 325 | 305 | 285 | 255 | 205 | 110 | 40  |
| 110                                                                           | 81                             | 430                                                                           | 410 | 390 | 370 | 340 | 290 | 200 | 125 |
| 120                                                                           | 88                             | 545                                                                           | 530 | 515 | 490 | 460 | 410 | 325 | 245 |
| 130                                                                           | 92                             | 610                                                                           | 580 | 550 | 530 | 520 | 500 | 375 | 300 |

где,  $V$  – расчетная скорость магистрали (км/ч);  $V_a$  – скорость слияния (км/ч);  $V'$  – расчетная скорость на съезде (км/ч);  $V'_a$  – средняя скорость (начальная скорость) на съезде (км/ч);  $L_a$  – длина полосы разгона (м).

Таблица 8

**Минимальная длина полос торможения при уклоне менее 3 процентов [12]**

| Метрическая система                                                              |                                   |                                                    |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Длина полосы торможения, $L_a$ (м) для расчетной скорости на съезде, $V'$ (км/ч) |                                   |                                                    |     |     |     |     |     |     |     |
| Расчетная скорость автомагистрали, $V$ (км/ч)                                    | Скорость разделения, $V_a$ (км/ч) | Условие остановки                                  | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  |
|                                                                                  |                                   | Средняя скорость движения на съезде, $V'_a$ (км/ч) |     |     |     |     |     |     |     |
|                                                                                  |                                   | 0                                                  | 20  | 28  | 35  | 42  | 51  | 63  | 70  |
| 50                                                                               | 47                                | 75                                                 | 70  | 60  | 45  | –   | –   | –   | –   |
| 60                                                                               | 55                                | 95                                                 | 90  | 80  | 65  | 55  | –   | –   | –   |
| 70                                                                               | 63                                | 110                                                | 105 | 95  | 85  | 70  | 55  | –   | –   |
| 80                                                                               | 70                                | 130                                                | 125 | 115 | 100 | 90  | 80  | 55  | –   |
| 90                                                                               | 77                                | 145                                                | 140 | 135 | 120 | 110 | 100 | 75  | 60  |
| 100                                                                              | 85                                | 170                                                | 165 | 155 | 145 | 135 | 120 | 100 | 85  |
| 110                                                                              | 91                                | 180                                                | 180 | 170 | 160 | 150 | 140 | 120 | 105 |
| 120                                                                              | 98                                | 200                                                | 195 | 185 | 175 | 170 | 155 | 140 | 120 |
| 130                                                                              | 103                               | 215                                                | 210 | 205 | 195 | 185 | 170 | 155 | 135 |

где,  $V$  – расчетная скорость магистрали (км/ч);  $V_a$  – средняя скорость на магистрали (скорость разделения) (км/ч);  $V'$  – расчетная скорость на съезде (км/ч);  $V'_a$  – средняя скорость на съезде (км/ч);  $L_a$  – длина полосы торможения (м).

В исследовании по расчету параметров переходно-скоростных полос [18], автор, обозначая что вышеприведенные данные получены эмпирически, предлагает аналитический метод расчета длин переходно-скоростных полос с учетом времени на поиск подходящего интервала на участке задержки, коэффициентов скорости автомобилей на основной дороге и съезде, дорожных условий. Данный метод позволяет определять длины переходно-скоростных полос при детальном проектировании.

В вопросе определения минимального возможного радиуса горизонтальной кривой на съезде следует также учитывать не только понятие расчетной скорости, но и понимание того, как водители выбирают фактическую скорость. В исследованиях [19, 20] определены представления об ожиданиях водителей в отношении кривых на съездах, которые непосредственно влияют на выбор скорости движения. Среди них, видимость элементов обустройства во взаимосвязи с проектируемой кривой, например, линиями деревьев, ограждений и прочее, что может указывать на понимание водителем траектории, угол обзора, количество полос движения и другие. Исследования факторов, по которым водитель принимает решение о необходимой фактической скорости и их учет при комплексном планировании будущей транспортной развязки, также является одним из базовых моментов при проектировании кривых малого радиуса на съездах.

**Выводы.** По результатам проведенного исследования и выполненных расчетов можно сделать предварительные выводы о возможности, при соблюдении ряда условий, снизить минимальную расчетную скорость на левоповоротных петлевых съездах до 20 км/ч. При данных значениях расчетной скорости, радиус кривой может быть принят 14,32 м при уклоне проезжей части (виража) 40 %, 15,00 м при уклоне проезжей части (виража) 30 %, 15,75 м при уклоне проезжей части (виража) 20 %. При данных значениях радиусов кривых требуемые уширения полосы движения, при сохранении возможности движения городских автобусов и грузовых автомобилей, не превышает оптимальных значений, которые сохраняют целесообразность уменьшения радиуса кривой в плане.

Для возможности реализации данных решений на практике, в настоящее время требуется вносить изменения в действующую нормативную документацию СП 396.1325800.2018 «Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования». Для всесторонней оценки возможных изменений требуется проведение дополнительных исследований

в части определения необходимости актуализации и переоценки коэффициентов поперечной силы, оценки уширений на кривых малого радиуса для сочлененных транспортных средств, определения длин переходно-скоростных полос в зависимости от параметров и условий движения и расчетных скоростей на основной дороге и съездах, а также определение необходимых мероприятий для правильной оценки водителем требуемой фактической скорости на съезде.

Внесение изменений в СП 396.1325800.2018 «Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования» в части минимальных параметров съездов транспортных развязок в плотно застроенной городской территории требует комплексного подхода для сохранения безопасности дорожного движения и возможности учитывать ограниченное пространство современных городов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецова А.П. Генеалогия современных транспортных развязок // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2017. № 1(8). С. 84–92. doi: 10.17273/CADGIS.2017.1.12
2. Joel P.L. Evolution of Interchange Design in North America // Presentation at the Geometric Design-Learning from the Past Session of the 2014 Conference of the Transportation Association of Canada. 2020. No. 5. Pp. 211–216.
3. Joel P. L. Freeway and Interchange Design: A Historical Perspective // Transportation Research Board. 1993. No. 8. Pp. 60–68.
4. Логинова О.А. Альтернативные решения пересечений в разных уровнях // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 3(41). С. 244–250.
5. Schroeder B., Cunningham C., Ray B., Daleiden A., Jenior P. Diverging diamond interchange informational guide. U.S. department of transportation // Federal highway administration office of safety, August 2014. 226 p.
6. Логинова О.А., Николаева Р.В. Пересечения в разных уровнях – альтернативное решение развития дорожной сети // Техника и технология транспорта. 2019. No. S13. С. 61.
7. Tagar S., Srinivas S. Pulugurtha S.S. Predictor variables influencing merging speed change lane crash risk by interchange type in urban areas. // Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. 2021. Vol. 10. 100375. doi: 10.1016/j.trip.2021.100375
8. Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах // Росавтодор. М.: ГП "Информавтодор", 2002. 158 с.

9. Указания по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах // Минавтодор РСФСР. М.: ГУП ЦПП, 1999. 183 с.

10. Рекомендации по проектированию улиц и дорог городов и сельских поселений // Минстрой России. М.: ЦНИИП градостроительства, 1994. 86 с.

11. Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах // Росавтодор. М.: ФГУП "Информавтодор", 2011. 269 с.

12. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets // The American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO Green Book, Washington DC. 2018. 1048 p.

13. Jacobson L., Stribiak J., Nelson L., Sallman D. Ramp Management and Control Handbook, FHWA-HOP-06-001. Federal Highway Administration // U.S. Department of Transportation, Washington, DC, January 2006. 342 Pp.

14. Бобков В.Ф., Андреев О.В. Проектирование автомобильных дорог: в 2 ч. Ч.1 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1987. 368 с.

15. MacAdam C.C., Fancher P.S., Segal L. Side Friction for Superelevation on Horizontal Curves,

FHWA-RD-86-024. Federal Highway Administration // U.S. Department of Transportation, Washington, DC, August 1985. 211 Pp.

16. Donnell E., Wood J., Himes S., Torbic D. Use of Side Friction in Horizontal Curve Design: A Margin of Safety Assessment. Transportation Research Record. [Bokovoe trenie dlya uskoreniya na gorizontalnyh krivyh, FHWA-RD-86-024. 2020. No. 2588(1). Pp. 61–70. doi:10.3141/2588-07

17. Косцов А.В. Обоснование ширины полос движения однополосных съездов транспортных развязок // Транспортное строительство. 2018. № 3. С. 12–14.

18. Маркуц В.М. Расчет параметров переходно-скоростных полос в зоне въезда на автомагистраль // Успехи современного естествознания. 2014. № 1. С. 52–59.

19. Vos J., Farah H., Hagenzieker M. How do dutch drivers perceive horizontal curves on freeway interchanges and which cues influence their speed choice? // IATSS Research. 2021. Vol. 45. Issue 2. Pp. 258–266. DOI:10.1016/j.iatssr.2020.11.004

20. Farah H., Beinum A., Daamen W. Empirical Speed Behavior on Horizontal Ramp Curves in Interchanges in the Netherlands. // Transportation Research Record. 2017. 2618(1). Pp. 38–47. DOI:10.3141/2618-04

#### Информация об авторах

**Бобнева Алена Николаевна**, руководитель проекта. e-mail: bobneva@mail.ru. АО «Петербургские дороги», г. Санкт-Петербург, 192236, Софийская улица, дом 6, корпус 8, строение 1

Поступила 10.11.2022 г.

© Бобнева А.Н., 2023

**Bobneva A.N.**

JSC "Petersburg Roads"

E-mail: bobneva@mail.ru

## STRATEGY FOR RAMP DESIGN ON TRANSPORT INTERCHANGES IN DENSELY BUILT-UP URBAN AREAS

**Abstract.** The relevance of the research is defined by necessity to find a way of designing transport interchanges in densely built-up urban areas in the conditions of the constantly growing volume of traffic on urban highways. Current Russian regulations in road design industry significantly limit the minimum values of ramp design speed and as a consequence the minimum values of curve radii for loop ramp on transport interchanges. Setting of such values lead to abandon the number of ramps and to add some traffic lights. In this research, local and foreign regulations and scholarly articles are studied and analyzed. The required calculations of minimum values of curve radii for loop ramp and the values of curve widening are also performed. The main result of research is preliminary conclusions of the possibility to decrease the minimum value of ramp design speed, subject to certain conditions. The strategy for changing limit values on transport interchanges is created in consideration of multifaceted approach with the revaluation of the side friction factors, length of acceleration and deceleration lanes and a number of other parameters to ensure the road safety in densely built-up urban areas.

**Keywords:** cloverleaf, loop ramp, ramp design speed, curve widening, side friction, acceleration lane, deceleration lane.

## REFERENCES

1. Kuznetsova A.P. Genealogy of modern transport interchanges [Genealogiya sovremennykh transportnykh razvyazok]. CAD and GIS of highways. 2017. 1(8). Pp. 84–92. (rus) doi: 10.17273/CADGIS.2017.1.12
2. Joel P.L. Evolution of Interchange Design in North America [Evoluciya dizajna razvyazki v Severnoj Amerike]. Presentation at the Geometric Design-Learning from the Past Session of the 2014 Conference of the Transportation Association of Canada. 2020. No.5. Pp. 211–216. (rus)
3. Joel P.L. Freeway and Interchange Design: A Historical Perspective [Proektirovanie avtostrad i razvyazok: istoricheskaya perspektiva]. Transportation Research Board. 1993. No. 8. Pp. 60–68. (rus)
4. Loginova O.A. Alternative solutions of intersections at different levels [Al'ternativnye resheniya peresechenij v raznyh urovnyakh]. Izvestiya Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2017. No 3(41). Pp. 244–250. (rus)
5. Schroeder B., Cunningham C., Ray B., Daleiden A., Jenior P. Diverging diamond interchange informational guide. U.S. department of transportation. [Informacionnoe rukovodstvo po obmenu raskhodyashchimisya almazami]. Federal highway administration office of safety, August 2014. 226 p. (rus)
6. Loginova O.A., Nikolaeva R.V. Intersections at different levels - an alternative solution for the development of the road network [Peresecheniya v raznykh urovnyakh – al'ternativnoe reshenie razvitiya dorozhnoy seti]. Tekhnika i tekhnologiya transporta. 2019. No. S13. P. 61. (rus)
7. Tagar S., Srinivas S., Pulugurtha S.S. Predictor variables influencing merging speed change lane crash risk by interchange type in urban areas [Peremennye-prediktory, vliyayushchie na risk avarii pri perestroenii pri smene polosy dvizheniya v zavisimosti ot tipa razvyazki v gorodskikh rayonakh]. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. 2021. Vol. 10. 100375. doi: 10.1016/j.trip.2021.100375
8. Recommendations for ensuring traffic safety on highways [Rekomendatsii po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya na avtomobil'nykh dorogakh]. Rosavtodor. M.: GP "Informavtodor", 2002. 158 p. (rus)
9. Instructions for ensuring traffic safety on highways [Ukazaniya po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya na avtomobil'nykh dorogakh]. Minavtodor RSFSR. M.: GUP TsPP, 1999. 183 p. (rus)
10. Recommendations for the design of streets and roads of cities and rural settlements [Rekomendatsii po proektirovaniyu ulits i dorog gorodov i sel'skikh poseleniy]. Ministroy Rossii. M.: TsNIIP gradostroitel'stva, 1994. 86 p. (rus)
11. Recommendations for ensuring traffic safety on highways [Rekomendatsii po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya na avtomobil'nykh dorogakh]. Rosavtodor. M.: FGUP "Informavtodor", 2011. 269 p. (rus)
12. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets [Politika po geometricheskomu dizajnu avtomobil'nykh dorog i ulic]. The American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO Green Book, Washington DC. 2018. 1048 p. (rus)
13. Jacobson L., Stribiak J., Nelson L., Sallman D. Ramp Management and Control Handbook, FHWA-HOP-06-001. Federal Highway Administration [Rukovodstvo po upravleniyu rampoj i kontrolyu za nej, FHWA-HOP-06-001. Federal'noe upravlenie avtomobil'nykh dorog]. U.S. Department of Transportation, Washington, DC, January 2006. 342 p. (rus)
14. Bobkov V.F., Andreev O.V. Designing of highways: in 2 hours of the 1st [proektirovanie avtomobil'nykh dorog] 2nd ed., reprint. and additional M.: Transport, 1987. 368 p. (rus)
15. MacAdam C.C., Fancher P.S., Segal L. Side Friction for Superelevation on Horizontal Curves, FHWA-RD-86-024. Federal Highway Administration [Bokovoe trenie dlya uskoreniya na gorizonta'nykh krivykh, FHWA-RD-86-024. Federal'noe upravlenie avtomobil'nykh dorog, Ministerstvo transporta SSHA]. U.S. Department of Transportation, Washington, DC, August 1985. 211 p. (rus)
16. Donnell E., Wood J., Himes S., Torbic D. Use of Side Friction in Horizontal Curve Design: A Margin of Safety Assessment. Transportation Research Record. [Bokovoe trenie dlya uskoreniya na gorizonta'nykh krivykh, FHWA-RD-86-024. [Federal'noe upravlenie avtomobil'nykh dorog, Ministerstvo transporta SSHA] 2020. No. 2588(1). Pp. 61–70. doi: 10.3141/2588-07 (rus)
17. Kostsov A.V. Justification of the width of traffic lanes of single-lane exits of transport interchanges [Obosnovanie shiriny polos dvizheniya odnopolosnykh s"ezdov transportnykh razvyazok]. Transport construction. 2018. No. 3. Pp. 12–14. (rus)
18. Markuts V.M. Calculation of the parameters of transitional high-speed lanes in the zone of entry to the motorway [Raschet parametrov perekhodnoskorostnykh polos v zone v"ezda na avtomagistral']. Successes of modern natural science. 2014. No. 1. Pp. 52–59. (rus)
19. Vos J., Farah H., Hagenzieker M. How do dutch drivers perceive horizontal curves on freeway interchanges and which cues influence their speed choice? [Kak gollandskie voditeli vosprinimayut gorizonta'lnuyu krivuyu na razvyazke avtostrady i

что влияет на их выбор скорости?]. IATSS Research. 2021. Vol. 45. Issue 2. Pp. 258–266. DOI:10.1016/j.iatssr.2020.11.004 (rus)

20. Farah H., Beinum A., Daamen W. Empirical Speed Behavior on Horizontal Ramp Curves in Interchanges in the Netherlands. [Empiricheskoe

povedenie skorosti na gorizontaľnyh krivyh rampy na razvyazkah v Niderlandah]. Transportation Research Record. 2017. No. 2618(1). Pp. 38–47. DOI:10.3141/2618-04 (rus)

*Information about the authors*

**Bobneva, Alena N.** Project Manager. e-mail: bobneva@mail.ru. JSC "Petersburg Roads", St. Petersburg, 192236, 6-8-1 Sofiyskaya street

---

*Received 10.11.2022*

**Для цитирования:**

Бобнева А.Н. Стратегия проектирования съездов транспортных развязок в условиях плотной городской застройки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 2. С. 67–76. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-67-76

**For citation:**

Bobneva A.N. Strategy for ramp design on transport interchanges in densely built-up urban areas. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 2. Pp. 67–76. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-67-76



DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-77-84

Чикаев И.И.

Южный федеральный университет

E-mail: chikaev@sfedu.ru

## ФОРМООБРАЗУЮЩАЯ РОЛЬ ЛИНИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ФАСАДНЫХ РЕШЕНИЙ ЗДАНИЙ

**Аннотация.** Фасады зданий и сооружений, образующие визуальную архитектурно-градостроительную среду современного города, главным образом складываются из разнообразных фасадных материалов и декоративных и (или) функциональных конструктивных элементов. Сложенная взаимосвязь между ними коррелируемая по определенным композиционным принципам создает аттрактивность зрительного восприятия архитектурной формы, вписанной в пространство мегаполиса. Фасады формируют пространство современного города, которое устремляется создавать вокруг себя формы, направление которых задают линии: градостроительные линии, организующие застройку и линии, создающие архитектурный облик города – формообразующие. Таким образом, так или иначе элементы архитектурно-градостроительного пространства формируются посредством линии. И линия выступает как одно из главных и первичных композиционных средств моделирования, с помощью которого разрабатывается архитектурная форма. В статье анализируются архитектурно-композиционные решения фасадов зданий в части использовании линии как базового формообразующего средства при решении фасадной плоскости. Выявляются общие закономерности использования линии при разработке фасадных решений независимо от временной эпохи и стилистического направления. Определяется ее роль как универсального композиционного средства графического моделирования внешнего облика зданий, благодаря которому располагаются по фасадной плоскости архитектурные, конструктивные и декоративные элементы, складываясь в выразительный архитектурный образ.

**Ключевые слова:** линия, фасад, формообразование, архитектурные решения.

**Введение.** Архитектурная форма здания обладает физическими и геометрическими свойствами, которые организованы между собой композиционными принципами разного характера [1]. Сегодня архитектурная форма многообразна и сложна в своем формообразовании, ведомая порой противоречивыми, не традиционными факторами на стыке научно-технической революции и творческого мышления и идей иммерсивности архитектурным образом. Как отмечал Арнхейм, визуальное восприятие по своей структуры представляет собой чувственный аналог интеллектуального познания [2], то есть фактически, иммерсивность и аттрактивность архитектурным образом [3] в первую очередь создают чувственное восприятие и ощущения внутри нас.

Эдмунд Н. Бэкон отмечал следующее: «Архитектурная форма – это точка соприкосновения массы с пространством... Архитектурная форма, фактура, материал, градации света, тени, цвета – все это вместе одухотворяет архитектурное пространство...» [4]. Таким образом, любая архитектурная форма, какой бы она геометрически сложной не была, строится прежде всего на основных архитектурно-композиционных элементах, именно такое сложение между собой позволяет чувственно проникнуться внешним обликом здания. Прежде всего такими элементами выступают первичные элементы (точка, линия, плоскость, объем) и свойства формы (геометрия,

очертание и свойства поверхности). Безусловно, чтобы указанные элементы работали на архитектурную образность в гармоническом восприятии, их необходимо организовать между собой определенными принципами, упорядочив композицию [5], создав гармоническую целостность архитектурной формы [6].

Основными композиционными принципами, которые организуют между собой первичные элементы это: размерные отношения (пропорционирование), ось (симметрии и асимметрии), ритм и иерархия [5, 6].

В настоящее время текущий уровень развития индустриализации и информационного общества с большой скоростью наполняет палитру «красок» художественных возможностей формирования фасадных решений, а также предлагает различные «кисти» - композиционные средства и способы образования формы. Вместе с тем одно из требований общества является комфортная городская среда, в силу большого разнообразия возможностей формирования фасадных решений и как следствие, создание комфортной визуально-образной среды, формирование бренда города [7]. Современные конструктивные элементы и материалы позволяют реализовать любой творческий замысел архитектора: сложный двухслойный прямолинейный фасад, кристаллические конструкции, консольные конструкции,

скосы ребер стен, деконструктивные формы, различные криволинейные и аморфные формы. Таким образом, в настоящее время технологии предлагают практически безграничные архитектурно-художественные возможности формирования фасадных решений.

Вместе с тем для упорядочивания композиционной организации вышеизложенных возможностей необходима разработка методов и приемов формирования фасадных решений, основанных на общем универсальном композиционном средстве, применимом во всех стилистических направлениях. Таким средством моделирования может выступать линия при формировании фасадных решений как отделочными материалами, так и разнообразными конструктивными элементами.

Некоторые исследователи [8, 9] проводили графический анализ фасадов в поисках закономерностей повторяющихся структур фасадных элементов. Алгоритмы поиска повторяющихся структур базировались на использовании реперных линий. Вместе с тем линии выступали в качестве вспомогательного элемента для достижения цели – поиска повторяющихся структур фасадных решений.

Целью настоящей статьи является определение формообразующей роли линии при формировании фасадных решений. Для реализации указанной цели, определена задача, которая заключается в рассмотрении организации фасадных решений различных зданий на основании анализа фотоизображений существующих объектов [10].

**Методы, оборудование, материалы.** Для настоящего исследования использовался графо-аналитический метод, заключающийся в графическом анализе геометрической структуры фасадов, в целях определения роли линии в качестве формообразующего средства композиции при формировании фасадных решений зданий.

**Основная часть.** Вместе с тем как отмечал Пауль Клее «Все живописные формы начинаются с точки, которая самостоятельно приходит в движение... Точка движется... и возникает линия – первое измерение.» [11]. Любая сложная форма образуется из примитивных, первичных композиционных элементов [12]. Сложную форму можно мысленно представить, как совокупность первичных элементов: точки, линии, плоскости. Плоскость – это форма, очерченная контурами линии, в свою очередь линия берет свое начало из точки и сходится или пересекается также в точке. Таким образом, плоскость можно рассматривать как грань объема архитектурной формы, которая и формирует объект в пространстве [13].

Поиск архитектурной формы методами графической фиксации – рисунка, наиболее полно позволяет развивать творческий замысел и перенести его на зримую поверхность для последующего анализа и проработки полученного образа [14]. Таким образом, можно графически разложить следующее, что все основные композиционные принципы строятся так или иначе от первичного элемента – линии. Следовательно, синтаксис основных композиционных принципов заключен в систему геометрического построения из взаимосвязанных линий.

Определив, что линия является системным элементом композиционных принципов, необходимо провести анализ фасадов зданий как классических эпох, так и новейшего времени и установить, что в независимости от эпохи, архитектурного стиля и социально-культурного контекста общества, при формировании фасадных решений отделочные материалы или декоративные и конструктивные элементы размещаются с помощью линии. Рассмотрим несколько примеров.

Вилла Капра «Ротонда» Андреа Палладио (Виченца, Италия, начало 1566 года) по композиции представляет собой классическую загородную резиденцию, абсолютно симметричной организации, элементы которой построены по пропорциональным отношениям «золотого сечения» [15] с четырьмя одинаковыми фасадными образами. Симметричная организация создает восприятие статичности и уравновешенности. Фасадная плоскость отделана такими материалами как камень и декоративная штукатурка. Также фасад обильно, но лаконично, украшен декоративными конструктивными элементами.

Следует отметить, что композиция фасада имеет строгий линейный и пересекающийся характер, что является основным принципом построения классицистических архитектурных фасадов [16]. Как высказывался Альберти «Вся сила изобразительности, все искусство и умение строить сосредоточенно только в членениях» [17]. Главная линия, которая формирует основу композиции и членит фасад на зеркальные части вокруг себя и упорядочивает объемы фасадных элементов – это осевая линия (на рис. 1 красная штрихпунктирная линия).

Таким образом, если мысленно расчленить фасадную плоскость горизонтальными и вертикальными линиями (на рис. 1 синие и зеленые пунктирные линии), можно обратить внимание на то, что все вышеизложенные архитектурно-композиционные элементы строятся, формируются и располагаются: вдоль, поперек или на пересечении указанных линий. В конкретном случае база (точка) размещение акротериев нахо-

дится на пересечении линий, центр базы и капители колонны также располагается на пересечении горизонтальных и вертикальных линий (на рис. 1 желтые окружности). Вдоль грани линий

формируются плоскости и углы, проемы, задаются точки свесов кровли, и вершина купала, также на пересечении линий.

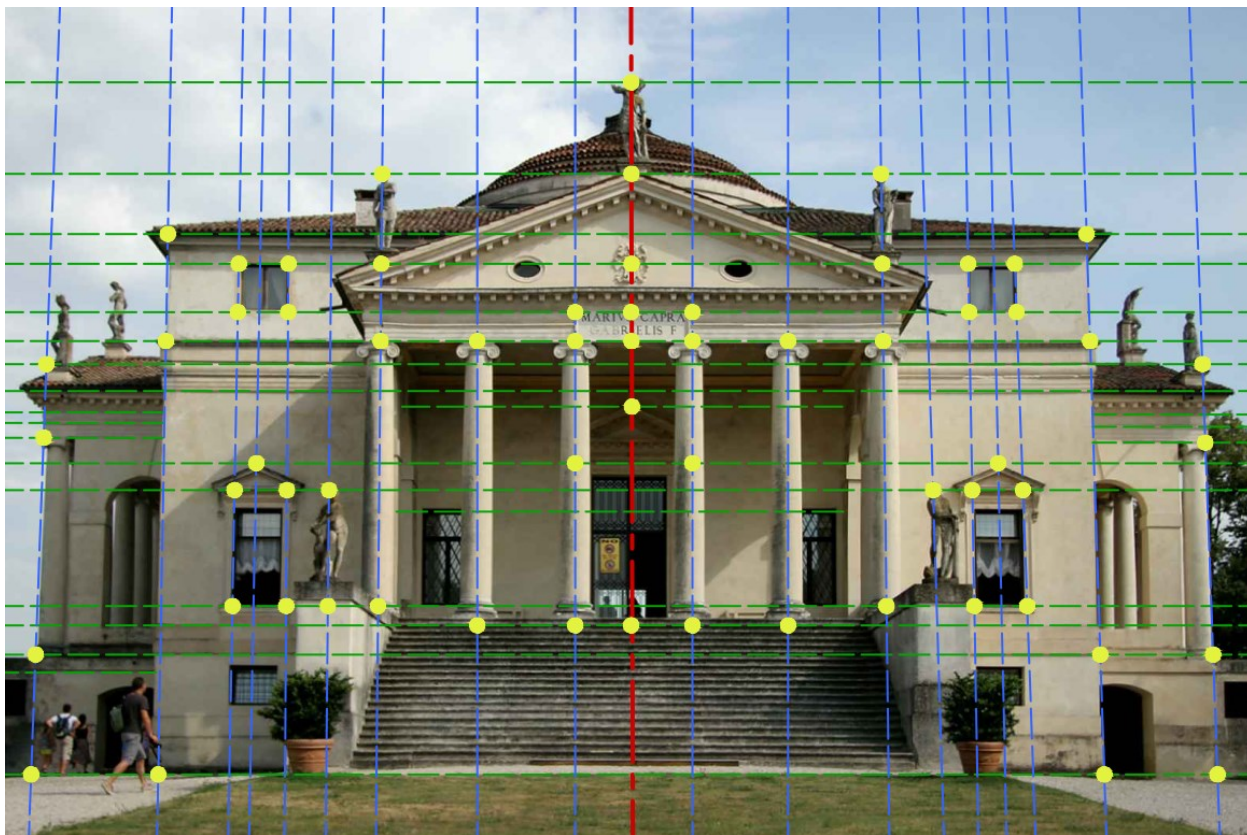


Рис. 1. Графический анализ Виллы Капра «Ротонда» Андреа Палладио (Виченца, Италия)

Вместе с тем при проектировании Андреа Палладио использовал принцип пропорционирования «золотого сечения» [18]. При формировании размерностей путем отношений «золотого сечения» используются, в частности, линии, как горизонтальные, так и вертикальные, которые членят форму отношениями частей и целого. И вокруг этих линий располагаются архитектурные элементы.

Исходя из вышеизложенного, формирование архитектурных и конструктивных элементов фасада происходит по мысленно заданной сетке из чередующихся определенной закономерностью линий и в точках их схода (пересечении).

Другую особенность формообразования фасадных решений линиями имеет Национальный стадион в Гаосюне (Тайвань) (рис. 2). Здесь линия выступает в роли вектора направления развития формообразования архитектурного объема в целом (своеобразная осевая линия) (на рис. 2 фиолетовая штрихпунктирная линия), а также распределения по фасаду деталей в частности. Формирование фасадных решений происходит стальными трубчатыми конструкциями [19], которые устремлены и движутся по вектору (на

рис. 2, синие и зеленные штрихпунктирные линии), обволакивая основной объем, формируемый центральным осевым вектором криволинейной формы.

Таким образом, формирование фасадных решений происходит вдоль и по направлению криволинейной линии, которая выступает в роли вектора, распределяя вокруг себя архитектурно-конструктивные элементы, придавая им динамичности в пространстве.

Иной тип линий используется в Даляньском международном конференц-центре (Китай, Далянь) (рис. 3). Формообразование этого здания выполнено в сложной аморфной структуре. Сложное движение линии по всем поверхностям объема формирует архитектурно-композиционную структуру фасада. Криволинейная форма линии и ее смены направления движения в пространстве, плавно перетекающая горизонтальная линия в вертикальную, все это формирует сложную геометрическую форму фасада.

Также следует отметить, что на пересечениях горизонтальных линий (зеленая штрихпунктирная линия на рис. 3) и вертикальных линиях (фиолетовая штрихпунктирная ли-



ния на рис. 3) образуется точка перелома направления линии (желтые окружности на рис. 3). Что происходит с линией в этих точках пресечения: линия меняет направление движения, переходит из горизонтального в вертикальное движение или происходит раскрытие фасадных панелей, что придает движение фасадной плоскости. Такими линиями формируется гибкая и изменчивая структура фасада, из несхожих между собой частей.

Но вместе с тем на пересечениях этих сложных геометрических линий образуются сетчатые

структуры, которые заполняются отделочным материалом по граням формы, образованной пересекающимися линиями. Таким образом грани рассмотренной линией служат для формирования новых линий и пересечений, а также формируют сложную пространственную геометрию фасадных решений, создавая членение линиями, формируя ячейки и размещая различные вариации отделки материалами по граням внутренней формы пересечений.



Рис. 2. Графический анализ Национального стадиона в Гаосюне (Тайвань)

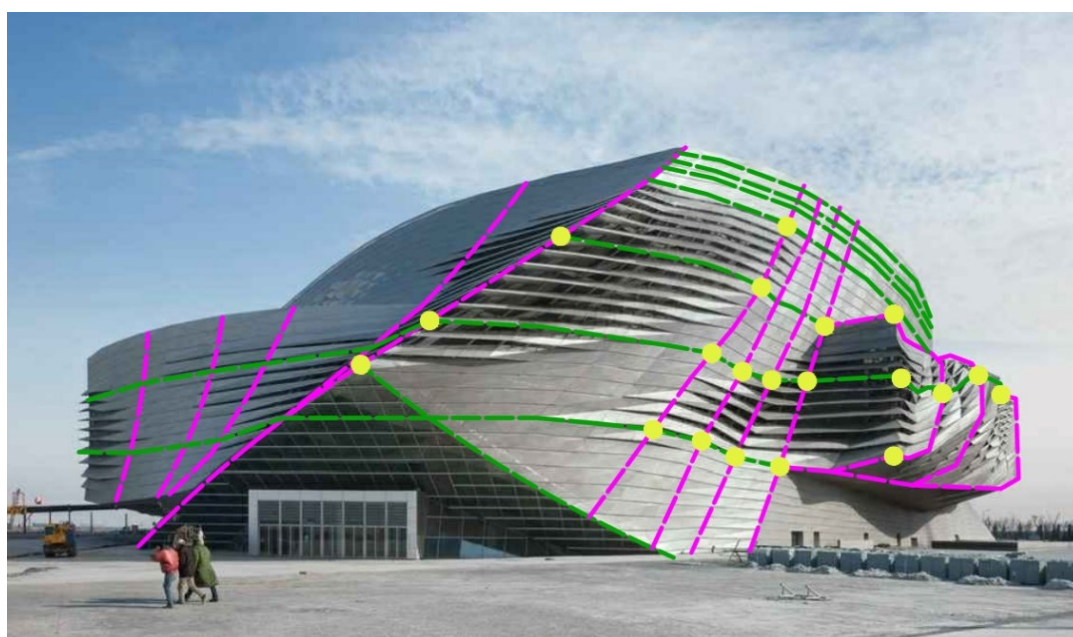


Рис. 3. Графический анализ Даляньского международного конференц-центра (Китай, Далянь)

Рассмотрим Сигрем-билдинг (США, Нью-Йорк). Функциональная строгость дизайна, выполненная по принципу отказа от декоративных элементов в пользу функциональности [20], выражается в оформлении фасадной плоскости навесными стеклянными стенами, которые организованы в регулярном повторяющемся горизонтальном и вертикальном членении линиями. Внутри формы на пересечениях линии размещаются стеклянные панели или глухие черные панели перемычки [21]. Вдоль направления линий

располагаются акцентированный наружный каркас стеклянной навесной стены – ригели (вдоль горизонтальной линии) и середняки (стойки, вдоль вертикальной линии).

Таким образом, все фасадные архитектурно-конструктивные элементы организованы на плоскости с помощью горизонтальных и вертикальных линий, как главный композиционный элемент, от которого «отталкивается» размещение остальных частей композиции.

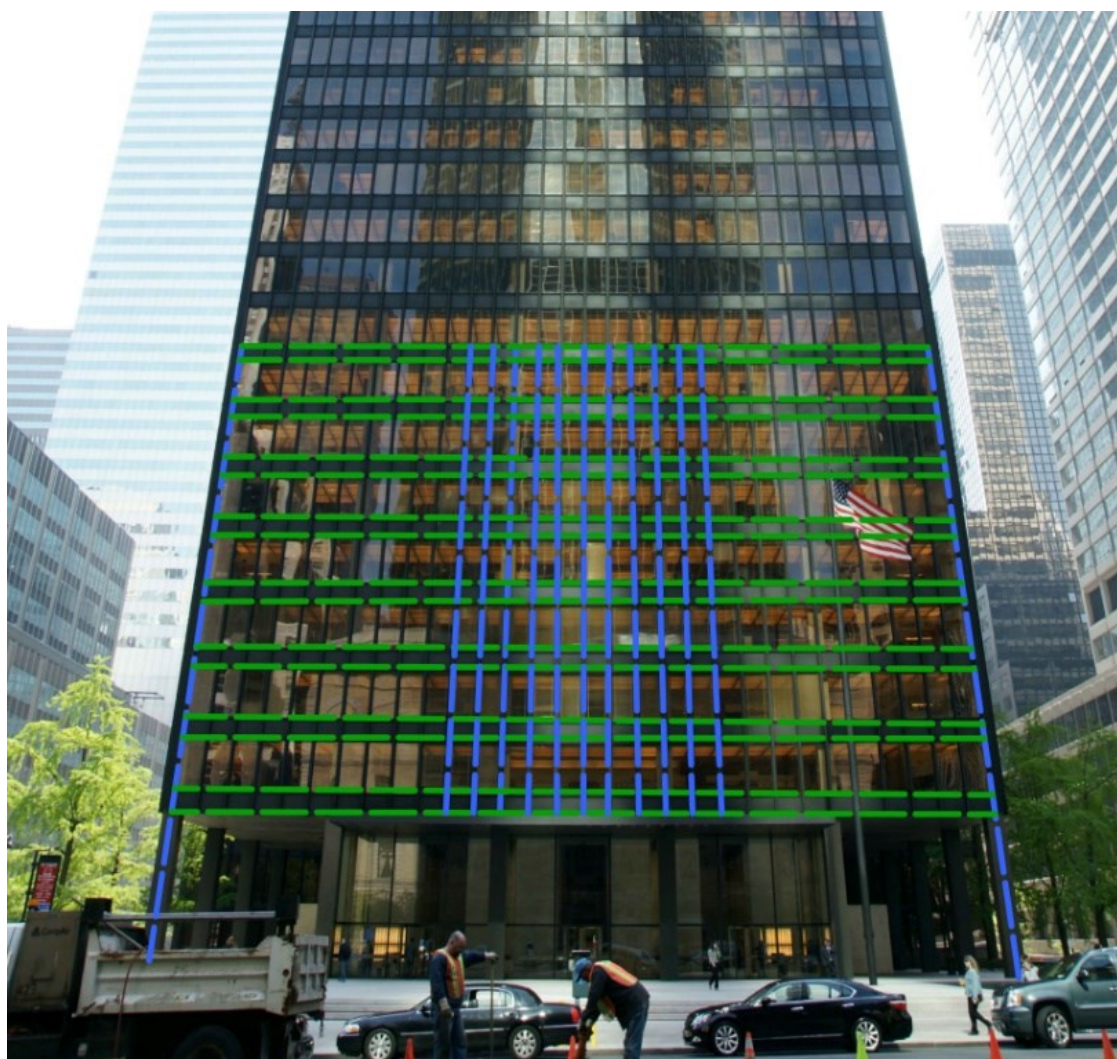


Рис. 4. Графический анализ Сигрем-билдинг (США, Нью-Йорк)

Вместе с тем линия может выступать в качестве инструмента детализации фасадной плоскости, например, здание станции Пекин Фэнтай (Китай, Пекин, 2022 год) (прил. А, рис. 2.5). Как можно установить, что строгим прямолинейным направлением линии организуются большие поверхности или пространства фасадного объема здания. Стеклянные плоскости разрезаются горизонтальными линиями, вдоль которых оформляются импосты стеклянной конструкции и ламели. Продолжая заданное направление указан-

ных линий, формируется глухие фасадные панели, дополнительно ритмично члененные горизонтальными линиями, параллельно основному движению.

Нависящая консольная конструкция, разработана металлическими ламелями, выполненными также в геометрически строгом, параллельном исполнении. Таким образом в данном случае линия выступает также как элемент детализовки фасадной поверхности, по которым разрезается и членятся облицовочные материалы.



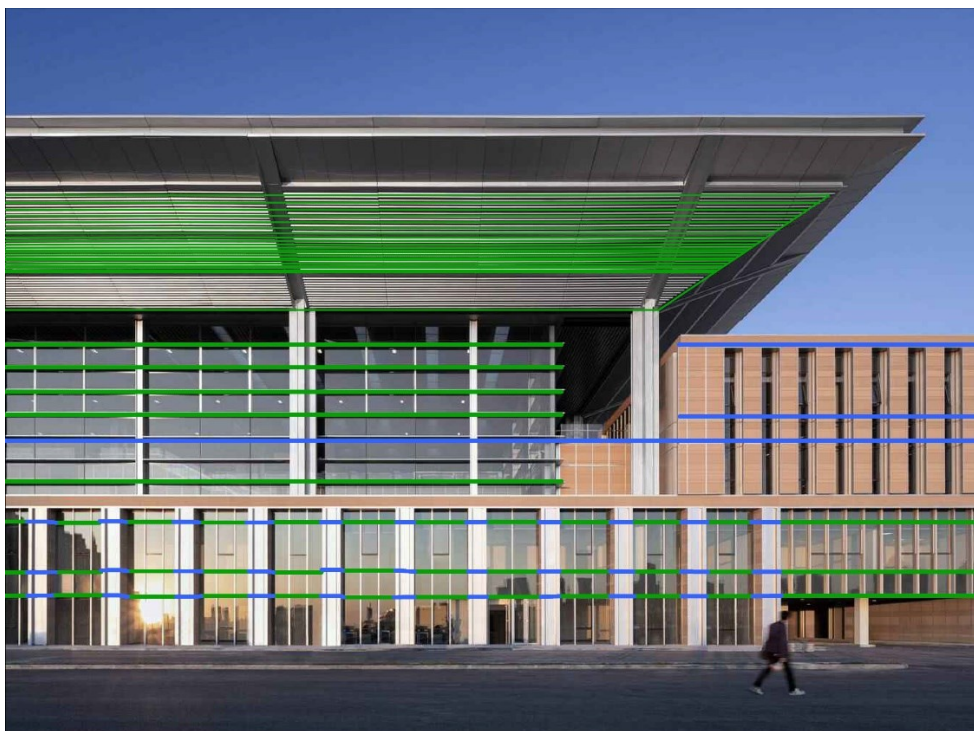


Рис. 5. Графический анализ Станции Пекин Фэнтай (Китай, Пекин).

**Выводы.** Результаты проведенного графического анализа фасадных решений зданий разнообразного стилистического направления и архитектурно-конструктивной структуры позволяет сделать выводы о том, что линия является базовым универсальным композиционным графическим средством, которое организует между собой все элементы фасадной плоскости. При формировании фасадных решений линии выполняет разнообразные формообразующие функции, она может образовывать вертикальное направление (колонны, башни, статуи, стойки), горизонтальное (карнизы, пояс, членение оконными проемами, ригели), организовывать вокруг себя объем (ось симметрии или асимметрии), направлять движение (линия по направлению которой размещаются элементы фасада) и формировать архитектурный объем в целом (сложная линия, меняющая форму и направление по мере своего движения), а также линия детализирует поверхность плоскости.

Таким образом, определена роль линии как универсального и объединяющего композиционного графического средства моделирования при формообразовании фасадных решений и формирования архитектурного образа зданий в различных стилистических направлениях. В связи с этим, учитывая социо-технологические изменения в информационном обществе, целесообразно продолжить исследования в поиске и формулировании методов и принципов разработки фасадных решений, при этом основываясь на универсальном композиционном средстве – линии.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тиц А.А., Божко Ю.Г., Иванова Г.И., Киреева Н.А., Коренчук О.А., Кравец В.И., Петров С.М., Розвадовский Л.Е., Синебрюхов В.Н. Основы архитектурной композиции и проектирования. Киев: Вища школа, 1976. 256 с.
2. Арнхейм Р. Искусство и визуальное восприятие. М.: Прогресс, 1971. 392 с.
3. Лесневская Р.В., Капустин П.В. Архитектура как зрелище XXI века: театрализация архитектуры // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2015. № 2 (38). С. 111–121.
4. Bacon E. Design of cities. New York: Penguin Books, 1976. 338 p.
5. Арнхейм Р. Динамика архитектурных форм. М.: Стройиздат, 1984. 192 с.
6. Иконников А.В. Функция, форма, образ в архитектуре. М.: Стройиздат, 1986. 288 с., ил.
7. Горгорова Ю.В. Формирование городской среды и бренда города на основе мнения горожан // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 2. С. 76–83. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-2-76-83
8. Wen Hao, Wei Liang, Yunhui Wang, Minghua Zzhao, Ye Li. Saliency-Guided Repetition Detection From Facade Point Clouds // IEEE Access. 2019. Vol 7. Pp. 72–81. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2947537
9. Hongfei Xiao, Gaofeng Meng, Lingfeng Wang, Chunhong Pan. Facade repetition detection in a fronto-parallel view with fiducial lines extraction //



Neurocomputing. 2018. Vol 273. Pp. 435-447. DOI:10.1016/j.neucom.2017.07.040

10. ArchDaily [Электронный ресурс]. URL: <https://www.archdaily.com> (дата обращения: 09.11.2022).

11. Klee P. The Thinking Eye. The Notebooks of Paul Klee. Volume I. San Francisco: Wittenborn Art Books, 2013. 588 p.

12. Некрасов А. И. Теория архитектуры. М.: Стройиздат, 1994. 480 с.

13. Франсис Д.К. Архитектура: форма, пространство, композиция. пер. с англ. Е. Нетесовой. М.: АСТ: Астрель, 2005. 399 с.

14. Çağın Tanrıverdi Çetin, Yurdanur Dulgeroglu Yuksel. Tracing the hidden dimension of line in architectural representation // A|Z ITU Journal of Faculty of Architecture. 2020. Vol 17. № 1. Pp. 115–128. DOI:10.5505/itujfa.2020.78800

15. Ле Корбюзье, Шарль Эдуард. Модульор. MOD 1. MOD 2. М.: Стройиздат, 1976. 237 с.

16. Долгов А. В. Ординация основных параметров фасадных форм // Архитектон: известия вузов. 2021. № 4(76). С. 21–25. DOI: 10.47055/1990-4126-2021-4(76)-2

17. Альберти Л.Б. Десять книг о зодчестве. В двух томах, пер. В.П.Зубов и Ф.А.Петровский. М.: «Всесоюзная академия архитектуры», 1935. 392 с.

18. Палладио А. Четыре книги об архитектуре. предисл. И.Е. Печенкин. М.: Издательство АСТ, 2021. 384 с.

19. Hopkins O. Architectural Styles: A Visual Guide. London: Laurence King Publishing Ltd, 2014. 240 p.

20. Aureli P.V. Less is Enough: On Architecture and Asceticism. Moscow: Strelka Press, 2013. 30 p.

21. Hopkins O. Reading Architecture: A Visual Lexicon. London: Laurence King Publishing Ltd, 2012. 176 p.

#### Информация об авторах

**Чикаев Илья Игоревич**, аспирант кафедры графики и информационных технологий архитектурного проектирования. E-mail: [chikaev@sfedu.ru](mailto:chikaev@sfedu.ru). Южный федеральный университет. Россия, 344080, Ростов-на-Дону, пр. Буденновский, 39.

Поступила 17.11.2022 г.

© Чикаев И.И., 2023

*\*Chikaev I.I.*

*Southern Federal University*

*\*E-mail: [chikaev@sfedu.ru](mailto:chikaev@sfedu.ru)*

## SHAPING ROLE OF THE LINE IN THE FORMATION OF FAÇADE SOLUTIONS OF BUILDINGS

**Abstract.** *The facades of buildings and structures, which form the visual architectural and urban planning environment of a modern city, mainly consist of a variety of facade materials and decorative and (or) functional structural elements. The well-coordinated relationship between them, correlated according to certain compositional principles, creates the attractiveness of the visual perception of the architectural form inscribed in the space of the metropolis. Facades form the space of a modern city, which strives to create forms around itself, the direction of which is set by lines: urban planning lines that organize building and lines that create the architectural appearance of the city - formative. Thus, one way or another, the elements of the architectural and urban space are formed by means of a line. And the line acts as one of the main and primary compositional means of modeling, with the help of which an architectural form is developed. The article analyzes the architectural and compositional solutions of building facades in terms of using the line as a basic form-building tool when solving the facade plane. The general patterns of using the line in the development of facade solutions are revealed, regardless of the time period and stylistic direction. Its role is determined as a universal compositional means of graphic modeling of the external appearance of buildings, thanks to which architectural, structural and decorative elements are located along the facade plane, forming an expressive architectural image.*

**Keywords:** *line, facade, shaping, architectural solutions.*

#### REFERENCES

1. Tits A.A., Bozhko Yu.G., Ivanova G.I., Kireeva N.A., Korenchuk O.A., Kravets V.I., Petrov S.M., Rozvadovsky L.E., Sinebryukhov V.N. Fundamentals of architectural composition and

design [Osnovy arhitekturnoj kompozicii i proektirovaniya]. Kyiv: Vishcha shkola, 1976. 256 p. (rus).

2. Arnheim R. Art and visual perception [Iskusstvo i vizual'noe vospriyatie]. M.: Progress,

1971. 392 p. (rus).

3. Lesnevska R.V., Kapustin P.V. Architecture as a spectacle of the XXI century: theatricalization of architecture [Arhitektura kak zrelishche XXI veka: teatralizatsiya arhitektury]. Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and architecture. 2015. No. 2 (38). Pp. 111–121. (rus).

4. Bacon E. Design of quotes. New York: Penguin Books, 1976. 338 p.

5. Arnheim R. Dynamics of architectural forms [Dinamika arhitekturnykh form]. M.: Stroyizdat, 1984. 192 p. (rus).

6. Ikonnikov A.V. Function, form, image in architecture [Funktsiya, forma, obraz v arhitekture]. Moscow: Stroyizdat, 1986. 288 p. (rus).

7. Gorgorova Yu. V. Formation of the urban environment and the brand of the city based on the opinion of citizens [Formirovanie gorodskoj sredy i brenda goroda na osnove mneniya gorozhan]. Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 2. Pp. 76–83. (rus). DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-2-76-83

8. Wen Hao, Wei Liang, Yunhui Wang, Minghua Zzhao, Ye Li. Saliency-Guided Repetition Detection From Facade Point Clouds. IEEE Access. 2019. Vol. 7. Pp. 72–81. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2947537

9. Hongfei Xiao, Gaofeng Meng, Lingfeng Wang, Chunhong Pan. Facade repetition detection in a fronto-parallel view with fiducial lines extraction. Neurocomputing. 2018. Vol. 273. Pp. 435–447. DOI:10.1016/j.neucom.2017.07.040

10. ArchDaily. URL: <https://www.archdaily.com> (date of treatment: 09.11.2022).

11. Klee P. The Thinking Eye. The Notebooks of Paul Klee. Volume I. San Francisco: Wittenborn

Art Books, 2013. 588 p.

12. Nekrasov A.I. Theory of architecture [Teoriya arhitektury]. M.: Stroyizdat, 1994. 480 p. (rus).

13. Francis D.K. Architecture: form, space, composition [Arhitektura: forma, prostranstvo, kompozitsiya], per. from English. E. Netesova. M.: AST: Astrel, 2005. 399 p.

14. Çağın Tanrıverdi Çetin, Yurdanur Dulgeroglu Yuksel. Tracing the hidden dimension of line in architectural representation. A|Z ITU Journal of Faculty of Architecture. 2020. Vol. 17. No. 1. Pp. 115–128. DOI:10.5505/itujfa.2020.78800

15. Le Corbusier, Charles Edouard. Modulor. MOD 1. MOD 2 [Modulor. MOD 1. MOD 2]. M.: Stroyizdat, 1976. 237 p. (rus).

16. Dolgov A. V. Ordination of the main parameters of facade forms [Ordinatsiya osnovnykh parametrov fasadnykh form]. Architecton: university news. 2021. No. 4(76). Pp. 21–25. (rus). DOI: 10.47055/1990-4126-2021-4(76)-2

17. Alberti L.B. Ten books on architecture. In two volumes [Desyat' knig o zodchestve. V dvuh tomah], trans. V.P. Zubov and F.A. Petrovsky. Moscow: All-Union Academy of Architecture, 1935. 392 p. (rus).

18. Palladio A. Four books on architecture [Chetyre knigi ob arhitekture]. M.: AST Publishing House, 2021. 384 p. (rus).

19. Hopkins Owen. Architectural Styles: A Visual Guide. London: Laurence King Publishing Ltd, 2014. 240 p.

20. Pier Vittorio Aureli. Less is Enough: On Architecture and Asceticism. Moscow: Strelka Press, 2013. 30 p.

21. Hopkins Owen. Reading Architecture: A Visual Lexicon. London: Laurence King Publishing Ltd, 2012. 176 p.

#### Information about the authors

**Chikaev Ilya Igorevich**, Postgraduate student. E-mail: [chikaev@sfedu.ru](mailto:chikaev@sfedu.ru). Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education «Southern Federal University». Russia, 344080, Rostov-on-Don, Budennovskiy Ave., 39.

Received 17.11.2022

#### Для цитирования:

Чикаев И.И. Формообразующая роль линии при формировании фасадных решений зданий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 2. С. 77–84. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-77-84

#### For citation:

Chikaev I.I. Shaping role of the line in the formation of façade solutions of buildings. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 2. Pp. 77–84. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-77-84

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-85-93

*\*Жданова И.В., Кузнецова А.А.*

Самарский государственный технический университет

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

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ ОКОЛОНУЛЕВОГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

**Аннотация.** В данном исследовании авторы обращают внимание на мировую проблему по внедрению мер для снижения энергопотребления жилых зданий. Приведены утверждения международной комиссии по необходимости уменьшения потребности в доле не возобновляемых углеродистых источников энергии. Примеры опыта экспериментального проектирования показывают активное развитие данной темы во многих странах. Это позволило выявить основные приемы, используемые для строительства энергоэффективных жилых зданий – компактное планировочное решение, высокоэффективная изоляция здания, «интеллектуальные» инженерные системы, рекуперация тепла, использование альтернативных источников энергии и другое. В исследовании дано определение зданиям околонулевого энергопотребления – это пассивные здания с системами выработки альтернативной энергии для обеспечения собственных потребностей. Также выявлены основные положения проектирования зданий околонулевого энергопотребления: околонулевость, интеллектуальность, мобильность, многозадачность, экологичность, адаптивность, знаковость, художественность. В исследовании определены типы формообразования околонулевого энергоэффективного здания и варианты обеспечения энергоэффективности – это здание «линия», здание «куб», здание «периметр», здание «башня», здание «структура». Выявленные приемы и разработанные основные положения с типами формообразования прошли апробацию на экспериментальном проекте многофункционального жилого комплекса околонулевого энергопотребления в городе Самара. В итоге можно сделать вывод, что технический прогресс позволит прийти в практику проектирования зданиям околонулевого энергопотребления, благодаря интеллектуальным и эффективным инженерным решениям.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, экономия энергии, возобновляемые источники энергии, околонулевого энергопотребление, объемно-планировочные решения, принципы проектирования, типы формообразования

**Введение.** Правительства многих стран прилагают возможные усилия для снижения энергопотребления. В Евросоюзе принята директива 2010/31/ЕС от 19 мая 2010 года об энергообеспечении зданий, в результате появилось понятие Nearly Zero Energy Building (nZEB) – «здание с почти нулевым потреблением энергии». Согласно данной директиве, «к 31 декабря 2020 все новые здания должны стать зданиями с почти нулевым потреблением энергии, а после 31 декабря 2018 правительственные и муниципальные здания необходимо переоборудовать в здания с почти нулевым потреблением энергии». Также необходимо применять меры по увеличению количества зданий, которые будут обладать еще большей энергетической эффективностью, тем самым снижая как потребление энергии, так и эмиссию диоксида углерода [1–4].

К выбросу парниковых газов, в частности CO<sub>2</sub>, приводит генерация энергии из ископаемых ресурсов. Ключевыми источниками тепловой энергии по-прежнему являются каменный уголь, газ и нефть. В течение длительного времени, начиная с конференции ООН 1972 года в Стокгольме научное сообщество оживленно обговаривало к каким результатам приводят выбросы

CO<sub>2</sub> в результате деятельности человечества. Таким образом, международная комиссия, состоящая из разных ученых, всецело утвердила, что именно техногенные факторы являются первопричиной изменения климата в 20 веке. Основным техногенным фактором, воздействующим на климат, является выбросы парниковых газов в атмосферу. Вырастают выбросы как CO<sub>2</sub>, так и их концентрация в атмосфере. По данным на 2020 год, источниками основной энергии на 80,8 % являются нефть, природный газ и уголь. Жилые и общественные здания потребляют в среднем 40 % от общей выработки основной энергии. Выходит прямая взаимосвязь между потреблением основной энергии зданиями и выбросами [5–8]. Если удастся снизить расходование энергии зданиями, тем самым снизятся выбросы CO<sub>2</sub>. Таким образом, влияние на экологию связано с энергоэффективностью напрямую через CO<sub>2</sub>. Энергоэффективные технологии зданий могут уменьшить затраты энергии на эксплуатацию всех видов зданий, а значит значительно уменьшить потребность в доле не возобновляемых углеродных источников энергии [9–13].

Выше приведенные данные, несомненно, подтверждают актуальность данной темы исследования, и доказывает необходимость разработки новых решений для экономии и регенерации энергии при проектировании и строительстве жилых зданий, например, внедряя здания околонулевого энергопотребления. Поэтому очень важно выявить объемно-планировочные особенности данных жилых зданий и определить новые подходы при проектировании.

Цель исследования состоит в выявлении объемно-планировочных особенностей жилых зданий околонулевого энергопотребления, а также определение основных положений и приемов проектирования и разработка концептуального проекта жилого комплекса околонулевого энергопотребления. Для достижения поставленной цели в исследовании решаются следующие задачи: кратко рассмотреть историю развития энергоэффективных зданий и технологий; обобщить международный опыт по проектированию и строительству современных жилых комплексов околонулевого энергопотребления и выявить специфику их функционально-пространственной структуры; определить основные положения проектирования зданий околонулевого энергопотребления и разработать концептуальный проект. Объектом исследования являются жилые комплексы, имеющие энергоэффективные технические характеристики. Предметом исследования в данной статье стали объемно-пространственная организация жилых комплексов и их энергоэффективная технологическая база. Исследование ограничено задачами объемно-планировочной организации жилых комплексов с наиболее интересным набором энергоэффективных технологий. Современный опыт проектирования рассмотрен за последние 20 лет.

**Методика.** Основными методами исследования стали комплексный подход к анализу исследуемого материала и систематизация фактологического материала, теоретической составляющей и прикладных способов решения проблемы проектирования и строительства жилых домов околонулевого энергопотребления в современных условиях и экспериментальная разработка основных положений проектирования жилых зданий.

Несколько десятилетий человечество беспокоит губительное влияние на экологию процесса использования углеводородов, а также энергетический кризис. Данное исследование опирается на научные труды в следующих областях: рассмотрение объемно-планировочных приемов формирования энергоэффективных жилых зданий: Карпанина Е.Н., Валько А.А., Табунщиков

Ю.А., Саидов А.А., Черешнев И.В. и др.; комплексные вопросы использования нетрадиционных источников энергии в зданиях: Табунщиков Ю.А., Цихан Т.В., Соловьев М.М. и др.; исследование нормативной политики энергоэффективности жилых зданий: Цихан Т.В., Табунщиков Ю.А. Наумов А.Л. и др.

Внедрение в практику проектирования и строительства новых приемов проектирования жилых комплексов околонулевого энергопотребления приведет не только к повышению потребительских качеств объекта, но и к разработке решений с учетом экономии и регенерации энергии [14–16].

**Основная часть.** Экспериментальное направление в строительстве энергоэффективных зданий, которое в настоящее время развивается во многих странах мира, возникло благодаря идеи постройки «дома нулевого энергопотребления».

Первый энергоэффективный дом был построен в 1972 году в Манчестере (арх. Эндрю Исаак и Николас Исаак, США, штат Нью-Хэмпшир). Авторы изучали взаимосвязь объемно-планировочной структуры здания и теплопотерь. В результате дом спроектировали кубическим, а площадь окон в нем не превышала 10 % от площади поверхности стен. Чтобы минимизировать перегрев кровли, ее покрасили в светлые тона и установили на ней солнечные коллекторы. В Хельсинки в 1979 году для здания «ECONO-house» (арх. Хеймо Каутонена, Финляндия, ОтаниEMI) использовали компьютерное моделирование для выбора лучших энергосберегающих решений и расчета их параметров. Комплекс состоял из двух секций, которые были совершенно одинаковые, но только одна из них была оснащена всеми возможными на тот момент достижениями энергосберегающих технологий. В результате получили наглядные данные эффективного применения энергосберегающих решений. Позже в Хельсинки был возведен микрорайон площадью 1132 гектара Viikki. Сельский тип застройки, объекты оснащены системой утилизации тепла, автоматизированными системами жизнеобеспечения и многими другими новинками (на тот момент) энергосберегающих технологий. Также были возведены первые дома нулевого энергопотребления в Австрии (в Вайце) и Германии (объекты в Вуппертале и Ульме).

В итоге можно обобщить энергоэффективные инженерные решения, которые были применены в первых энергоэффективных домах: конструкция наружных стен - многослойная, окна прикрыты солнцезащитными козырьками, на плоской крыше здания солнечные коллекторы, в

системе вентиляции - рекуперация тепла, система искусственного освещения - автоматическая, утепленные резервуары для хранения охлажденной и нагреваемой солнечными коллекторами воды. Однако, недостаточный технический прогресс того времени не позволил построить здание околонулевого энергопотребления. Эти примеры были передовыми в свое время, но все же технологии, применяющиеся в этих зданиях, позволили сократить энергопотребление лишь на 50% по сравнению с обычными зданиями того времени.

Экспериментальные энергосберегающие дома также построены и в России, в них современные технологии применялись в сочетании с усиленной теплозащитой наружных конструкций. Это, например, поселок Киссолово в Ленинградской области, жилые здания «Солнцеград» в Москве и в Никулино-2 (1998-2002 гг.).

В современном мире все еще нет универсальной системы проектирования «околонулевого» здания, однако, показатели энергоэффективности зданий увеличиваются, КПД альтернативных источников энергии повышается, внедряются новейшие технологии. Архитекторы все так же не могут пренебрегать климатическими условиями, ландшафтом, ориентацией здания. Сейчас многие страны преуспевают в строительстве «околонулевых» зданий. Великобритания, Финляндия, США, Китай, Южная Корея работают над развитием энергоэффективных зданий. Современные технологии позволяют не ограничиваться малой и средней этажностью в проектировании таких домов [17, 18]. Рассмотрим современный международный опыт проектирования и строительства данных зданий.

В комплексе Beddington Zero Energy Development (BedZED) (Великобритания, Лондон, арх. Билл Данстер, 2002 г.) внедрены не только многослойные конструкции наружных стен, тройные стеклопакеты и системы рекуперации энергии, но также используется сбор дождевой воды для технических целей, сортировка и переработка мусора. Для поддержания концепции объекта, а именно, минимальный выброс CO<sub>2</sub>, использовались материалы, которые можно утилизировать в последствии. Жилой комплекс получается тепло и электричество от станции, которая сжигает отходы древесины, а горячую воду для отопления и водоснабжения – от солнечных коллекторов, они размещены на крыше площадью 777 м<sup>2</sup>.

Интересно овальное 12-этажное здание TYS Ikituuri Apartments (Финляндия, Турку, арх. бюро Sigge Arkkitehdit Oy, 2011г.), которое покрыто медными фасадными кассетами. Это придает зданию обтекаемый и необычный текстурный

вид, в результате создавая эффект паруса, что дает возможность использовать энергию ветра. Еще здание нагревается геотермально. Процесс двусторонний. Зимой тепло производится, а летом геотермальные скважины используются для охлаждения путем перекачки нагретых воздушных масс обратно в скважины.

Зеленая крыша Hangzhou Duolan Commercial Complex (Китай, Ханчжоу, арх. бюро BAU Brearley Architects + Urbanists, 2012 г.) предоставляет не только уникальное общественное открытое пространство, но также создает множество экологических преимуществ, например, защищает от перегрева и от чрезмерного теплового испарения, вода собирается с крыши и повторно используется для полива (рециркуляция), что дает предоставление возможностей для городского земледелия, поддержание флоры и фауны в городе.

Многоквартирный дом Hanover Olympic (США, Лос-Анджелес, арх. бюро TCA architects, 2016 г.) стал первым зданием по стандарту «энергия плюс» с использованием солнечной энергии. Здание потребляет нулевое количество энергии. На крыше установлены солнечные коллекторы (215 штук). Система вентиляции выполнена специальным образом, что позволяет максимально экономить энергию.

Как можно заметить, Россия все еще отстает в проектировании и строительстве энергоэффективных зданий по сравнению с некоторыми другими странами мира [19, 20]. Суровые климатические условия не позволяют строить большие комплексы околонулевого энергопотребления, а строительство меньших зданий не является выгодным для застройщиков.

Из сказанного выше видно, что уже эксплуатируются жилые здания и комплексы, построенные с использованием энергосберегающих технологий и с применением современных энергоэффективных материалов. Можно обобщить способы и выявить основные приемы, используемые для строительства жилых зданий околонулевого энергопотребления:

1. Компактное объемно-планировочное решение;
2. Высокоэффективная изоляция зданий;
3. «Интеллектуальные» отопительные установки и системы регулировки отопления;
4. С южной стороны здания – большие стеклянные поверхности;
5. Рекуперация тепла в системах вентиляции, с возможностью регулирования;
6. Использование в здании альтернативных источников энергии для обеспечения полной или частичной независимости от центральных систем снабжения энергией;

7. Использование «интеллектуальных» систем контроля потребления энергии.

Можно сделать вывод, что здания околонулевого энергопотребления – это пассивные здания с системами выработки альтернативной энергии для обеспечения собственных потребностей.

Обобщение объёмно-планировочных и функциональных требований позволило сформулировать основные положения проектирования зданий околонулевого энергопотребления.

1. Околонулевость. Энергоэффективность – это эффективное (рациональное) использование энергетических ресурсов. В данном случае энергоэффективность заключается в уменьшении потерь и использования энергии для жизни, за счет систем утепления, вентиляции, отопления и выработки энергии. Комплекс использованных систем позволяет сделать здание околонулевым.

2. Интеллектуальность. Использование новейших технологических тенденций при проектировании и строительстве.

3. Мобильность. Доступное строительство позволяет комфортно пользоваться функциями зданий и существовать в его среде для всех групп населения.

4. Многозадачность. Функциональность является ключевым принципом архитектурного проектирования, согласно которому любое архитектурное сооружение выполняет определенную функцию.

5. Экологичность. Минимизировать вредные выбросы в атмосферу при эксплуатации зданий.

6. Адаптивность. Обуславливается соответствием гигиеническим, антропометрическим и физиологическим параметрам пользователей. Соблюдение требований эргономичности обеспечивает комфортность и способствует сохранению здоровья, а также физической работоспособности жильцов и гостей комплекса.

7. Знаковость. Помимо своей основной функции, значение объекта строительства может быть воспринято более широко. Здание может стать ориентиром на карте города, основоположником новых эстетических ценностей, иметь культурные и социальные функции в пределах квартала, района, города.

8. Художественность. Один из немаловажных положений любого объекта застройки.

Важнейшим параметром энергоэффективного здания является его ориентация по сторонам света для обеспечения максимального солнечного освещения в жилых помещениях и уменьшения трат энергии на освещение и обогрев этих помещений. Так же для обеспечения большого количества солнечного света на прилегающих

территориях не должно быть затеняющих объектов или само здание должно иметь высоту выше окружающих. Соответственно, трудно построить околонулевое здание в высокоплотной городской застройке, так как оно не сможет эффективно использовать всю солнечную энергию. В исследовании определены типы формообразования околонулевого энергоэффективного здания и определены варианты обеспечения энергоэффективности:

- Здание «линия». При широтной ориентации здания и по возможности с глухими торцами, обращенными к наиболее ветровому направлению, можно обеспечить невысокий уровень теплопотерь. При использовании интеллектуальных систем отопления и обеспечения солнечной энергией, здание может стать с околонулевым энергопотреблением;

- Здание «куб». При наименьшей площади ограждающих конструкций, утеплении и ориентации по сторонам света здание может стать «пассивным», а при использовании современных систем выработки энергии из возобновляемых источников – околонулевым;

- Здание «периметр». Большая площадь обеспечивает возможность размещения большего объема солнечных батарей, что даст возможность зданию стать околонулевым;

- Здание «башня». Большая высота здания дает возможность использовать фасадные фотоэлектрические панели для обеспечения потребностей энергопотребления здания. Также могут быть использованы генераторы ветровой энергии;

- Здание «структура». Здание имеет сложную форму и переменную этажность, что приводит к увеличению площади ограждающих конструкций. Но привлечение современных технологий позволит сделать здание энергоэффективным.

Основные положения, которые были сформулированы в данном исследовании, выявленные приёмы с типами формообразования прошли апробацию на экспериментальном проекте многофункционального жилого комплекса околонулевого энергопотребления (рис. 1). Проектируемый объект расположен в п. Управленческий Красноглинского района города Самара в границах улиц Парижской Коммуны, Симферопольской и Солдатской. На прилегающей территории нет высотных зданий, обеспечивающих затенение комплекса, что позволяет с максимальной эффективностью использовать солнечную энергию при достаточной площади здания. Участок имеет большую площадь, что даст возможность обеспечить здание тепловой энергией от тепловых насосов в системе геотермальных свай и



электроэнергией от солнечных коллекторов. Для обеспечения пассивной энергией стоит расположить жилые помещения на юг, юго-запад и юго-восток. А уменьшение остекления и глухие фасады с северной стороны повысят теплотехнические параметры комплекса. Наружные ограждающие конструкции выполнены по схеме вентилируемого фасада с утеплением в светлых тонах, чтобы исключить перегрев. На южном фасаде используются подвижные элементы для затенения окон жилых блоков. На подвижных элементах установлены фотоэлектрические панели, вырабатывающие электроэнергию и обеспечивающие

подвижность конструкции. Также предполагается использование вентиляционных рекуператоров тепла и рекуператоров тепла сточных вод. Использование кинетических фасадов будет способствовать экономии природных ресурсов и даст возможность адаптироваться зданию к условиям окружающей среды. Сбор ливневых стоков для орошения озеленения на территории комплекса. Данная система позволит уменьшить потребление энергии из общей сети до околонулевых значений.

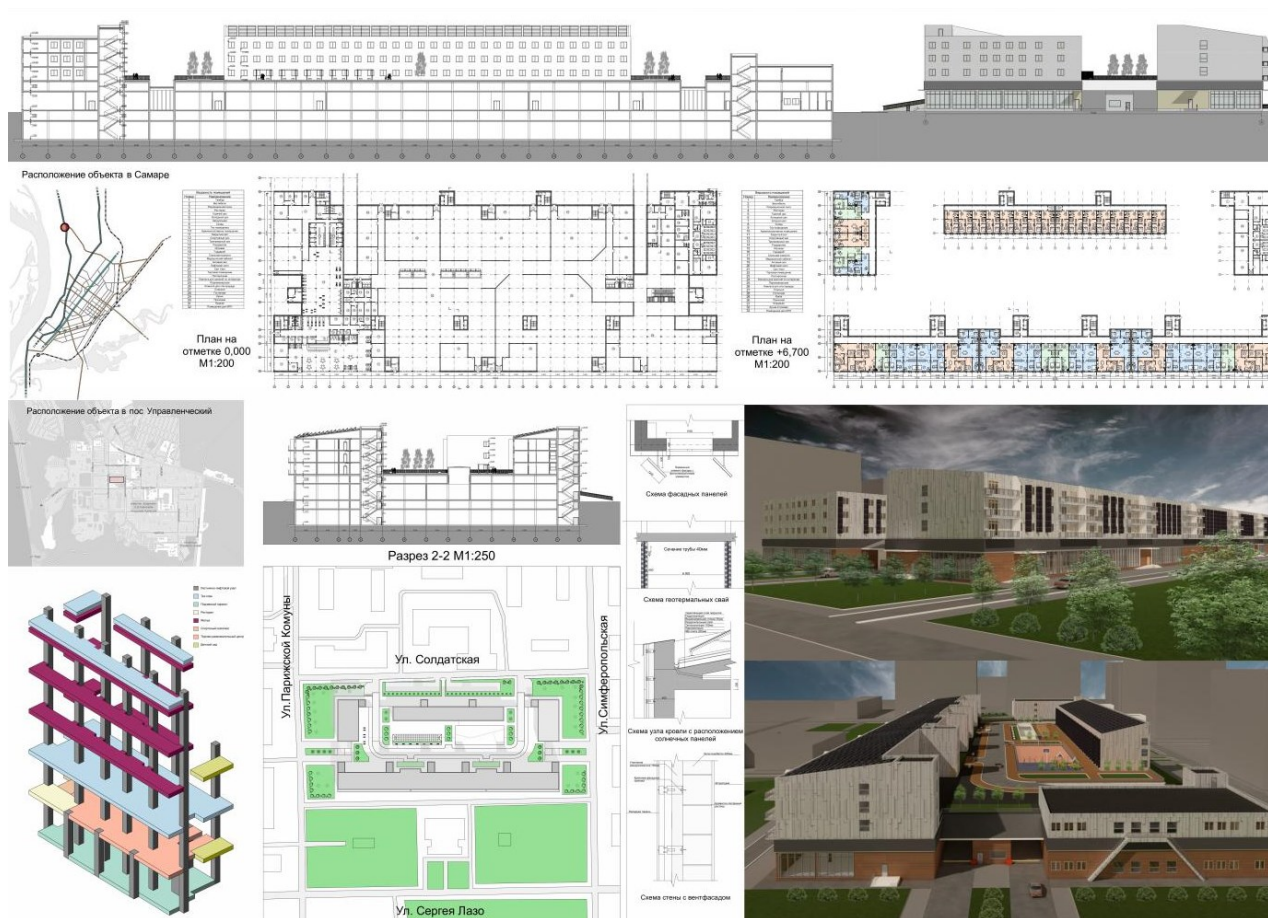


Рис. 1. Экспериментальный проект многофункционального жилого комплекса околонулевого энергопотребления в г. Самара, выполненный на кафедре АЖОЗ АСА СамГТУ, студент Зеленин Роман, преподаватели к.арх, доц. Жданова И.В., к.арх., доц. Кузнецова А.А.

Проведенное исследование может быть полезно в учебном процессе для студентов, которые приобретают квалификацию бакалавра по направлению 07.03.01 «Архитектура», либо применяться в экспериментальном проектировании.

**Выводы.** По итогу исследования можно сделать следующие выводы:

1. В ходе рассмотрения истории возникновения и развития энергоэффективных жилых домов были выявлены инженерные решения, которые были применены в первых энергоэффективных зданиях.

2. Анализ передового опыта проектирования и строительства энергоэффективных жилых домов позволил выявить основные приемы, используемые для строительства жилых зданий околонулевого энергопотребления: объемно-планировочное решение - компактное; изоляция зданий - высокоэффективная; отопительные установки - «интеллектуальные»; отопление с системой регулировки; с южной стороны здания - большие стеклянные поверхности; в системах вентиляции - рекуперация тепла, с воз-

возможностью регулирования; альтернативные источники энергии – для обеспечения полной или частичной независимости от центральных систем снабжения энергией; контроль потребления энергии – «интеллектуальные» системы.

3. Обобщив полученную информацию, удалось выявить основные положения проектирования зданий околонулевого энергопотребления – околонулевость; интеллектуальность; мобильность; многозадачность; экологичность; адаптивность; знаковость; художественность.

4. В исследовании определены типы формообразования околонулевого здания и определены варианты обеспечения энергоэффективности: здание «линия»; здание «куб»; здание «периметр»; здание «башня»; здание «структура».

5. Выявленные приемы и разработанные основные положения с типами формообразования прошли апробацию на экспериментальном проекте multifunctional жилого комплекса околонулевого энергопотребления в городе Самара.

Из сказанного выше видно, что здания околонулевого энергопотребления уже скоро смогут стать частью нашей жизни. Технический прогресс позволит перейти к более эффективным и экологичным инженерным решениям.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жуковский С.В., Сурков А.А. Аспекты устойчивого развития высокотехнологичной городской среды // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2017. № 1 (25). С. 80–92. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.01.07
2. Сухинина Е.А. Особенности становления экологического подхода в архитектурно-градостроительном проектировании // Приволжский научный журнал. 2022. № 2 (62). С. 159–169.
3. Ахмедова Е.А., Филлалли А. «Зеленое» градостроительство в современных городах // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и градостроительство. 2021. С. 392–404.
4. Кузнецова А.А., Жданова И.В. Архитектура 20 века как строитель общества // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Социальные, гуманитарные, медико-биологические науки. 2020. Т. 22. № 72. С. 72–77. DOI: 10.37313/2413-9645-2020-22-72-71-75
5. Zhogoleva A., Teryagova A. On methods of sustainable architectural design of bio-positive buildings in the low-rise residential development structure // MATEC Web of Conferences 2017. С. 01039. DOI: 10.1051/mateconf/201710601039
6. Вавилова Т.Я., Каясова Д.С. Архитектурно-типологические приоритеты устойчивого развития урбанизированной среды // Градостроительство и архитектура. 2017. Т. 7. № 3 (28). С. 106–112. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.03.18
7. Громилина Э.А., Самогоров В.А. Элементы архитектурно-планировочной структуры как факторы устойчивого развития города // Градостроительство и архитектура. 2021. Т. 11. № 2 (43). С. 101–110. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.02.15
8. Астафьева Н.С., Лагута И.В., Кукарина Е.Е., Емельянова Я.О. Тенденции "зелёного" строительства в мире и современной России // Градостроительство и архитектура. 2019. Т. 9. № 4 (37). С. 109–117. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.16
9. Баттаев Ш.А.А., Джанкулаев А.А. Пассивные и энергоэффективные дома // Вопросы науки и образования. 2018. № 29 (41). С. 127–128.
10. Банникова А.О., Калинин Н.А. Пассивное использование геотермальной энергии в индивидуальных жилых домах // Градостроительство и архитектура. 2017. Т. 7. № 3 (28). С. 102–105. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.03.17
11. Мизюряев С.А., Жигулина А.Ю. О потребности создания эффективного теплоизоляционного материала для жилищного строительства на основе пеностеклянной композиции // Градостроительство и архитектура. 2016. № 2 (23). С. 10–13. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.02.2
12. Мейрембаев А.С. Энергоэффективное проектирование зданий в контексте жизненного цикла здания // Наука и образование сегодня. 2020. № 6-1 (53). С. 92–93.
13. Zhigulina A.Y., Ponomarenko A.M. Problems of energy efficiency of residential buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". 2020. С. 032020. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032020
14. Generalov V.P., Generalova E.M. Potential of buildings creating high-quality urban environment // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. "International Science and Technology Conference "Earth Science", ISTC EarthScience 2022 - Chapter 3." 2022. 042086. DOI: 10.1088/1755-1315/988/4/042086
15. Генералов В.П., Генералова Е.М. Образ жизни, архитектура и качество городской среды // Градостроительство и архитектура. 2021. Т. 11. № 1 (42). С. 160–168. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.01.20
16. Vavilova T.Ya. Comfort of affordable housing in Russia. Analysis of current approaches in architectural theory // IOP Conference Series: Mate-

rials Science and Engineering The conference proceedings ICCATS-2019. 2019. С. 055005. DOI: 10.1088/1757-899X/687/5/055005

17. Potienko N., Kuznetsova A. Green energy technologies of tall buildings for air pollution abatement in metropolises // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Т. 982. С. 105–115. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8\_11

18. Zhigulina A.Yu., Ponomarenko A.M. Energy efficiency of high-rise buildings // *E3S Web of Conferences*. 2018. С. 02003. DOI: 10.1051/e3sconf/20183302003

19. Vavilova T.Y.A., Zhdanova I.V. Regional specific features of modern residential compounds. Affordable housing in the city of Samara, Russia // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 012137. DOI: 10.1088/1757-899X/451/1/012137

Низамиева Э.Р. Подготовка российских специалистов к применению «зеленых» стандартов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2021 №8 С. 77–85. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-8-77-85

#### Информация об авторах

**Жданова Ирина Викторовна**, кандидат архитектуры, доцент кафедры Архитектуры жилых и общественных зданий. E-mail: zdanovairina@mail.ru. Самарский государственный технический университет. Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244.

**Кузнецова Анна Андреевна**, кандидат архитектуры, доцент кафедры Архитектуры жилых и общественных зданий. E-mail: amore\_86@mail.ru. Самарский государственный технический университет. Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244.

Поступила 04.11.2022 г.

© Жданова И.В., Кузнецова А.А., 2023

*\*Zhdanova I.V., Kuznetsova A.A.*

*Samara State Technical University*

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

## FEATURES OF DESIGNING RESIDENTIAL BUILDINGS WITH NEARLY ZERO ENERGY CONSUMPTION

**Abstract.** In this study, the authors draw attention to the world issue of implementing measures to reduce the energy consumption of residential buildings. The statements of the international commission on the importance to reduce the need for a share of non-renewable carbonaceous energy sources are given. Examples of experimental design experience show the active development of this subject in many countries. This helps to identify the main techniques used for the construction of energy-efficient residential buildings - a compact planning solution, highly efficient building insulation, "intelligent" engineering systems, heat recovery, the use of alternative energy sources and more. The study defines buildings with nearly zero energy consumption - these are passive buildings with alternative energy generation systems to meet their own needs. The main provisions of the design of buildings of near-zero energy consumption are revealed: nearly zero, intellectual, mobility, multitasking, environmental friendliness, adaptability, symbolism, artistry. The study identifies the types of formation of a nearly zero energy-efficient building and options for ensuring energy efficiency - this is the building "line", the building "cube", the building "perimeter", the building "tower", the building "structure". The identified techniques and the developed basic provisions with the types of shaping are tested on a pilot project of a multifunctional residential complex of nearly zero energy consumption in the city of Samara. As a result, authors conclude that technical progress will allow buildings with nearly zero energy consumption to come to the practice of design, due to intelligent and efficient engineering solutions.

**Keywords:** energy efficiency, energy saving, renewable energy sources, nearly zero energy consumption, space-planning solutions, design techniques, types of shaping.

#### REFERENCES

1. Zhukovsky S.V., Surkov A.A. Aspects of Sustainable Development of high-tech urban environment [Aspekty ustojchivogo razvitiya vysokotekhnologichnoj gorodskoj sredy] Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Applied

ecology. Urban studies. 2017. No. 1 (25). Pp. 80–92. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.01.07 (rus)

2. Sukhinina E.A. Features of the formation of an ecological approach in architectural and urban planning [Osobennosti stanovleniya ekologicheskogo podhoda v arhitekturno-gradostroitel'nom proektirovanii] Privolzhsky scientific journal. 2022. No. 2 (62). Pp. 159–169. (rus)

3. Akhmedova E.A., Villali A. «Green» urban planning in modern cities [«Zelenoe» gradostroitel'stvo v sovremennyh gorodah] Traditions and innovations in construction and architecture. Architecture and urban planning. 2021. Pp. 392–404. (rus)
4. Kuznetsova A.A., Zhdanova I.V. Architecture of the 20th century as a builder of society [Arhitektura 20 veka kak stroitel' obshchestva] Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentr Rossiiskoi akademii nauk. Social, humanitarian, medical and biological sciences. 2020. Vol. 22. No. 72. Pp. 72–77. DOI: 10.37313/2413-9645-2020-22-72-71-75 (rus)
5. Zhogoleva A., Teryagova A. On methods of sustainable architectural design of bio-positive buildings in the low-rise residential development structure. MATEC Web of Conferences 2017. 01039. DOI: 10.1051/mateconf/201710601039
6. Vavilova T.Ya., Kayasova D.S. Architectural and typological priorities of sustainable development of the urbanized environment [Arhitekturno-tipologicheskie priority ustojchivogo razvitiya urbanizirovannoy sredy] Urban Planning and Architecture. 2017. Vol. 7. No. 3 (28). Pp. 106–112. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.03.18 (rus)
7. Gromilina E.A., Samogorov V.A. Elements of the architectural and planning structure as factors of sustainable development of the city [Elementy arhitekturno-planirovochnoy struktury kak faktory ustojchivogo razvitiya goroda] Urban Planning and Architecture. 2021. Vol. 11. No. 2 (43). Pp. 101–110. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.02.15 (rus)
8. Astafeva N.S., Laguta I.V., Kukarina E.E., Emelyanova Ya.O. Tendencies of "green" construction in the world and modern Russia [Tendencii "zelenogo" stroitel'stva v mire i sovremennoj Rossii] Urban Planning and Architecture. 2019. Vol. 9. No. 4 (37). Pp. 109–117. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.16 (rus)
9. Battaev Sh.A.A., Dzhankulaev A.A. Passive and energy-efficient houses [Passivnye i energoэффективnye doma] Voprosy nauki i obrazovanie. 2018. No. 29 (41). Pp. 127–128. (rus)
10. Bannikova A.O., Kalinkina N.A. Passive use of geothermal energy in individual residential buildings [Passivnoe ispol'zovanie geotermal'noj energii v individual'nyh zhilyh domah] Urban Planning and Architecture. 2017. Vol. 7. No. 3 (28). Pp. 102–105. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.03.17 (rus)
11. Mizyuryaev S.A., Zhigulina A.Yu. On the need to create an effective thermal insulation material for housing construction on the basis of foam-glass composition [O potrebnosti sozdaniya effektivnogo teploizolyacionnogo materiala dlya zhilishchnogo stroitel'stva na osnove penostekol'noj kompozicii] Urban Planning and Architecture. 2016. No. 2 (23). Pp. 10–13. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.02.2 (rus)
12. Meirembayev A.S. Energy-efficient design of buildings in the context of the life cycle of buildings [Energoeffektivnoe proektirovanie zdaniy v kontekste zhiznennogo cikla zdaniya] Science and education today. 2020. No. 6-1 (53). Pp. 92–93. (rus)
13. Zhigulina A.Y., Ponomarenko A.M. Problems of energy efficiency of residential buildings. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". 2020. 032020. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032020
14. Generalov V.P., Generalova E.M. Potential of buildings creating high-quality urban environment. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. "International Science and Technology Conference "Earth Science", ISTC EarthScience 2022 - Chapter 3." 2022. 042086. DOI: 10.1088/1755-1315/988/4/042086
15. Generalov V.P., Generalova E.M. Way of life, architecture and quality of the urban environment [Obraz zhizni, arhitektura i kachestvo gorodskoy sredy] Urban planning and architecture. 2021. Vol. 11. No. 1 (42). Pp. 160–168. (rus) DOI: 10.17673/Vestnik.2021.01.20
16. Vavilova T.Ya. Comfort of affordable housing in Russia. Analysis of current approaches in architectural theory. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering The conference proceedings ICCATS-2019. 2019. 055005. DOI: 10.1088/1757-899X/687/5/055005
17. Potienko N., Kuznetsova A. Green energy technologies of tall buildings for air pollution abatement in metropolises. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. Pp. 105–115. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8\_11
18. Zhigulina A.Yu., Ponomarenko A.M. Energy efficiency of high-rise buildings. E3S Web of Conferences. 2018. 02003. DOI: 10.1051/e3sconf/20183302003
19. Vavilova T.Ya., Zhdanova I.V. Regional specific features of modern residential compounds. Affordable housing in the city of Samara, Russia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 012137. DOI: 10.1088/1757-899X/451/1/012137
20. Nizamieva E.R. Preparation of Russian specialists for the application of "green" standards [Podgotovka rossijskih specialistov k primeneniyu «zelenyh» standartov] Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 8. Pp. 77–85. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-8-77-85 (rus)

*Information about the author*

**Zhdanova, Irina V.** PhD, Assistant professor. E-mail: zdanovairina@mail.ru. Samara State Technical University. Russia, 443100, Samara, str. Molodogvardeiskaya, 244.

**Kuznetsova, Anna A.** PhD, Assistant professor. E-mail: zdanovairina@mail.ru. Samara State Technical University. Russia, 443100, Samara, str. Molodogvardeiskaya, 244.

---

*Received 04.11.2022*

**Для цитирования:**

Жданова И.В., Кузнецова А.А. Особенности проектирования жилых зданий околонулевого энергопотребления // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 2. С. 85–93. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-85-93

**For citation:**

Zhdanova I.V., Kuznetsova A.A. Features of designing residential buildings with nearly zero energy consumption. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 2. Pp. 85–93. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-85-93

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-94-101

*\*Коленчуков О.А., Петровский Э.А.**Сибирский федеральный университет**\*E-mail: okolenchukov@sfu-kras.ru*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМОКОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИНТЕНСИФИКАТОРОВ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

**Аннотация.** Развитие научно-технического прогресса последних десятилетий привело к увеличению потребления природных энергоносителей, что, в свою очередь, сказывается на месторождениях полезных ископаемых – они истощаются. С целью снижения потребления энергоресурсов актуальным является вопрос энергосбережения. Одним из способов решения данной задачи является проведение исследований в области повышения эффективности энерготехнологического оборудования с последующей разработкой универсальной технологии и оборудования интенсификации теплообменных процессов. В данной статье представлены наиболее применяемые в настоящее время способы интенсификации теплообменных процессов, их преимущества и недостатки, определен наиболее перспективный способ. Описана технология формирования термоконтантной (дискретно-шероховатой) поверхности на металлическом листе, определены выражения для определения усилия, необходимого для изготовления данной поверхности при различных условиях. Представлена методика экспериментальных исследований и инструмент для изготовления термоконтантной поверхности. В результате экспериментальных исследований установлено, что в зависимости от условий формирования термоконтантной поверхности аналитическое решение отличается от экспериментальных значений на 5,3–13,4 %. Другим важным фактором, влияющим на формообразование, является скорость подачи металлического листа, оптимальное значение которого составляет 1000–2000 мм/мин.

**Ключевые слова:** энергосберегающие технологии, термоконтантная поверхность, интенсификация теплообмена, энерготехнологическое оборудование, повышение эффективности.

**Введение.** Последнее время современное общество ведет огромную добычу и использование невозобновляемых ресурсов, что ведет к глобальному кризису мировых запасов топлива и значительному ухудшению экологической обстановки. В связи с сложившейся ситуацией мировому сообществу необходимо уделить особое внимание разработкам и исследованиям в области энергосбережения. Так, правительством РФ был принят Федеральный закон от 21.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности» во исполнение которого необходима разработка программ, нацеленных на повышение энергетической эффективности и энергосбережения [1]. Разрабатываемые программы затрагивают все сферы народного хозяйства. Особое внимание уделяется предприятиям топливно-энергетического комплекса, а именно нефтехимического, который является одним из наиболее энергоемких.

Энергосбережение представляет собой совокупность мер, целью которых является повышение эффективности использования энергии и сырья на предприятии для производства как того же ассортимента продукции, так и нового [2]. Только полный анализ промышленного энергопотребления, степени полезного использования

энергии и ее потерь на том или ином технологическом участке, определение наиболее эффективных способов снижения энергоресурсов для конкретного предприятия может привести к достижению положительных результатов в данном вопросе [3].

В настоящее время одним из способов повышения экономичности энерготехнологических установок является модернизация теплообменного оборудования за счет внедрения эффективных методов интенсификации теплообмена. Интенсификация теплообмена характеризуется увеличением количества тепла, передаваемым через единицу теплообменной поверхности, а также уменьшением массогабаритных показателей теплообменного аппарата. От технического качества интенсифицированного теплообменника на прямую зависят характеристики энерготехнологических установок.

Существует множество способов интенсификации теплообмена. Классифицируют их, как правило, на две категории [4–6]:

1. Активные методы подразумевают под собой механическое воздействие на поверхность теплообмена (вращение, вибрации поверхности, перемешивание среды); использование разного вида поля, таких как электрическое, магнитное или акустическое, с целью воздействия на поток



пульсациями давления; вдув или отсасывание рабочей среды через пористую поверхность.

2. Пассивные методы представляют собой воздействие типа теплообменной поверхности на поток (винтовые, локальные, пластинчатые интенсификаторы, оребрение и и др.).

Наиболее сложными в реализации являются активные методы интенсификации. Также их применение ограничено на практике из-за особенностей конкретного технологического процесса или конструкции производственного оборудования. Несмотря на это, данные методы имеют большой потенциал и активно изучаются многими исследователями [7–11].

Конвективный теплообмен интенсифицируют, как правило, с помощью пассивных методов интенсификации, которые, в свою очередь, можно разделить на две группы:

1. Методы, придающие жидкостному потоку вращательно-поступательные движения с помощью ленточных, шнековых и пластинчатых завихрителей.

2. Методы, разрушающие пристенные слои жидкости за счет искусственной шероховатости в виде различного типа накаток на внутренней стенке труб, проволочных спиралей и др.

Пассивные методы интенсификации теплообмена широко используются в нефтехимической промышленности. Очевидно, что выбор конкретного варианта осуществления способа интенсификации будет зависеть от решаемой задачи, особенностей оборудования, его расположения на площадке и взаимосвязи с другими элементами химической установки.

В работе [12] проведено сравнение энергетической эффективности различных методов интенсификации теплообмена. По результатам исследований ясно, что самыми эффективными методами интенсификации являются методы, которые основаны на использовании дискретно-шероховатых поверхностей (термоконтактных поверхностей). В связи с этим создание универсальных технологий для изготовления теплообменных устройств-интенсификаторов является актуальной практической задачей.

Целью данной статьи является исследование этапа формирования термоконтактных поверхностей комбинированных теплообменных элементов с помощью разработанного технологического инструмента.

**Описание технологии формирования термоконтактной поверхности.** Известна технология изготовления комбинированного теплообменного элемента [13], одним из этапов которого является формирования термоконтактной по-

верхности на листовом материале, осуществляемое за счет поверхностно-пластического деформирования листового материала.

Формирование термоконтактной поверхности осуществляется с помощью профильного инструмента, представленного на рисунке 1. В упрощенном виде данный инструмент состоит из секционного барабана 1, установленного на валу, профильных плашек 2, расположенных внутри секций барабана 1, П-образной державки с перекладиной 3 и вала, расположенного в перекладине П-образной державки 4, служащего для передачи силового воздействия на профильный инструмент. Принцип работы данного профильного инструмента заключается в следующем (рисунок 1). Силовое воздействие через вал 4 равномерно передается на вал, на котором расположен секционный барабан 1, который, в свою очередь, передает силовое воздействие на профильные плашки 2, в результате чего осуществляется внедрение профильных плашек 2 в листовый металл 5. Металлический лист при этом расположен на упругом основании 6, которое, в свою очередь, расположено в лотке 7, расположенный на столе станка. Вместе с силовым воздействием на профильный инструмент также происходит движение стола с лотком 7 с упругим основанием 6 и металлическим листом 5, ввиду чего происходит формирование термоконтактной поверхности.

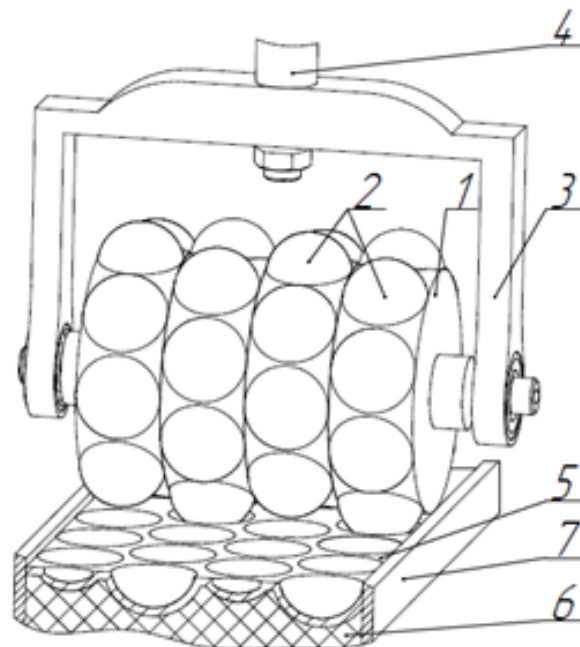


Рис. 1. Инструмент для образования термоконтактной поверхности

С целью определения силового воздействия, необходимого для формообразования термоконтактной поверхности, рассмотрим металлический лист под действием одиночной профильной плашки с полусферическим выступом (рисунок

2). Контакт полусферического выступа с металлическим листом происходит с образованием плоско – напряженного состояния.

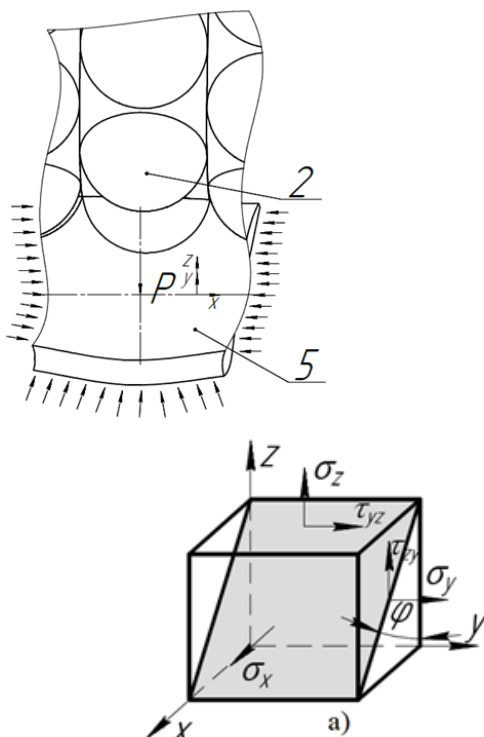


Рис. 3. Материальная частица под действием сил: а – расположение наклонной площадки на частице в виде параллелепипеда, б – разрез материальной частицы

Принимая во внимание совпадение вектора напряжения  $S$  с направлением нормали  $N$  на наклонной площадке (рисунок 3, а), можно сделать вывод, что возникающее касательное напряжение примет значение, равное 0. Вместе с тем направление нормали станет главным направлением, а напряжение  $S$  станет равным  $\sigma_n$  [14]. Исходя из всего выше сказанного, можно найти главные нормальные напряжения ( $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ ) и среднее напряжение:

$$\begin{cases} \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + 4\tau_{xz}^2}, \\ \sigma_{cp} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{3}. \end{cases} \quad (2)$$

Учитывая условие неразрывности, равенство  $\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ , а также взаимосвязь между деформациями и напряжениями ( $\varepsilon_y = 0$ ) получим следующее выражение:

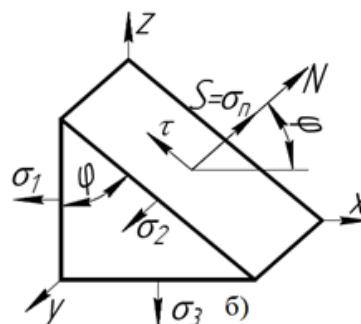
$$\sigma_y = \sigma_{cp} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \text{const.} \quad (3)$$

Находя решение данного выражения через  $\sigma_y$  имеем следующее:

Рис. 2. Образование плоско–напряженного состояния при воздействии единичного профильного инструмента

Рассматривая материальную частицу тела с напряжениями, представленными на рисунке 3, а-б. При  $\sigma_y = 0$  и  $\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0$  ось  $y$  главной, на основании этого получаем следующие выражения в главных нормальном и касательном напряжениях:

$$\begin{cases} \sigma_n = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} + \cos 2\varphi \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2}, \\ \tau = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\varphi. \end{cases} \quad (1)$$



$$\sigma_y = \frac{(\sigma_x + \sigma_z)}{2}. \quad (4)$$

Следовательно, при равенстве нулю деформации по той или иной оси напряжение вдоль выбранной оси будет равно полусумме двух других возникающих напряжений. В этом случае ось  $y$  будет являться главной, а касательные напряжения  $\tau_{xy}$  и  $\tau_{yz}$  равны 0 [14].

Ввиду того, что напряженное состояние в различных точках тела не зависит от координаты  $y$ , наклонную площадку тетраэдра можно заменить площадкой параллельной оси  $y$ . Вследствие этого процесс формирования термоконтактной поверхности можно рассматривать как «плоскую» задачу, что значительно упрощает расчёты.

При этом главное нормальное напряжение  $\sigma_2$  можно определить следующим образом:

$$\sigma_2 = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2}. \quad (5)$$

Определить усилие, необходимое для формирования термоконтактной поверхности, можно с помощью следующего выражения:

$$P = \sigma_B F k_{cm}, \quad (6)$$

где  $\sigma_B$  – предел прочности листового металла, МПа;  $F$  – площадь, образуемая при контакте формообразующего инструмента с листовым материалом, мм<sup>2</sup>;  $k_{см}$  – понижающий коэффициент, учитывающий наличие смазочного материала, безразмерная величина.

Для расчет минимально усилия формообразования, а также прогиба части металлического

$$\Delta\Delta\omega = \left( \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2}{d\theta^2} \right) \left( \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2}{d\theta^2} \right) \omega = \frac{q}{D}, \quad (7)$$

где  $\omega$  – прогиб пластины, мм;  $\theta, r$  – полярные координаты участка пластины;  $q$  – действующая поперечная нагрузка, Н/мм<sup>2</sup>;  $D$  – цилиндрическая жесткость.

Решая уравнение (7) при условии действия сосредоточенной силы  $P$ , получим:

$$\omega = \frac{Pa^2}{16\pi D} (1 - \beta^2)^2, \quad (8)$$

где  $P$  – сосредоточенная сила, Н;  $\beta = b/a$  отношение, учитывающее расстояние  $b$  от центра участка формообразования до точки приложения сосредоточенной силы и расстояние  $a$  от центра пластины до опорных краев (рисунок 4).

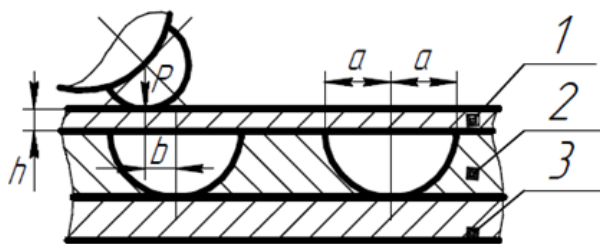


Рис. 4. Оснастка для образования термоконтактной поверхности с параметрами, определяющими силовое воздействие:  
1 – металлический лист, 2 – матрица, 3 – опорный стол

Выражение (6) целесообразно использовать для определения усилия образования термоконтактной поверхности при контролируемом формообразовании, т.е. когда пространство за выступом листа ограничено какой-либо опорой. В случае отсутствия опоры постоянно возникающее усилие приведет к разрушению материала листа. С помощью выражения (8) возможно определить минимальное усилие при неконтролируемом образовании термоконтактной поверхности, т.е. выдавливание в неограниченное пространство.

**Экспериментальный стенд и методика экспериментальных исследований.** Целью экспериментальных исследований являлось определение усилия, необходимого для образования термоконтактной поверхности, и проверка полученных значений с представленными ранее математическими выражениями.

листа можно предположить, что возникает несимметричный изгиб ввиду того, что профильная плашка в различный момент времени изменяет свое положение при формообразовании, т.е. имеет место динамический процесс. Уравнение равновесия элемента листа при несимметричном изгибе примет следующий вид [15]:

Для достижения поставленной цели был разработан экспериментальный инструмент, натурное исполнение которого представлено на рисунке 5. Разработанный инструмент состоит из металлической трубки 1, расположенными друг за другом радиально-упорные подшипники качения 2, поверх которых расположены кольца 3. На кольцах 3 равномерно по окружности распределены формообразующие вставки 4 в виде полушфер, которые в основании равны 10 мм. Экспериментальный инструмент имеет также стопорные кольца 5, рамку 6 и пластину 7, через которую осуществляется передача усилия для формообразования.

В качестве металлического листа, на котором будет происходить образование термоконтактной поверхности, использовался жести марки ЖКТ толщиной 0,36 мм. Предел прочности, согласно ГОСТ Р 52204–2004 составляет  $(375 \pm 40)$  МПа, модуль упругости равен  $203 \cdot 10^3$  МПа, коэффициент Пуассона – 0,29.

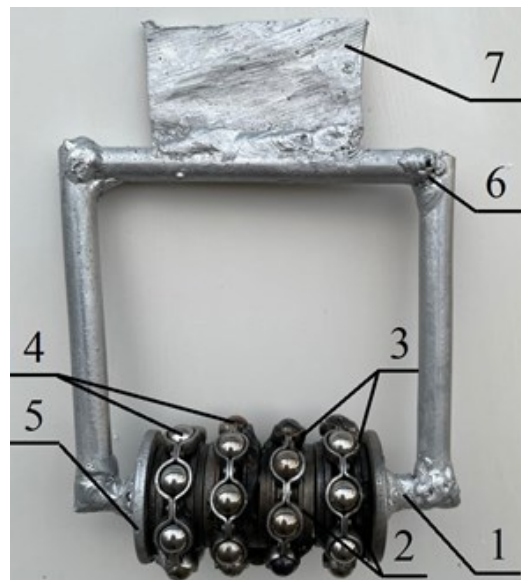


Рис. 5. Формообразующий инструмент

В процессе образования термоконтактной поверхности металлический лист 1 располагался на матрице (плите) 2, которая, в свою очередь, была расположена на опорном столе 3 (рисунок

4). Опорный стол 3 при этом выполнен с возможность закрепления его на станке (например, продольно-строгальном) для возможности его передвижения в процессе формообразования.

**Результаты экспериментальных исследований.** Экспериментальные и рассчитанные по уравнению (6) данные усилия формообразования представлены на рисунке 6. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что значения показателя  $P$ , полученные в ходе эксперимента, отличаются от аналитического решения

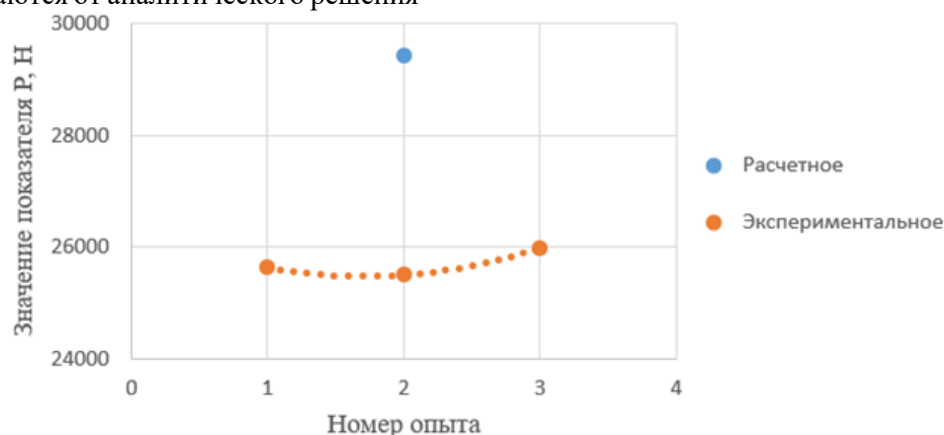


Рис. 6. Результаты экспериментальных исследований по формированию термоконтактной поверхности, расчет усилия по формуле (6)

Как отмечалось ранее, для определения минимального усилия формообразования можно использовать выражение прогиба части металлического листа (8). Для проверки сходимости экспериментальных данных с аналитическим решением производилось плавное увеличение значения показателя  $P$ , начиная с 250Н и заканчивая 750Н с шагом 250Н. В результате экспериментальных исследований (рисунок 7) установлено, что фактический прогиб пластины отличается от

на 12,9–13,4% в меньшую сторону. Ввиду этого можно говорить об гарантированном формообразовании при определении усилия формообразования по уравнению (6). Но не стоит забывать об контроле за высотой образуемых выступов, так как бесконтрольное формообразование может привести к деформации материала. Значения показателя  $P$  определялись исходя из воздействия единичной формообразующей вставки на металлический лист.

аналитического решения в зависимости от условия на 5,3–7,9% в большую сторону. Контроль за высотой выступов в данном случае не требуется, так как при достижении требуемого усилия не происходит дальнейшего увеличения высоты выступов. При этом показатель  $b$  принимался равным 0 и  $a/2$ ,  $a=15$  мм. Как и в предыдущем случае, значения показателя  $P$  определялись исходя из воздействия единичной формообразующей вставки на металлический лист.

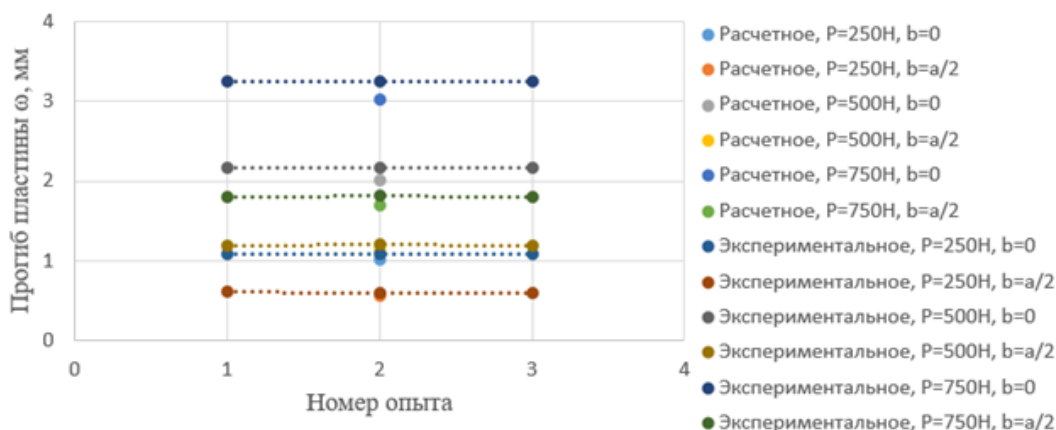


Рис. 7. Результаты экспериментальных исследований по формированию термоконтактной поверхности, расчет усилия по формуле (8)

Особое внимание стоит уделить скорости подачи стола при формообразовании. Увеличение скорости подачи приводит к отклонению

формы термоконтактной поверхности ее элементов от формообразующих вставок. При скоростях подачи стола 3000 мм/мин и выше наблюда-



ются раскатывания при внедрении на входе и выходе формообразующего инструмента в матрицу (рисунок 8). Ввиду этого оптимальные значения скоростей лежат в диапазоне 1000–2000 мм/мин.



Рис. 8. Часть листа после образования термоконтактной поверхности, подача 3000 мм/мин

### Выводы

1. Машиностроительная промышленность на современном этапе развития характеризуется тенденцией, направленной на повышение эффективности работы энерготехнологического оборудования. Актуальным способом повышения эффективности является использование устройств интенсификации тепломасообменных процессов. Наиболее востребованными на данный момент являются пассивные методы интенсификации, так как активные методы являются наиболее сложными в реализации в виду особенности самих методов и особенностей технологических процессов и оборудования. Ввиду этого разработка эффективных устройств интенсификации тепломасообменных процессов и технологий их изготовления является актуальной задачей.

2. В качестве решения задачи повышения эффективности энерготехнологического оборудования предложены способ изготовления термоконтактной поверхности и конструкция для его осуществления. Сущность заявленного способа заключается в плоском параллельном деформировании листового материала путем внедрения профильных вставок, установленных в секционном барабане формообразующего инструмента.

3. При рассмотрении процесса изготовления термоконтактной поверхности были установлены выражения для определения силового воздействия, необходимого для формообразования. Вместе с этим было предложено использовать выражения для определения усилия при контролируемом формообразовании (ограниченное пространство) и при неконтролируемом формообразовании (неограниченное пространство) соответственно.

4. Результаты экспериментальных исследований при контролируемом формообразовании показывают, что экспериментальные данные отличаются от аналитического решения на 12,9–13,4 %. В случае использования выражения для неконтролируемого формообразования данное различие составляет 5,3–7,9 %. Помимо этого, также установлено, что качество образуемой термоконтактной поверхности зависит от величины подачи стола, на котором расположен металлический лист. Так, наименьшее отклонение формы термоконтактной поверхности от формы формообразующих вставок наблюдается при скоростях подачи 1000–2000 мм/мин.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности: Федеральный закон от 21 ноября 2009 г. № 261-ФЗ.
2. Тимонина В.И. Энергосбережение и энергоэффективность как показатели достижения энергобезопасности в стране // Теоретическая экономика. 2022. № 1. С. 111–119.
3. Rakhmonov I.U., Ushakov V.Ya., Niyozov N.N., Kurbonov N.N., Mamutov M. Energy saving in industry // Energy Systems Research. 2021. Vol. 289. No. 07014. Pp. 1–4. DOI: 10.1051/e3sconf/202128907014
4. Пушнов А.С., Соколов А.С., Бутрин М.М. Методы интенсификации процесса тепло и массообмена в колонных аппаратах с контактными устройствами // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2013. № 1-4. С. 237–242.
5. Khurmamatov A., Rakhimov G., Murtazayev F. Intensifications of heat exchange processes in pipe heat exchangers // Conference: 2021 Asia-Pacific conference on applied mathematics and statistics. 2022. Vol. 2432. No. 1. Pp. 1–5. DOI: 10.1063/5.0096336
6. Горшенин А.С. Методы интенсификации теплообмена: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самарского государственного технического университета, 2009. 82 с.
7. Artemyev D., Zaitsev A. Analysis of increase in efficiency of air-cooled heat exchangers due to intensification of heat exchange // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. Vol. 866. No. 012020. Pp. 1–6. DOI:10.1088/1755-1315/866/1/012020
8. Misbakhov R. S, Gureev V. M, Moskalenko N. I, Ermakov A. M, Bagautdinov I. Z. Simulation of Surface Intensification of Heat Exchange in Shell-and-Pipe and Heat Exchanging Devices // Biosci Biotech Res Asia. 2015. Vol. 12. No. 2. Pp. 517–525.
9. Белозерцев В.Н., Бирюк В.В., Довгялло А.И., Некрасова С.О., Угланов Д.А., Сармин Д.В. Интенсификация теплообмена: учеб. пособие.

Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. 208 с.

10. Egorov M.Yu. Methods of Heat-Exchange Intensification in NPP Equipment // Atomic Energy. 2018. No. 124. Pp. 403–407.

11. Rulik S., Wróblewski W. A Numerical Study of The Heat Transfer Intensification Using High Amplitude Acoustic Waves // Archives of Acoustics. 2018. Vol. 43. No. 1. Pp. 31–47.

12. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. Л.: Энергия, 1980. 144 с.

13. Пат. RU 2759309, Российская Федерация, МПК F28F 1/40 (2006.01). Теплообменный элемент, способ его изготовления и устройство для его осуществления / О.А. Коленчуков, Э.А. Петровский; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО СФУ. № 2021105124; заявл. 25.02.2021; опубл. 11.11.2021, Бюл. № 32. 16 с.

14. Реут Л.Е. Теория напряженного и деформированного состояния с примерами и задачами: учебно-методическое пособие. Минск: БНТУ, 2008. 107 с.

15. Вайнберг Д.В., Вайнберг Е.Д. Расчет пластин. Киев: Будивельник, 1970. 436 с.

#### Информация об авторах

**Коленчуков Олег Александрович**, ассистент кафедры технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса, института нефти и газа. E-mail: okolenchukov@sfu-kras.ru. Сибирский федеральный университет. Россия, 660041, Красноярск, Свободный пр., 82А.

**Петровский Эдуард Аркадьевич**, доктор технических наук, профессор кафедры технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса, института нефти и газа. E-mail: petrovsky\_quality@mail.ru. Сибирский федеральный университет. Россия, 660041, Красноярск, Свободный пр., 82А.

Поступила 27.09.2022 г.

© Коленчуков О.А., Петровский Э.А., 2023

**\*Kolenchukov O.A., Petrovsky E.A.**

*Siberian Federal University*

*\*E-mail: okolenchukov@sfu-kras.ru*

## STUDY OF THE TECHNOLOGY FOR FORMATION OF THERMAL CONTACT SURFACES OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESS INTENSIFIERS

**Abstract.** The development of scientific and technological progress in recent decades has led to an increase in the consumption of natural energy carriers. This in turn affects mineral deposits – they are being depleted. In order to reduce energy consumption, the issue of energy conservation is relevant. One of the ways to solve this problem is to conduct research in the field of improving the efficiency of energy technology equipment with the subsequent development of universal technology and equipment for the intensification of heat and mass transfer processes. This article presents the most currently used methods of intensification of heat exchange processes, their advantages and disadvantages. In addition, the most promising method is determined. The technology of forming a thermocontact (discretely rough) surface on a metal sheet is described. Expressions for determining the effort required to produce this surface under various conditions are defined. A method of experimental research and a tool for manufacturing a thermocontact surface are presented. As a result of experimental studies, it is found that, depending on the conditions of formation of the thermal contact surface, the analytical solution differs from the experimental values by 5.3–13.4 %. Another important factor affecting the shaping is the feed rate of the metal sheet, its optimal value is 1000–2000 mm/min.

**Keywords:** energy-saving technologies, thermal contact surface, intensification of heat exchange, energy technology equipment, efficiency improvement.

### REFERENCES

1. On Energy Saving and Energy Efficiency Improvement [Ob energosberezhenii i povyshenii energeticheskoy effektivnosti]: Federal Law No. 261-FZ of November 21, 2009. (rus)

2. Timonina V. I. Energy saving and energy efficiency as indicators of achieving energy security in the country [Energosberezhenie i energoэффективность kak pokazateli dostizheniya energobezopasnosti v

strane]. Theoretical economics. 2022. No. 1. Pp. 111–119. (rus)

3. Rakhmonov I.U., Ushakov V.Ya., Niyozov N.N., Kurbonov N.N., Mamutov M. Energy saving in industry. Energy Systems Research. 2021. Vol. 289. No. 07014. Pp. 1–4. DOI: 10.1051/e3sconf/202128907014

4. Pushnov A.S., Sokolov A.S., Butrin M.M. Methods of intensification of the process of heat and



mass transfer in column apparatuses with contact devices [Metody intensifikacii processa teplo i mas-soobmena v kolonnyh apparatah s kontaktnymi ustroystvami]. Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI. 2013. No. 1–4. Pp. 237–242. (rus)

5. Khurmamatov A., Rakhimov G., Murtazayev F. Intensifications of heat exchange processes in pipe heat exchangers. Conference: 2021 Asia-Pacific conference on applied mathematics and statistics. 2022. Vol. 2432. No. 1. Pp. 1–5. DOI: 10.1063/5.0096336

6. Gorshenin A.S. Methods of heat transfer intensification: textbook. Stipend [Metody intensifikacii teploobmena: ucheb. Posobie]. Samara: SamGTU, 2009. 82 p. (rus)

7. Artemyev D., Zaitsev A. Analysis of increase in efficiency of air-cooled heat exchangers due to intensification of heat exchange. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. Vol. 866. No. 012020. Pp. 1–6. DOI:10.1088/1755-1315/866/1/012020

8. Misbakhov R.S., Gureev V.M., Moskalenko N.I., Ermakov A.M., Bagautdinov I.Z. Simulation of Surface Intensification of Heat Exchange in Shell-and-Pipe and Heat Exchanging Devices. Biosci Biotech Res Asia. 2015. Vol. 12. No. 2. Pp. 517–525.

9. Belozertsev V.N., Biryuk V.V., Dovgiallo A.I., Nekrasova S.O., Uglov D.A., Sarmin D.V.

Intensification of heat exchange: textbook. Stipend [Intensifikaciya teploobmena: ucheb. Posobie]. Samara: Samara University, 2018. 208 p. (rus)

10. Egorov M. Yu. Methods of Heat-Exchange Intensification in NPP Equipment. Atomic Energy. 2018. No. 124. Pp. 403–407.

11. Rulik S., Wróblewski W. A Numerical Study of The Heat Transfer Intensification Using High Amplitude Acoustic Waves. Archives of Acoustics. 2018. Vol. 43. No. 1. Pp. 31–47.

12. Migay V.K. Improving the efficiency of modern heat exchangers [Povyshenie effektivnosti sovremennyh teploobmennikov]. L.: Energiya, 1980. 144 p. (rus)

13. Kolenchukov O.A., Petrovsky E.A. Heat exchange element, method of its manufacture and device for its implementation. Patent RF, no. 2759309, 2021.

14. Reut L.E. Theory of stressed and deformed state with examples and tasks: an educational and methodical manual [Teoriya napryazhennogo i deformirovannogo sostoyaniya s primerami i zadachami: uchebno-metodicheskoe posobie]. Minsk: BNTU, 2008. 107 p. (rus)

15. Weinberg D.V., Weinberg E.D. Calculation of plates [Raschet plastin]. Kiev: Budivelnik, 1970. 436 p.

#### Information about the authors

**Kolenchukov, Oleg A.** Assistant. E-mail: okolenchukov@sfu-kras.ru. Siberian Federal University. Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny Ave., 82A.

**Petrovsky, Eduard A.** Professor. E-mail: petrovsky\_quality@mail.ru. Siberian Federal University. Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny Ave., 82A.

Received 27.09.2022

#### Для цитирования:

Коленчуков О.А., Петровский Э.А. Исследование технологии формирования термодетальных поверхностей интенсификаторов тепломассообменных процессов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 2. С. 94–101. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-94-101

#### For citation:

Kolenchukov O.A., Petrovsky E.A. Study of the technology for formation of thermal contact surfaces of heat and mass transfer process intensifiers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 2. Pp. 94–101. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-94-101

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-102-112

\*Григоренко А.А., Шопина Е.В.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ВЫПОЛНЕНИЕ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНА И АДАПТАЦИЯ К ИЗГОТОВЛЕНИЮ ПОВОРОТНОГО КУЛАКА. ЧАСТЬ II

**Аннотация.** В статье описано создание 3D модели поворотного кулака болида класса “Formula Student” при помощи приложения, CAD/CAE системы SolidEdge, генеративный дизайн. Исходными данными являлись: модель излишне прочного поворотного кулака, ранее вычисленные значения нагрузок для статического расчета при различных режимах работы, информация о свойствах материала. В процессе оптимизации были варьированы технологические настройки с целью получения геометрии, максимально пригодной к изготовлению резанием на трехосевом фрезерном станке с чипом программного управления и без дополнительной поворотной оси. Результат генеративного дизайна был использован для построения модели кулака, который можно изготовить фрезерованием с переустановками и креплением в универсальные приспособления, такие как тиски. Построение выполнялось при помощи стандартных инструментов твердотельного моделирования (вытягивание по сечениям, придание толщины и так далее). К детали были добавлены элементы крепления, в виде прямоугольных бобышек, которые необходимо будет удалить при помощи слесарных операций после завершения фрезерных операций. Дополнительно были удалены отверстия, параллельные оси Z, которые возможно выполнить только после срезания элементов крепления.

**Ключевые слова:** генеративный дизайн, поворотный кулак, случаи нагрузки.

**Введение.** Поворотный кулак, в подвеске на двойных поперечных рычагах, служит для крепления подшипников колесного узла, шаровых шарниров рычагов и рулевой тяги, а также для крепления тормозного суппорта [1–3]. В гоночных или спортивных автомобилях, предназначенных для участия в спортивных соревнованиях, уменьшение массы поворотного кулака снизит общую массу транспортного средства и снизит величины сил инерции, возникающих при работе подвески (снижение неподрессоренной массы и, как следствие, улучшение управляемости) [4, 5]. При низком весе, поворотный кулак должен обладать и достаточной прочностью. Добиться значительного снижения массы без снижения прочности для детали, работающей в условиях механической нагрузки, можно при помощи генеративного дизайна. Генеративный дизайн – это метод проектирования или создания дизайна изделий. Дизайнеры или инженеры вводят вводные данные (требования к итоговому решению) в программное обеспечение для генеративного дизайна включая с такие параметры, как прочностные характеристики, материалы, методы производства, ограничения по стоимости и так далее. Программное обеспечение генерирует и анализирует возможные варианты решения, быстро генерируя альтернативные варианты изделия. Алгоритм тестирует и учится на каждой итерации. Характеристики сплава Д16Т:

- 1) Предел прочности при растяжении  $\sigma_b = 345 \text{ МПа}$
- 2) Предел текучести  $\sigma_t = 245 \text{ МПа}$
- 3) Плотность  $\rho = 2800 \text{ кг/м}^3$
- 4) Относительное удлинение  $\delta_5 = 3 - 7\%$

Случаи нагрузки [6–10] в виде выделенных поверхностей и проекций сил на оси координат рис. 2.

I Работа поворотного кулака в правом повороте. Колесо движется по внешнему радиусу, ось колеса проходит через центр поворота.

II Работа переднего поворотного кулака при торможении с максимальным отрицательным ускорением.

III и IV Работа поворотного кулака в правом повороте в условиях недостаточной и избыточной поворачиваемости (ось колеса повернута на угол  $30^\circ$  относительно отрезка, соединяющего центр колеса с центром поворота).

V Работа поворотного кулака в левом повороте. Колесо движется по внутреннему радиусу, ось колеса проходит через центр поворота.

VI Работа под действием усилия, направленного вдоль оси рулевой тяги. В данном случае ось параллельна оси колеса – это создаст наибольший изгибающий момент в креплении тяги.

Данные о величинах проекций сил и характере закреплений были сведены в таблицу 1.

итерации, что работает, а что нет. Условно, к недостаткам генеративного дизайна можно отнести то, что созданные оптимизированные сложные формы со внутренними полостями. Некоторые из этих форм невозможно изготовить традиционными методами производства. Вместо этого они создаются с использованием методов аддитивного производства (3D печать различных видов для трехмерных изделий и лазерная или плазменная резка для деталей, выполняемых из листовых материалов).

**Материалы и методы.** Исходными данными служат случаи нагрузки (информация о том, к каким поверхностям детали и какие значения нагрузок действуют на деталь), моделирующие работу [11], и исходная геометрия детали (3D модель детали, содержащая элементы крепления шаровых опор, посадочные отверстия подшипников и проушину для крепления рулевой

тяги), обладающей излишней прочностью и вписывающейся в требуемые габариты [12, 13] рис. 1 и информация о материале. В данном случае в качестве материала был выбран алюминиевый сплав Д16Т, так как он обладает хорошим соотношением предела текучести к плотности, хорошей обрабатываемостью резанием и достаточной усталостной прочностью [14, 15].

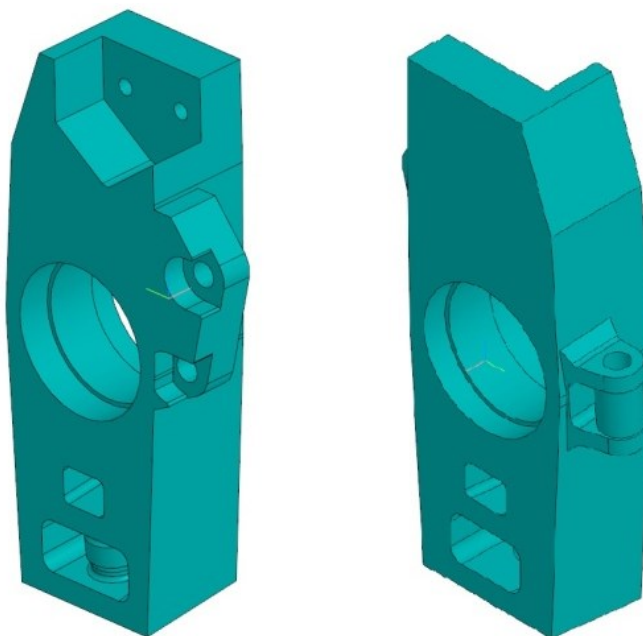


Рис. 1. 3D модель поворотного кулака для последующей оптимизации

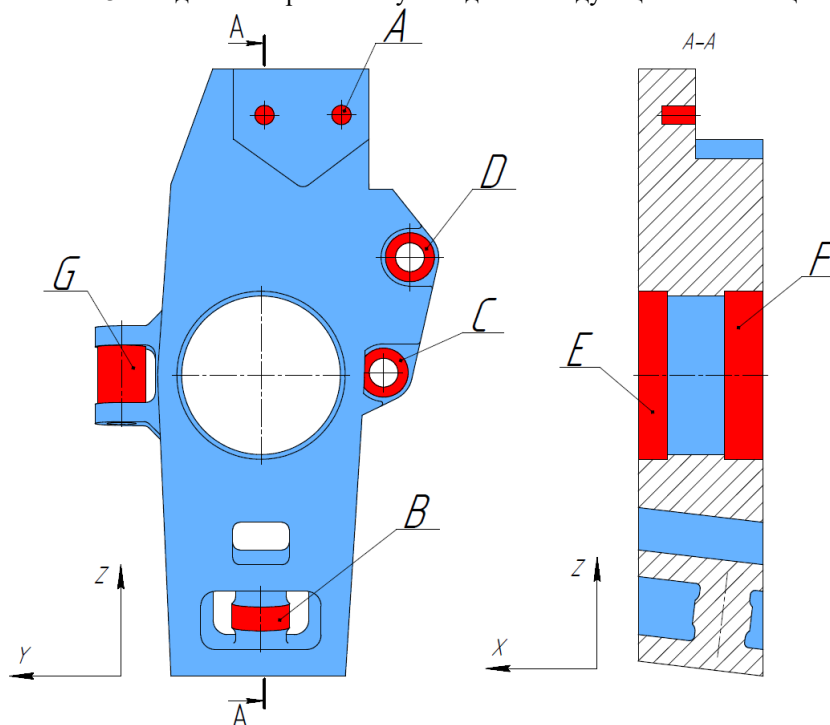


Рис. 2. Случаи нагрузки поворотного кулака.

А – отверстия крепления верхней шаровой опоры; В – крепление нижней шаровой опоры;

С – нижнее крепление тормозного суппорта; D-верхнее крепление тормозного суппорта;

Е – посадочное место переднего подшипника ступицы;

Ф – посадочное место заднего подшипника ступицы, G-крепление шарового шарнира рулевой тяги

Таблица 1

## Данные случаев нагрузки поворотного кулака

| № случая | I Правый поворот, угол 0° | II Торможение.                  | III Правый поворот, угол -30°     | IV Правый поворот, угол 30°      | V Левый поворот, угол -0° | VI Руление    |
|----------|---------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|---------------|
| A        | X=-1692Н                  | Зафиксировано                   | X=-1296Н;<br>Y=-1088Н             | X=-1296Н;<br>Y=1088Н             | X=2149Н                   | –             |
| B        | X=4632Н;<br>Z=-2940Н      | Зафиксировано                   | X=3548Н;<br>Y=-2977Н;<br>Z=-2940Н | X=3548Н;<br>Y=2977Н;<br>Z=-2940Н | X=-4089Н;<br>Y=-1940Н     | –             |
| C        | –                         | X=-3375Н;<br>Y=3969Н<br>Z=2576Н | –                                 | –                                | –                         | –             |
| D        | –                         | X=-3375Н;<br>Y=3969Н<br>Z=2576Н | –                                 | –                                | –                         | –             |
| E        | Зафиксировано             | –                               | Зафиксировано                     | Зафиксировано                    | Зафиксировано             | Зафиксировано |
| F        | Зафиксировано             | –                               | Зафиксировано                     | Зафиксировано                    | Зафиксировано             | Зафиксировано |
| G        | –                         | –                               | –                                 | –                                | –                         | X=1470Н       |

Оптимизация геометрии будет осуществляться при помощи CAD/CAE системы SolidEdge 2019 – системы твердотельного и поверхностного моделирования производства Siemens PLM Software, в которой реализованы как параметрическая технология моделирования на основе конструктивных элементов и дерева построения, так и технология вариационного прямого моделирования. Данная технология, разработанная компанией Siemens PLM Software (до 2007 года – UGS Corp.), получила название «синхронная технология». Система Solid Edge построена на основе ядра геометрического моделирования Parasolid и вариационного решателя D-Cubed и использует графический пользовательский интерфейс Microsoft Fluent. Система Solid Edge предназначена для моделирования деталей и сборок, создания чертежей, управления конструкторскими данными, и обладает встроенными средствами конечноэлементного анализа и встроенным модулем «Генеративный дизайн».

**Основная часть.** Рассмотрим процесс выполнения генеративного дизайна, с целью снижения массы, и постобработки, упрощающей изготовление, на примере поворотного кулака автомобиля.

I этап. Задание материалов, области проектирования и случаев нагрузки. В таблице материалов рис. 3 необходимо выбрать или создать необходимый материал.

Материал Д16Т не присутствует в списке материалов по стандартам ГОСТ и других списках.

Материал был создан изменением свойств алюминиевого сплава 6061, выделенных голу-

бым в таблице, показанной на рис. 2. Были изменены значения: плотности, предела текучести и предела прочности. Прочие параметры сплава (Число Пуассона, модуль упругости и так далее) не были изменены. После создания материала необходимо присвоить его исходной геометрии и приступить к созданию случаев нагрузки [16]. При создании нагрузок и ограничений для каждого из случаев необходимо задать толщину неизменяемой области от базовой грани. В модуле SolidEdge толщина данной области отсчитывается в обе стороны от базовой грани, а на краях выполняется автоматическое скругление радиусом, равным толщине неизменяемой зоны. Неизменяемая область задается для того, чтобы алгоритм не вычитал материал из посадок подшипников и бобышек вокруг отверстий для крепления шаровых опор и тормозного суппорта рис. 4. Важно, чтобы на пересечении задаваемой области и исходной геометрии не возникало тел с нулевым объемом – это вызовет ошибку при выполнении анализа.

Толщину неизменяемой области можно проверить при помощи дополнительного прочностного расчета. Например, к цилиндрическим элементам креплений, можно приложить силу, распределенную на половине внутренней цилиндрической поверхности, чтобы убедиться, что они не разрушатся под воздействием нагрузки, действующей перпендикулярно оси болта шаровой опоры.

II этап. Задание технологических настроек и параметров анализа. Технологические настройки помогают исключить создание в процессе генеративного дизайна замкнутых полостей или за-

дать направление вытягивания для деталей, которые можно изготовить резанием из листовой заготовки. Так же окно технологических настроек рис. 5 включает ползунок настройки распределения материала. При помощи данного ползунка можно изменить характер распределения от не

зависимого до равномерного [12]. Для данного поворотного кулака было выполнено несколько анализов с различным значением распределения [17]. Наиболее подходящая для изготовления резанием геометрия была получена при положении ползунка, показанном на рисунке 5.

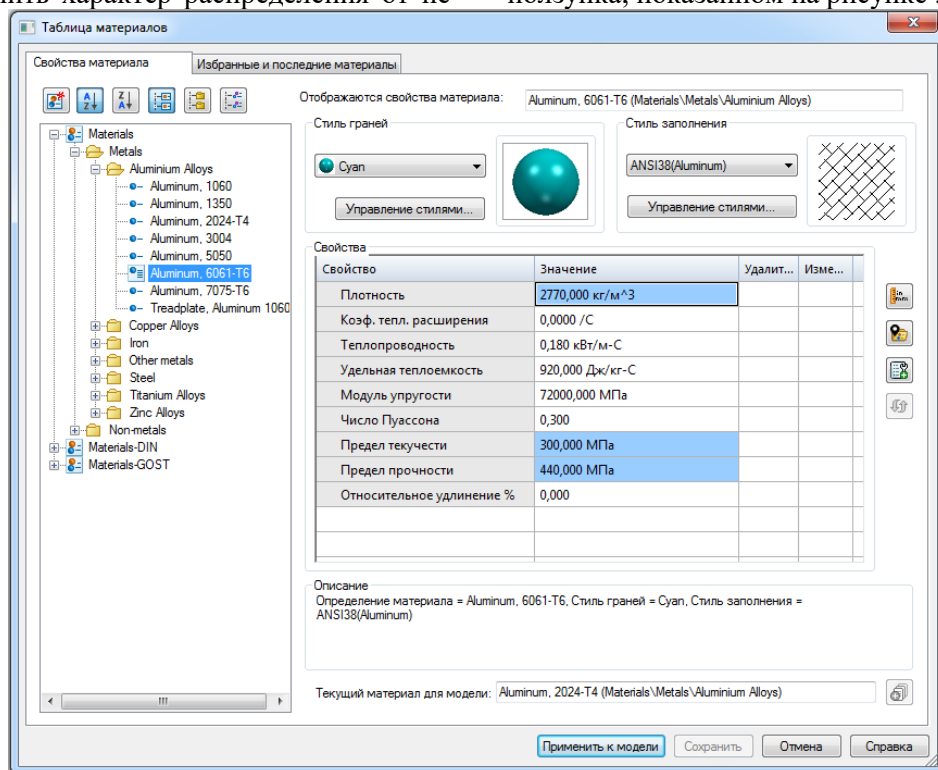


Рис. 3. Окно "Таблица материалов"

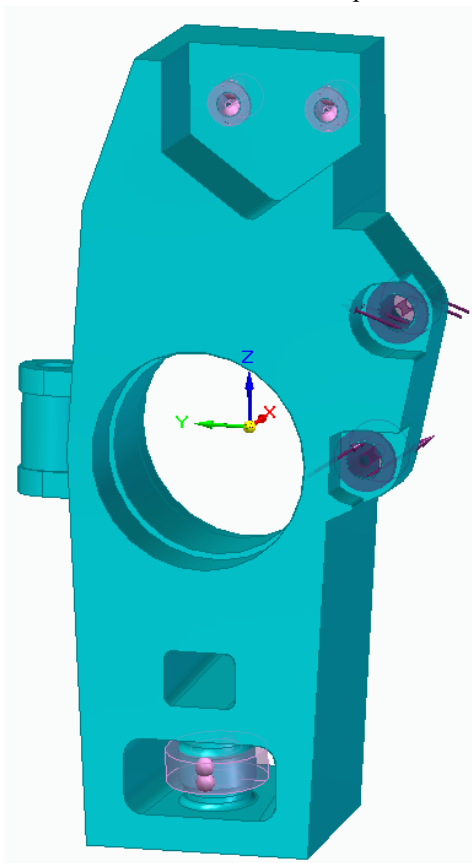


Рис. 4. Второй случай нагрузки, моделирующий торможение

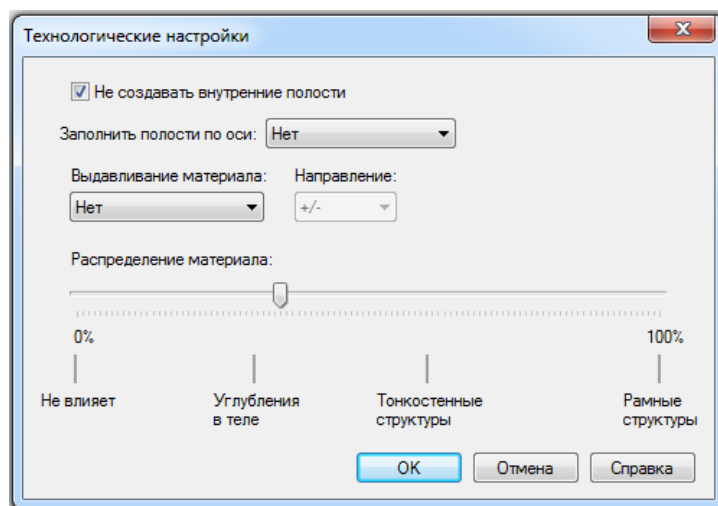


Рис. 5 Окно технологических настроек

Окно «Выполнить анализ» рис. 6 содержит настройки качества анализа и процента снижения массы. При повышении качества анализа возрастает максимально возможный процент снижения массы за счет уменьшения размера конечных элементов, на которые деталь разбивается при анализе, но возрастает и время, требующееся на анализ, так как вышеупомянутое уменьшение размера конечных элементов влечет за собой увеличение их числа, а, следовательно, и повышение количества неизвестных в системе

уравнений анализа. Время, указанное под ползунком качества анализа – это расчетное время и может не совпадать с реальным. В зависимости от количества сил и случаев нагрузки продолжительность может многократно превысить указанную в окне. Для проверки правильности задания входных параметров можно выполнить анализ с низким процентом снижения массы и низким качеством. Анализ кулака был выполнен несколько раз. Максимальный процент снижения массы при запасе прочности 2 – 75 процентов.

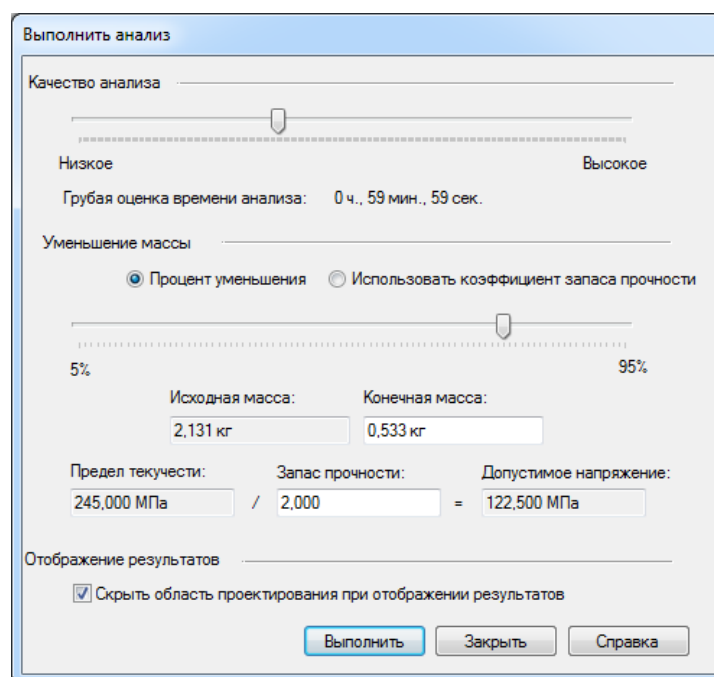


Рис. 6. Окно «Выполнить анализ»

III этап. Генеративный дизайн производился с увеличением процента снижения массы при пониженном качестве анализа [17] – это необходимо для сокращения затрат времени на выполнение промежуточных расчетов. При достижении предела снижения было варьировано распре-

деление материала. На рис. 7 изображен поворотный кулак альтернативной конструкции, который был оптимизирован с использованием генеративного дизайна, но технологические настройки были установлены на завышенное значение рамности. Итоговая геометрия совершенно непригодна к изготовлению резанием –



доступ режущего инструмента заблокирован. Результаты анализов показаны ниже рис.8 и рис. 9. Деталь на рис. 8 не имеет части креплений, это вызвано заданием слишком высокого процента снижения массы – алгоритм вычел материал из областей креплений так как в оставшейся области проектирования не осталось элементов с напряжениями ниже допустимого.

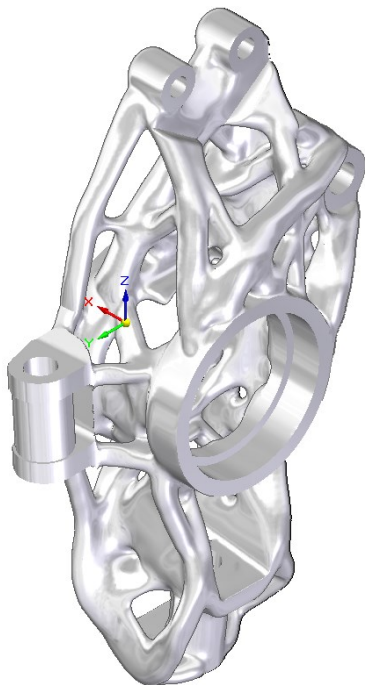


Рис. 7. Результат с завышенной «рамностью»

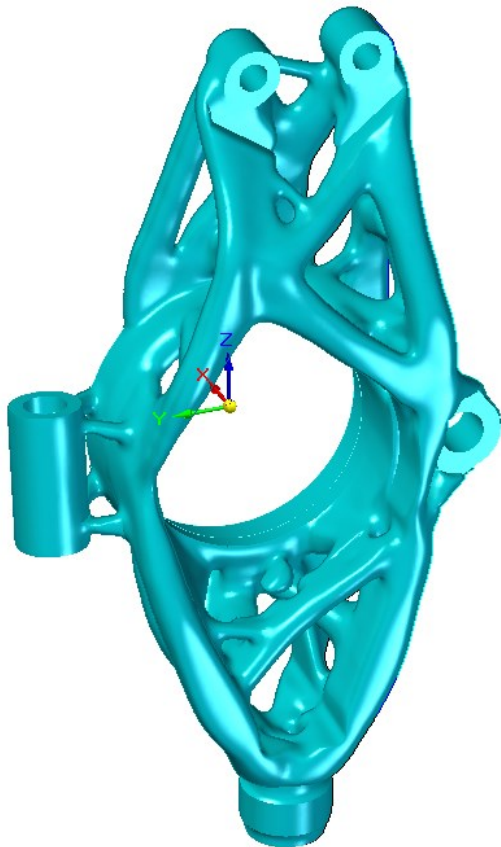


Рис. 8. Результат анализа с излишним процентом снижения массы.

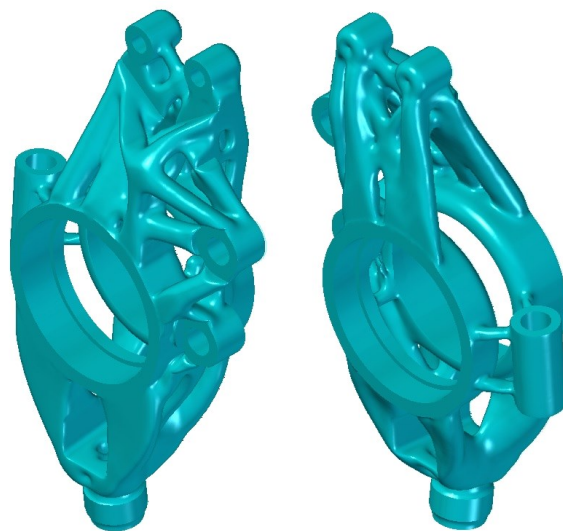


Рис. 9. Итоговый результат генеративного дизайна (масса=533 г.)

IV этап. Адаптация к производству. Среди возможных вариантов изготовления деталей, полученных при помощи генеративного дизайна, есть 3D печать, литье и обработка резанием (имеются ограничения). Многие виды 3D печати не подходят для изготовления вышеописанной детали так как материалы, используемые для печати, обладают недостаточной твердостью и пределом прочности на смятие. Технология, пригодная к изготовлению, это селективное лазерное спекание металлического порошка, наносимого тонкими слоями при помощи скребка и ролика. Полученные при помощи данной технологии детали будут нуждаться в минимальном объеме механической обработки (чистовая расточка посадочных отверстий подшипников, полировка доступных поверхностей для снижения числа концентраторов напряжений, дополнительная обработка резьбовых отверстий метчиком). К недостаткам можно отнести достаточно низкую распространенность и дороговизну как самой печати, так и расходных материалов.

Литьем (например, по выплавляемым моделям) тоже можно получить деталь требуемой конфигурации. К недостаткам литья можно отнести возможность формирования пустот по объему, резко снижающих прочность, и невысокие механические характеристики самих литейных сплавов.

В итоге, в качестве метода изготовления была выбрана обработка резанием. Заготовка получена из однородного материала с высокими механическими характеристиками. Стоимость расходных материалов ниже, по сравнению с печатью спеканием, и имеется доступ к оборудованию.

Задачей является обеспечение возможности изготовления на 3-х осевом фрезерном станке из

плиты материала толщиной 70 мм. Обработку планируется производить с тремя переустановками с поворотом на  $90^\circ$  вокруг оси Z детали. В качестве инструментов будут использованы концевые фрезы с цилиндрической и сферической режущей частью.

При адаптации к изготовлению, по контурам оптимизированной модели, было смоделировано тело детали с карманами без отрицательных уклонов (рис. 10) и радиусами скруглений, незначительно превышающими радиусы стандартных концевых фрез. В ходе моделирования геометрия, полученная при помощи генеративного дизайна, была разделена на несколько областей для упрощения построения. Большинство элементов были перестроены при помощи простых операций: вытягивание по прямой и под углом. При моделировании некоторых элементов были использованы команды: вытягивание по сечениям и придать толщину. После построения отдельных элементов было выполнено объединение при помощи булевой операции в одно тело и создание скруглений с переменным радиусом.

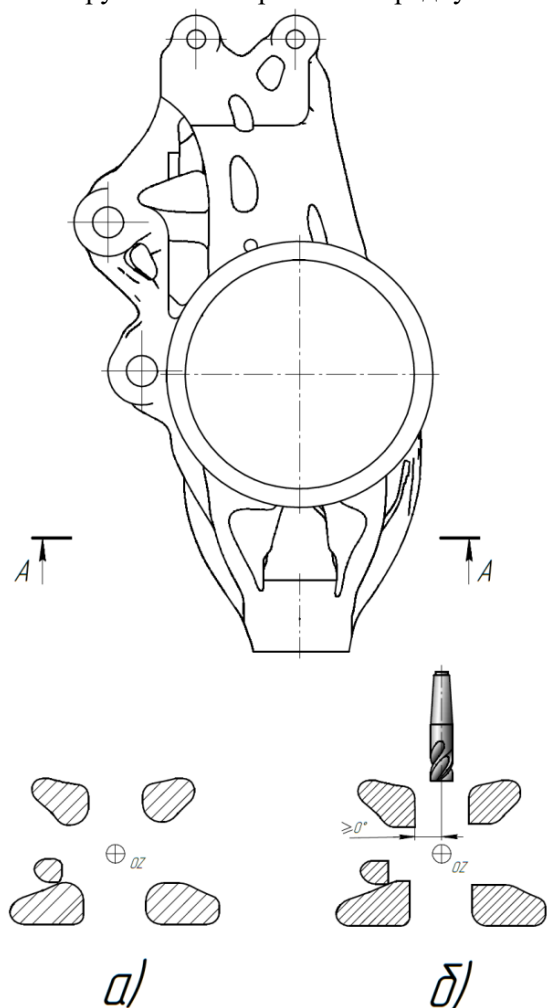


Рис. 10. Схематическое изображение сечений результата генеративного дизайна (а) и адаптированной детали (б)

Для упрощения установки в приспособление к модели поворотного кулака необходимо добавить квадратные бобышки рис. 10. Данные бобышки можно будет устанавливать, как в тиски, так и закреплять прижимами к столу. Таким образом, заготовкой для фрезеровки поворотного кулака будет служить прямоугольная плита с посадочным отверстием для подшипников рис. 11.

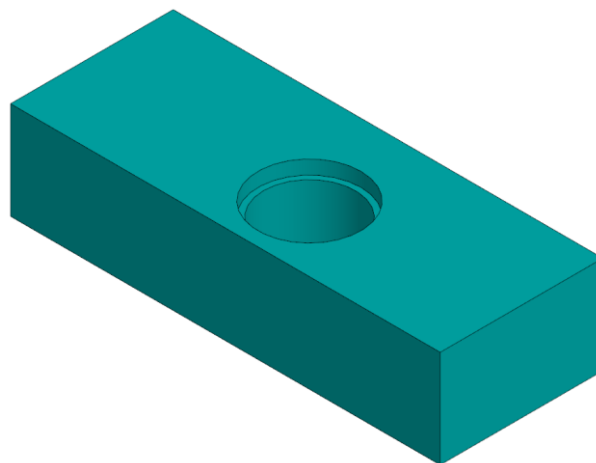


Рис. 11. Заготовка поворотного кулака перед установкой на стол фрезерного станка

Большую часть материала лучше удалять при прижиге кулака его лицевой и тыльной сторонами к столу, т. к. возможно дополнительное закрепление за посадочное отверстие подшипников. Дополнительное крепление через осевое отверстие обеспечит дополнительную жесткость и позволит снимать больший слой материала за проход без возникновения дробовидного выбивания на поверхности – это сократит время, требуемое на черновые операции. В заготовке отверстия для подшипников должны иметь припуск для чистовой обработки так как после снятия больших объемов материала цилиндрические поверхности поведет. После завершения обработки на фрезерном станке необходимо будет удалить бобышки рис. 12 и выполнить отверстия для крепления шаровых шарниров рулевой тяги и нижнего рычага. Достаточной точности данных отверстий нужно добиться при помощи шаблонов, например, изготовленных лазерной резкой из пластмассы или фанеры. В данном случае необходимо изготовить всего лишь два правых поворотных кулака и два левых на переднюю и заднюю ось. Для дополнительного снижения массы возможно удалить часть материала из нижнего крепления вручную при помощи борфрезы с удлиненным хвостовиком. После снятия материала необходимо выполнить шлифовку и полировку в направлении действия нагрузки для устранения концентраторов напряжений и предотвращения усталостного разрушения.

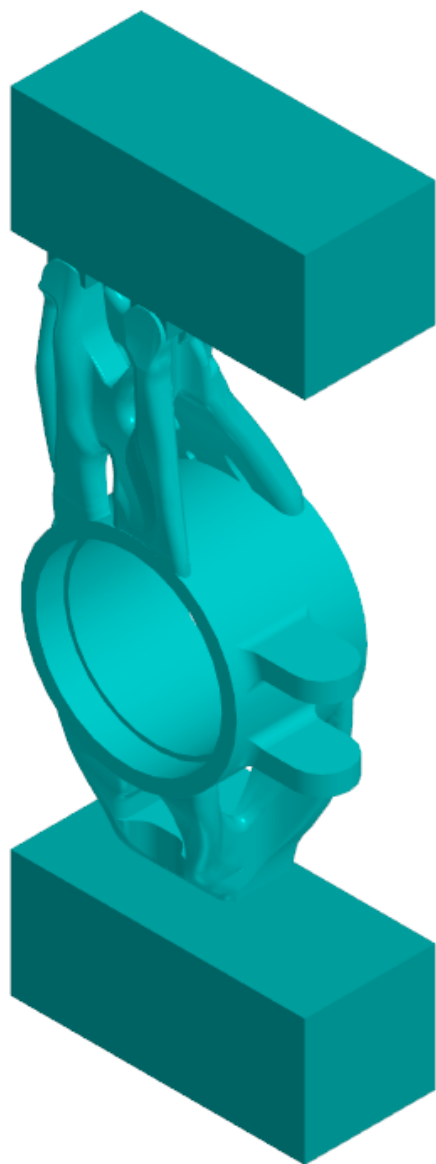


Рис. 12. Итоговая 3D модель адаптированного поворотного кулака

### Выводы

1. При помощи приложения CAD системы SolidEdge был выполнен генеративный дизайн поворотного кулака болида класса “Formula Student” с целью получения геометрии с наименьшим объемом и, как следствие, наименьшей массой. В качестве входных параметров оптимизации были использованы значения статических нагрузок, рассчитанных исходя из условий работы детали в повороте и при торможении. В ходе выполнения генеративного анализа был подобран наивысший процент снижения массы, при котором возможно выполнение входных условий. Процент составил 75 %. Дополнительно были варьированы технологические настройки с целью получения в результате наиболее простой в изготовлении детали. В данном случае оптимальные значения параметров: распределение

материала – 40% от максимальной и отключенные внутренние полости.

2. В качестве наиболее простого и доступного способа изготовления было выбрано фрезерование с тремя переустановками. Для адаптации к изготовлению было выполнено построение новой модели детали по контурам фасетного тела, полученного при помощи генеративного дизайна. Геометрия некоторых областей была изменена для упрощения фрезерования. Итоговое значение массы составило 610 грамм. Были рассмотрены пути дополнительного снижения массы при помощи ручной слесарной обработки областей детали, недоступных для фрезерования на трехосевом фрезерном станке, с последующей шлифовкой и полировкой для устранения концентраторов напряжений.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пахомеев Н.В., Лопухов А.В., Чуйдук И.А., Салимоненко Г.Н. Разработка колесно-ступичного узла гоночного электроботида класса Formula Student // Сервис технических систем – Агропромышленному комплексу России Материалы международной научно-практической конференции института агроинженерии. Южно-Уральский государственный аграрный университет. 2019. С. 140–147.
2. Хамилл Д. Подвеска и тормоза: Как построить и модифицировать спортивный автомобиль. М.: Изд-во Veloce Publishing Plc, 2005. 96 с.
3. Milliken W.F. Race car vehicle dynamics: Problems, Answers and Experiments. : Изд-во SAE International, 2003. 78 с.
4. Курдюк В.А., Вольская Н.С. Влияние геометрических характеристик двухрычажной подвески на поперечных рычагах на кинематику и распределение усилий в узлах подвески // Известия московского государственного промышленного университета. 2013. №9. С. 50–55.
5. Саплинова В.В., Каськов С.А. Система подвески гоночного болида класса “Formula Student” и ее безопасность // Новые задачи технических наук и пути их решения. 2017. С. 206–209.
6. Саплинова В.В., Глаголев С.Н., Новиков А.Н., Новиков И.А. Разработка тормозной системы гоночного болида формульного типа класса “Formula Student” // Вестник гражданских инженеров. 2019. №5. С. 270–277.
7. Гудков Н.А., Михайлов П.Г. Уточнение нагрузочных режимов для расчетов на прочность на примере гоночных болидов Bauman Racing Team // Студенческие инженерные проекты Сборник трудов V всероссийской конференции. МАДИ. 2017. С. 76–91.

8. Кулагин А.Л., Тумасов А.В., Гончаров К.О. Расчет сил, действующих в передней подвеске гоночного болида Formula Student на двойных поперечных рычагах // Безопасность транспортных средств в эксплуатации Сборник материалов 71-й Международной научно-технической конференции. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. 2010. С. 45–47.

9. Бутин Д.А., Тумасов А.В. Расчет рулевого управления с маятниковыми рычагами для болида класса Formula Student // Сборник материалов XII Международной молодежной научно-технической конференции. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. 2013 С. 109–110.

10. Григоренко А.А., Шопина Е.В. Выполнение генеративного дизайна и адаптация к изготовлению поворотного кулака. Часть I // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №1. С 132–143.

11. Рампель Й. Шасси автомобиля: Элементы подвески. М.: Изд-во Машиностроение, 1987. С. 284.

12. Бухтояров И.В., Кошкина И.Н. Оптимизация конструкции робота методами генеративного дизайна // STUDENT. 2022. №5. С. 45–56.

13. Демин Е.А., Федоров А.Н., Гончаров К.О., Кулагин А.Л. Применении САПР в проектировании элементов подвески спортивного ав-

томобиля класса Formula Student // Будущее технической науки сборник материалов Сборник выступлений международной молодежной научно-практической конференции. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. 2015. С. 601–602.

14. Гудков Н.А., Михайлов П.Г., Киселев П.И., Больших А.А. Исследование прочностных свойств стали DOCOL1000DP и верификация критерия прочности для конечно-элементного расчета поворотного кулака автомобиля класса “Формула студент” // Сборник материалов и докладов 6-ого Всероссийского форума. 2020. С. 35–46.

15. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. М.: Изд-во Машиностроение, 2001. 420 с.

16. Кутепов Н.Ю., Манджапарашвили Р.З. Разработка методики оптимизации конструкции поворотных кулаков гоночного болида проекта Formula Student. // Прикладная математика Материалы VI международной научно-практической конференции молодых ученых. Тольяттинский государственный университет. 2020. С. 869–872.

17. Петров Р.И., Скабин Д.А., Шабунин Е.Н. Создание рамы квадрокоптера методом генеративного дизайна с применением аддитивных технологий // Неделя науки СПбПУ Материалы научной конференции с международным участием. Том 2. 2018. С. 136–139.

#### Информация об авторах

**Григоренко Александр Александрович**, ассистент кафедры «Технология машиностроения». E-mail: grigorenko1998@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Шопина Елена Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения». Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 22.06.2022 г.

© Григоренко А.А., Шопина Е.В., 2023

**\*Grigorenko A.A. Shopina E.V.**

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

*\*E-mail: grigorenko1998@yandex.ru*

## GENERATIVE DESIGN AND ADAPTATION FOR MANUFACTURING OF STEERING KNUCKLE. PART II

**Abstract.** The article describes the creation of a 3D model of the steering knuckle of the “Formula Student” class car using the SolidEdge CAD / CAE system application, named generative design. The initial data are a model of an overly strong steering knuckle, previously calculated load values for various operating modes, information about the properties of the material. In the process of optimization, technological settings are varied in order to obtain a geometry that is as suitable as possible for cutting on a three-axis milling machine with a CNC and without an additional rotary axis. The result of the generative design is used to build a model of a knuckle that can be milled with repositioning and clamped into universal fixtures such as a vise.

*The construction is carried out using standard solid modeling tools (lofting by sections, adding thickness, etc.). Fastening elements have been added to the part, in the form of rectangular bodies, which will need to be removed using manual cutting and grinding operations after the milling operations are completed. Additionally, holes are removed parallel to the Z axis, which can only be made after cutting the fasteners.*

**Keywords:** generative design, steering knuckle, cases of loading.

## REFERENCES

1. Pakhomeev N.V., Lopukhov A.V., Chuyduk I.A., Salimonenko G.N. Development of a wheel-hub unit for an electric race car of the Formula Student class [Razrabotka kolesno-stupichnogo uzla gonochnogo elektrobolida klassa Formula Student]. Servis tekhnicheskikh sistem – Agropromyshlennomu kompleksu Rossii Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii instituta agroinzhenerii. YUzhno-Ural'skij gosudarstvennyj agrarnyj universitet. 2019. Pp. 140–147. (rus)
2. Hamill D. Suspension and brakes: How to build and modify a sports car. Moscow: Veloce Publishing Plc, 2005. 96 p. (rus)
3. Milliken W.F. Race car vehicle dynamics: Problems, Answers and Experiments. SAE International, 2003. 78 p.
4. Kurdyuk V.A., Volskaya N.S. Influence of geometrical characteristics of a double wishbone suspension on transverse levers on the kinematics and distribution of forces in the suspension units [Vliyaniye geometricheskikh harakteristik dvuhrychazhnoy podveski na poperechnyye ryuchagah na kinematiku i raspredeleniye usilij v uzlah podveski]. Izvestiya moskovskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta. 2013.No. 9. Pp. 50–55. (rus)
5. Saplinova V.V., Kaskov S.A. The Suspension System of a Formula Student Racing Car and Its Safety [Sistema podveski gonochnogo bolida klassa "Formula Student" i ee bezopasnost']. Novye zadachi tekhnicheskikh nauk i puti ih resheniya. 2017. Pp. 206–209. (rus)
6. Saplinova V.V., Glagolev S.N., Novikov A.N., Novikov I.A. Development of the braking system for a Formula Student race car [Razrabotka tormoznoj sistemy gonochnogo bolida formul'nogo tipa klassa "Formula Student"]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2019. Pp. 270–277. (rus)
7. Gudkov N.A., Mikhailov P.G. Refinement of load conditions for strength calculations on the example of racing cars Bauman Racing Team [Utochneniye nagruzochnykh rezhimov dlya raschetov na prochnost' na primere gonochnykh bolidov Bauman Racing Team]. Studencheskie inzhenernye proekty Cbornik trudov V vserossijskoj konferencii. MADI. 2017. Pp. 76–91. (rus)
8. Kulagin A.L., Tumasov A.V., Goncharov K.O. Calculation of the forces acting in the front suspension of the Formula Student racing car on double wishbones [Raschet sil, dejstvuyushchih v perednej podveske gonochnogo bolida Formula Student na dvoynyyh poperechnyyh ryuchagah]. Bezopasnost' transportnykh sredstv v ekspluatatsii Sbornik materialov 71-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Nizhegorodskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. R.E. Alekseeva. 2010. Pp. 45–47. (rus)
9. Butin D.A., Tumasov A.V. Calculation of steering with pendulum levers for a Formula Student car [Sbornik materialov XII Mezhdunarodnoj molodyozhnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii]. Nizhegorodskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. R.E. Alekseeva. 2013. Pp. 109–110. (rus)
10. Grigorenko A.A., Shopipa E.V. Generative design and adaptation for manufacturing of steering knuckle. Part I. [Vypolneniye generativnogo dizajna i adaptatsiya k izgotovleniyu povorotnogo kulaka chast' pervaya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 1. Pp. 132–143. (rus)
11. Rampel J. Car chassis: Suspension elements [Shassi avtomobilya: Elementy podveski]. Moscow: Mashinostroeniye, 1987. 284 p. (rus)
12. Bukhtoyarov I.V., Koshkina I.N. Optimization of the robot design by generative design [Optimizatsiya konstrukcii robota metodami generativnogo dizajna]. STUDENT. 2022.No 5. Pp. 45–56. (rus)
13. Demin E.A., Fedorov A.N., Goncharov K.O., Kulagin A.L. The use of CAD in the design of the suspension elements of a Formula Student class race car [Primeneniye SAPR v proektirovaniye elementov podveski sportivnogo avtomobilya klassa Formula Student]. Budushchee tekhnicheskoy nauki sbornik materialov Sbornik vystuplenij mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Nizhegorodskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. R.E. Alekseeva. 2015. Pp. 601–602. (rus)
14. Gudkov N.A., Mikhailov P.G., Kiselev P.I., Bolshikh A.A. Study of the strength properties of DOCOL1000DP steel and verification of the strength criterion for finite element calculation of the steering knuckle of a Formula Student car [Issledovaniye prochnostnykh svoystv stali DOCOL1000DP i verifikatsiya kriteriya prochnosti dlya konechno-elementnogo rascheta povorotnogo kulaka avtomobilya klassa "Formula student"]. Sbornik materialov i dokladov 6-ogo Vserossiyskogo foruma. 2020. Pp. 35–46. (rus)



15. Anuryev V.I. Handbook of the designer-machine builder [Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2001. 420 p. (rus)

16. Kutev N.Yu., Manjaparashvili R.Z. Development of a methodology for optimizing the design of the steering knuckles of a racing car of the Formula Student project. [Razrabotka metodiki optimizatsii konstruktsii povorotnykh kulakov gonochnogo bolida proekta Formula Student]. Prikladnaya matematika Materialy VI mezhdunarodnoj

nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh. Tol'yatinskij gosudarstvennyj universitet. 2020. Pp. 869–872. (rus)

17. Petrov R.I., Skabin D.A., Shabunin E.N. Creation of a quadcopter frame by generative design using additive technologies [Sozдание ramy kvadrokoptera metodom generativnogo dizajna s primeneniem additivnykh tekhnologiy]. Nedelya nauki SPBPU. 2018. Pp. 136–139. (rus)

#### *Information about the authors*

**Grogorenko, Alexander A.** E-mail: grigorenko1998@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Shopina, Elena V.** PhD. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

*Received 22.06.2022*

#### **Для цитирования:**

Григоренко А.А., Шопина Е.В. Выполнение генеративного дизайна и адаптация к изготовлению поворотного кулака. Часть II // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 2. С. 102–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-102-112

#### **For citation:**

Grigorenko A.A. Shopina E.V. Generative design and adaptation for manufacturing of steering knuckle. Part II. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 2. Pp. 102–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-102-112