

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

4

2022

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**

№ 4, 2022 год

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

Vol. 4. 2022

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)
- 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) (технические науки) (до 16.10.2022)
- 05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов (технические науки) (до 16.10.22)

Все поступающие материалы проходят научное рецензирование (двойное слепое). Рецензирование статей осуществляется членами редакционной коллегии, ведущими учеными БГТУ им. В.Г. Шухова, а также приглашенными рецензентами – признанными специалистами в соответствующей отрасли знания. Копии рецензий или мотивированный отказ в публикации предоставляются авторам и в Минобрнауки России (по запросу). Рецензии хранятся в редакции в течение 5 лет.

Редакционная политика журнала базируется на основных положениях действующего российского законодательства в отношении авторского права, плагиата и клеветы, и этических принципах, поддерживаемых международным сообществом ведущих издателей научной периодики и изложенных в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (COPE).

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 724/4 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 44446. (+12) Online подписка: http://www.akc.ru/itm/2558104627/ Цена свободная.
Подписан в печать	08.04.2022
Выход в свет	13.04.2022

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 14,30. Уч.-изд. л. 15,38. Тираж 40 экз. Заказ № 32

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)
- 05.02.13 – Machines, units and processes (branch-wise) (technical sciences) (to 16.10.2022)
- 05.17.06 – Technology and processing of polymers and composites (technical sciences) (to 16.10.2022)

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).

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 724/4
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: http://www.akc.ru/itm/2558104627/
Signed for printing:	08.04.2022

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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).

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

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

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

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

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

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

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

Перькова Маргарита Викторовна, д-р арх., проф., и.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).

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

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

Савин Леонид Алексеевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой мехатроники, механики и робототехники Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева (РФ, г. Орел).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

К 50-ЛЕТИЮ КАФЕДРЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

Сулейманова Л.А., Сапожников П.В., Кривчиков А.Н. ЦИФРОВИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ КАК IT-СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПИРАМИДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ	12
Смоляго Г.А., Обернихина Я.Л. ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, УСИЛЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОМ	25
Меркулов С.И., Есипов С.М., Есипова Д.В. КОМПОЗИТНЫЕ СИСТЕМЫ ВНЕШНЕГО АРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ	39
Донченко О.М. СОПРОТИВЛЕНИЕ КОРОТКИХ БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕЦЕНТРЕННОМУ СЖАТИЮ С БОЛЬШИМИ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТАМИ	49
Кочерженко В.В., Сулейманова Л.А. ИННОВАЦИОННЫЕ СВАЙНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СОВРЕМЕННОМ ФУНДАМЕНТОСТРОЕНИИ	57
Обернихин Д.В., Никулин А.И. ШИРИНА РАСКРЫТИЯ НОРМАЛЬНЫХ ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛКАХ ТРАПЕЦИЕВИДНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ	68
Солодов Н.В. ДВУТАВРОВАЯ БАЛКА С ПОЯСАМИ ИЗ ЗГСП И ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ	75
Крючков А.А. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СПЛОШНОГО И СОСТАВНОГО СЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ УТОЧНЕННОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА	82

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Перистый В.А., Чуев В.П., Бузов А.А., Перистая Л.Ф. РАЗРАБОТКА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОЧИСТОЙ ГЕЛЕОБРАЗНОЙ ВОДНОЙ ПОЛИАКРИЛОВОЙ КИСЛОТЫ (ПАК)	92
---	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Хуртасенко А.В., Чуев К.В., Волошкин А.А., Чередников И.И., Гаврилов Д.В. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РОБОТОМОБИЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ И РЕАЛИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ	101
Романович А.А., Духанин С.А., Романович М.А. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ РОТОРНО-ВИХРЕВОЙ МЕЛЬНИЦЫ	116

ON THE 50-th ANNIVERSARY OF THE "CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY" DEPARTMENT

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Suleymanova L.A., Sapozhnikov P.V., Krivchikov A.N.

DIGITALIZATION OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY AS IT-STRUCTURING OF THE PROCESS MANAGEMENT PYRAMID

12

Smolyago G.A., Obernikhina Y.L.

STRENGTH AND DEFORMATION OF BENDED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS REINFORCED WITH CARBON FIBER

25

Merkulov S.I., Esipov S.M., Esipova D.V.

COMPOSITE SYSTEMS FOR EXTERNAL REINFORCEMENT OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

39

Donchenko O.M.

RESISTANCE OF SHORT CONCRETE ELEMENTS TO OFF-CENTER COMPRESSION WITH LARGE ECCENTRICITIES

49

Kocherzhenko V.V., Suleymanova L.A.

INNOVATIVE PILE TECHNOLOGIES IN MODERN FOUNDATION ENGINEERING

57

Obernikhin D.V., Nikulin A.I.

CRACKING WIDTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS TRAPEZOIDAL CROSS SECTION

68

Solodov N.V.

I-BEAM WITH ZGSP CHORNS AND A CORRUGATED WALL

75

Krjuchkov A.A.

STRESS-STRAIN STATE OF BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS OF CONTINUOUS AND COMPOSITE CROSS-SECTION BASED ON A REFINED NONLINEAR CALCULATION METHOD

82

CHEMICAL TECHNOLOGY

Peristy V.A., Chuev V.P., Buzov A.A., Peristaya L.F.

DEVELOPMENT OF THE RUSSIAN PRODUCTION TECHNOLOGY OF HIGH CLEARANCE GEL-LIKE AQUATIC POLYACRYLIC ACID (PAA)

92

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Hurtasenko A.V., Chuev K.V., Voloshkin A.A., Cherednikov I.I., Gavrilov D.V.

OPTIMIZATION OF DESIGN PARAMETERS OF ROBOTIC PLATFORMS AND IMPLEMENTATION OF THE TRAJECTORY OF MOTION

101

Romanovich A.A., Dukhanin S.A., Romanovich M.A.

METHODS OF INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF THE WORKING BODIES OF A ROTARY-VORTEX MILL

116

К 50-ЛЕТИЮ КАФЕДРЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

История кафедры начинается с секции ПГС, и образована кафедра приказом № 22 от 10 января 1972 года Министерства высшего и среднего специального образования СССР.

Сегодня кафедра строительства и городского хозяйства празднует свое 50-летие!

В разное время заведующими кафедрой были известные в строительной области специа-

листы: А.Г. Юрьев, Л.Н. Фомица, О.М. Донченко, В.И. Колчунов, Г.А. Смоляго, Н.В. Солодов, Н.В. Калашников. С 2016 года – заведующий кафедрой – доктор технических наук, профессор, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Заслуженный деятель науки и образования, Инженер года-2018 Людмила Александровна Сулейманова.



Кафедра строительства и городского хозяйства является базовой кафедрой направления «Строительство» и реализует многоуровневую подготовку студентов специалитета, бакалавриата, магистратуры, среднего профессионального образования и аспирантуры. На кафедре ведется подготовка инженерных кадров по специальности 08.05.01 – Строительство уникальных зданий и сооружений, бакалавров по направлению 08.03.01 – Строительство профилям «Промышленное и гражданское строительство», «Городское строительство и хозяйство» и «Техническая эксплуатация объектов жилищно-коммунального хозяйства», магистров по направлению 08.04.01 – Строительство по образовательным программам «Теория, проектирование и информационное моделирование зданий и сооружений», «Технологии, организация и информационное моделирование строительства», «Техническая эксплуатация и реконструкция объектов

жилищно-коммунального хозяйства», «Комплексная безопасность и ресурсосбережение объектов жилищно-коммунального хозяйства», аспирантов по специальностям 2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения и 2.1.5 – Строительные материалы и изделия. Также кафедра ведет подготовку специалистов среднего профессионального образования колледжа высоких технологий по специальности 08.02.11 – Управление, эксплуатация и обслуживание многоквартирного дома.

В 2018 году за высокие достижения кафедре строительства и городского хозяйства присвоено звание «Золотая кафедра России» (Приказ № 01819, 16.11.2018 г.). В 2020–2021 учебном году крупнейшим и авторитетнейшим органом профессиональной общественной аккредитации в образовательном пространстве РФ – Ассоциацией инженерного образования России –

успешно аккредитована образовательная программа бакалавриата «Промышленное и гражданское строительство», реализуемая на кафедре строительства и городского хозяйства. Финальный этап аккредитации подтвердил высокий статус материально-образовательной базы, компетентность профессорско-преподавательского состава, актуальную практикоориентированность, мотивированность и вовлеченность студентов в научно-образовательный процесс, получение новых знаний и навыков. Программа подготовки бакалавров «Промышленное и гражданское строительство» признана соответствующей требованиям Вашингтонского соглашения.

Сегодня на кафедре СиГХ обучается 700 студентов очной, 54 – очно-заочной, 850 студентов заочной с применением дистанционной формы из Российской Федерации и более 35 стран ближнего и дальнего зарубежья, всего свыше 300 человек. Отдельно стоит отметить растущий с каждым годом контингент иностранных студентов, обучающихся на английском языке, на сегодняшний день их насчитывается более 150.

Кафедра имеет современную учебную и научную материально-техническую базу. Это позволяет сотрудникам кафедры активно участвовать в инновационном развитии строительной отрасли региона и страны в целом путем выполнения научно-исследовательских работ и решения прикладных задач.

Совершенствование содержания и качества подготовки инженерных кадров потребовало от кафедры СиГХ новых форм и методов работы, обеспечивающих связь с производством, сотрудничество с работодателями. Одним из них стало создание базовых кафедр на профильных предприятиях и в строительных организациях; другим – организация сетевого и междисциплинарного взаимодействия на основе договоров о сотрудничестве. Для создания условий для закрепления молодежи и специалистов в регионе большое внимание кафедра строительства и городского хозяйства уделяет применению инновационных методов и технологий в обучении, в их числе – интерактивное обучение, создание лабораторий удаленного доступа, развитие средств и методов проведения дистанционных лекториев и курсов повышения квалификации. Особенно плотная работа ведется с крупнейшими компаниями: «ТехноНиколь», «Bonolit Academy», «PERI» и многими другими. Специалисты этих предприятий ежегодно проводят для студентов мастер-классы, выездные занятия на объекты, строительные площадки, показательные мероприятия по надзору за капитальным ремонтом многоквартирных домов.

Кафедра активно участвует в реализации межвузовских программ по обеспечению академической мобильности студентов и преподавателей с выдачей двойных дипломов. Программы имеются не только с отечественными, но и с зарубежными вузами (Китай, Сербия, Беларусь, Узбекистан). Кафедрой строительства и городского хозяйства разрабатывается программа дополнительного профессионального образования в области цифрового инжиниринга, в финале которой студенты также смогут обучаться по программе двойного дипломирования.

Престижность и востребованность инженера-строителя подтверждается и высоким конкурсом на вступительных испытаниях в БГТУ им. В.Г. Шухова и 100 % трудоустройством выпускников данной специальности в различных регионах страны.

Профессорско-преподавательский состав кафедры можно назвать одним из лучших в университете, так как имена его представителей известны далеко за пределами Белгорода и Белгородской области. Это высококвалифицированные ученые и одновременно инженеры-практики.

На кафедре СиГХ работают: 8 докторов наук, профессоров, 21 кандидат наук, 18 доцентов, 6 старших преподавателей, 4 ассистента, среди которых, Академик Международной инженерной академии по специальности «Строительство и архитектура» – Абсиметов В.Э., член корреспондент РААСН – Меркулов С.И., советник РААСН – Смоляго Г.А., аттестованный член Британского международного института гражданских инженеров – Донченко О.М.

Профессорско-преподавательским составом за последние пять лет издано более 30 учебных пособий и 40 методических указаний. По результатам научных исследований издано свыше 40 монографий, опубликовано свыше тысячи статей. Активно кафедра работает и в сфере создания объектов интеллектуальной деятельности, об этом говорят более 35 патентов на изобретения и полезные модели.

Ведущие ученые кафедры СиГХ выполняют научно-исследовательские работы по приоритетным направлениям:

- технологии информационного моделирования жизненного цикла объектов капитального строительства;
- конструктивная безопасность зданий и сооружений, прочность, жесткость и трещиностойкость сборно-монолитных железобетонных конструкций, в том числе с учетом коррозионных повреждений;

- прочность, жесткость и трещиностойкость сжатых и изгибаемых железобетонных элементов, в том числе с применением высокопрочных материалов;

- действительная работа и совершенствование методов расчета и конструктивных решений элементов стальных каркасов;

- теория прочности каменных и армокаменных конструкций;

- инновационные организационно-технологические решения по возведению зданий и сооружений;

- свайное фундаментостроение, в том числе на слабых и просадочных грунтах;

- строительное материаловедение, высококачественные ресурсосберегающие и конкурентоспособные строительные материалы и изделия, технологии их производства;

- мониторинг, обследование, усиление и реконструкция зданий и сооружений.

На кафедре функционируют и позволяют решать актуальные проблемы в области строительства и жилищно-коммунального хозяйства 5 научно-исследовательских лабораторий: «Обследование, усиление, реконструкция и инжиниринг зданий и сооружений», «Конструктивная безопасность зданий и сооружений», «Экспертиза и мониторинг технического состояния зданий и сооружений», «Технический мониторинг строительства и жилищно-коммунального хозяйства», «Научно-технический центр Жилищно-коммунального комплекса», «Экспертно-инжиниринговый центр».

На кафедре создан и успешно функционирует научно-методический центр профессионального образования специалистов в области строительства и жилищно-коммунального комплекса. В рамках работы центра производится повышение квалификации по актуальным для современного строительства и жилищно-коммунального комплекса направлениям: практико-ориентированные программы непрерывного дополнительного профессионального образования для специалистов в области цифровых технологий в строительстве; безопасность строительства и осуществление строительного контроля; основы бережливого управления; управление городом; актуальные вопросы управления жилищно-коммунальным комплексом; современные технологии в строительстве; цифровое управление строительной площадкой и многие другие.

Кафедра активно внедряет в учебный процесс информационное моделирование. Преподаватели кафедры – сертифицированные специалисты таких комплексов как «Tekla Structures» и «ЛИРА-САПР». Для расчетов строительных

конструкций применяются моделирование в средах «ANSYS» и SCAD. На помощь начинающим специалистам в области технологии строительного производства приходят программы «GENPRO» и «Synchro PRO».

Под руководством преподавателей в научных исследованиях активно участвуют студенты. По результатам таких работ победителями и призерами международных и общероссийских конкурсов неоднократно становились бакалавры и магистры кафедры СиГХ. Ими ежегодно публикуются более 100 статей и докладов на международных и российских конференциях. Только за прошедший год студенты и молодые ученые кафедры строительства и городского хозяйства стали лауреатами конкурсов, таких как «УМНИК», «Кубок молодых инноваторов», «Международного профессионального конкурса НОПРИЗ» и многих других.

Традиционно достойно представляют кафедру студенты и выпускники в конкурсах выпускных квалификационных работ, конкурсах по специальности, в предметных олимпиадах, как на региональном, так и на российском уровнях, становились их победителями и призерами.

Активная позиция по привлечению молодежи в работу кафедры, создание профориентационного научно-технического творческого центра «Созидатель», Студенческого совета строителей способствовало оказанию профориентационной поддержки учащимся общеобразовательных учреждений и молодежи, а также созданию условий, способствующих их компетентностному профессиональному самоопределению, которое позволяет в полной мере раскрыть способности, использовать возможности, реализоваться как личности, в полной мере ощутить востребованность обществом. Популяризация строительной деятельности путем использования активных, интерактивных, аддитивных технологий в обучении с целью ознакомления с миром строительных профессий молодежи и учащихся образовательных учреждений с учетом их возрастных различий. Выявление способных к строительной деятельности учащихся и молодежи и содействие в подготовке их не только как специалистов, обладающих широчайшим диапазоном профессиональных знаний, но и высоким морально-нравственным уровнем и, как следствие, большой ответственностью за порученное дело.

Благополучие государства напрямую зависит от успехов в развитии рынка идей, изобретений, открытий, от способности государства и общества находить и поощрять талантливых и креативно мыслящих людей, воспитывать молодежь в духе интеллектуальной свободы и гражданской активности.

Учеными кафедры установлены и поддерживаются тесные связи с научно-исследовательскими организациями и ведущими вузами нашей страны, а также стран ближнего и дальнего зарубежья.

Кафедра СиГХ ставит перед собой в перспективе решения следующих задач:

- повышение квалификации ППС, организация стажировок в ведущих вузах страны, в т.ч. в зарубежных организациях;

- повышение эффективности работы аспирантов кафедры, увеличение объемов научных исследований из всех источников финансирования;

- повышение роли кафедры СиГХ в работе строительного и жилищно-коммунального комплекса Белгородской области в части подготовки кадров и повышения эффективности его функционирования;

- повышение уровня научных публикаций и научных исследований, увеличение количества издаваемых монографий;

- совершенствование материально-технической базы кафедры для научных исследований и учебного процесса;

- расширение сотрудничества с родственными вузами, в т.ч. в рамках сетевого взаимодействия;

- расширение международной деятельности кафедры, увеличение численности иностранных студентов, в т.ч. обучающихся на английском и других языках;

- совершенствование научно-методического обеспечения учебного процесса по всем уровням и формам обучения;

- внедрение практикоориентированных технологий обучения и создание авторских и междисциплинарных курсов;

- совершенствование содержания и форм внеучебной деятельности студентов, направленных на формирование лидерских качеств, гражданских позиций, моральных ценностей.

Кафедра строительства и городского хозяйства – это кафедра со славной историей, уникальными профессиональными и академическими традициями, прикладывающая много усилий для единства коллектива, совершенствования мастерства, достижения научных результатов, создания атмосферы требовательности, принципиальности и преданности науке и образованию.

*Л. Сулейманова,
заведующий кафедрой строительства
и городского хозяйства, доктор технических
наук, профессор*

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-12-24

^{1,*}Сулейманова Л.А., ²Сапожников П.В., ³Кривчиков А.Н.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²ООО «ГК ЭкспертПроектСтрой»³ООО «ПУ-ЖБК-1»

*E-mail: kafedrasigsh@mail.ru

ЦИФРОВИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ КАК ИТ-СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПИРАМИДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос внедрения процессов цифровизации строительной отрасли в рамках государственной программы «Цифровая экономика Российской Федерации». Анализ текущего развития цифровизации показал необходимость взаимодействия всех участников управления объектами капитального строительства. На уровне государственных органов управления переход к цифровизации проводится за счет ведения электронного документооборота и выдаче разрешительных документов на строительство в электронном виде. Заказчик должен посредством цифровизации проектных и строительных работ видеть текущее положение дел на каждом этапе строительства. Генеральный подрядчик заинтересован в мониторинге работы подрядных организаций и снижении материальных затрат. Проектная организация, разрабатывая единую цифровую информационную модель здания, упрощает процессы создания чертежей, спецификаций и исправления ошибок смежных отделов. На уровне производства работ на строительной площадке процессы цифровизации развиты меньше всего. Цифровизация производства работ позволит ускорить процессы контроля поставки грузов, работы исполнителей и механизмов, облегчит ведение журналов работ и исполнительной документации. В результате цифровизация каждого процесса строительства приведет к улучшенному взаимодействию участников, а также к эффекту «синергии».

Ключевые слова: цифровизация, технология информационного моделирования (ТИМ), объект капитального строительства.

Введение. Развитие Российской Федерации связано с острой необходимостью перехода на новую модель экономического развития с применением интеллектуального потенциала человека. В 2017 году в рамках Стратегии развития информационного общества была принята государственная программа «Цифровая экономика Российской Федерации», которая предусматривает использование цифровых технологий во всех сферах деятельности [1].

Конфигурация глобальных рынков претерпевает значительные изменения под действием цифровизации. Многие традиционные индустрии теряют свою значимость в структуре мировой экономики на фоне быстрого роста секторов, генерирующих кардинально новые потребности. Определяющее значение в происходящей трансформации приобретают исследования и разработки, для которых требуется создание системы управления в области цифровой экономики, обеспечивающей координацию усилий заинтересованных сторон – представителей федеральных органов исполнительной власти, проектных и строительных организаций, образовательных учреждений и научных объединений.

Цифровая экономика определяется тремя характерными процессами:

- интенсивное использование цифровых технологий;
- новые способы ведения бизнеса;
- новая добавленная стоимость.

Во всем мире строительная отрасль занимает около 8–10 % от валового внутреннего продукта стран, обеспечивает занятость трудового населения и выступает связующим звеном между различными отраслями промышленности и экономики [2]. Однако доля процессов с применением цифровых технологий в строительной отрасли меньше, чем в других сферах народного хозяйства, таких как торговля, автомобилестроение, банковский сектор и государственное управление [3].

Анализ литературных источников по тематике исследования показал, что причинами, препятствующими развитию цифровых технологий в строительной отрасли являются плохая осведомленность об эффективности применяемых технологий, отсутствие опыта ведения строительства в цифровой среде, неосмысленное взаимодействие всех участников на различных уровнях управления объектами капитального строительства, материальные трудности, связанные с обучением работников, техническим улучше-

нием используемого технического оборудования, покупкой новых программных продуктов, опасения распространения конфиденциальной информации из облачных хранилищ и др. [3–11]. Цель данного исследования – обосновать эффективность внедрения цифровых технологий на всех уровнях управления объектами капитального строительства.

В строительстве цифровизация подразумевает собой создание единого информационного пространства на всех стадиях проектирования, возведения и эксплуатации объектов капитального строительства с целью снижения себестоимости готового продукта и сокращения сроков его производства с учётом всех основных и сопутствующих процедур. К перспективным направлениями цифровой трансформации строительной отрасли можно отнести технологию информационного моделирования (ТИМ), 3D-печать материалов и конструкций, технологию дополненной и виртуальной реальности, интернет вещей (IoT), применение робототехники.

ТИМ зданий и сооружений позволяет создать «цифрового двойника» проектируемого

или существующего здания, с полным комплектом сведений и материалов, формируемых в электронном виде на этапах выделения земельных участков, выполнения инженерных изысканий, осуществления архитектурно-строительного проектирования, строительства, реконструкции, капитального ремонта, эксплуатации и (или) сноса объекта капитального строительства [13, 14]. Соответственно, ТИМ осуществляется при одновременном применении систем автоматизированного 3D-проектирования и методов компьютерной поддержки жизненного цикла здания (Continuous Acquisition and Lifecycle Support – CALS) [15].

В России ТИМ стала применяться относительно недавно, однако уже сейчас доказана ее эффективность применения в строительной сфере. По данным опроса, проведенного ООО «Институт развития строительной отрасли» у 246 проектных и строительных организаций (рис. 1), процесс цифровизации в виде использования ТИМ позитивно сказался на экономических и качественных показателях предприятий [16].



Рис. 1. Результаты опроса о преимуществах применения ТИМ в строительстве

Процесс 3D-печати в строительстве основан на аддитивной технологии, то есть на процессе послойного наложения пластичного материала до образования твердых материалов необходимой формы с использованием компьютерных моделей объекта производства [17]. Наиболее распространенным материалом для 3D-печати является бетон, однако также популярность набирает изготовление изделий из стеклопластика и стали. Возможной стала автоматизация изготовления армированных бетонных изделий [18].

Интернет вещей (IoT) – технология для постоянного мониторинга состояния строительного объекта и удаленного управления строительными процессами. Технология основана на внедрении интегрированных систем датчиков состояния здания, контролирующих основные строительные параметры, энергоэффективность, состояние инфраструктурных сетей, перемещение людей [19, 20].

Применение средств дополненной и виртуальной реальности (AR и VR) раскрывает возможности наглядного осмотра проектируемых и

строящихся объектов [21]. Актуальное применение данной технология находит в строительном контроле. Инженер строительного контроля, при наличии

VR-очков, имеющих встроенный GPS-приемник, в режиме реального времени обходит строительную площадку и анализирует наложенные системой проектные данные на реальное изображение установленной конструкции или части инженерной сети [22].

Набирает обороты использование средств робототехники в строительстве. Применение роботов, работающих совместно с человеком при

производстве строительных работ ускоряет выполнение технологических процессов [23]. Воздушные беспилотные летательные аппараты используются для контроля соответствия результатов строительства площадок объектов проектным решениям [24].

Материалы и методы. На первом этапе в рамках данного исследования был проведен сбор и систематический анализ литературных источников для выявления проблем, возникающих при внедрении цифровых технологий в строительной отрасли (табл. 1).

Таблица 1

Проблема	Литературный источник	Период опубликования
Отсутствие опыта применения цифровых технологий	3, 6, 9	2019–2021 г.
Требуется доказательство эффективности, чтобы повлиять на консервативное мышление / использование традиционных методов	3, 4, 7, 11	2017–2021 г.
Вероятность потери конфиденциальности, связанной с использованием цифрового программного обеспечения	3, 7	2019–2021 г.
Высокая стоимость обучения работников	9	2018 г.
Высокая стоимость программного и аппаратного обеспечения	8, 10, 132	2017–2020 г.
Неполная совместимость существующих программных обеспечений, используемых при разработке разделов проектной документации	5	2014 г.
Строительная индустрия еще недостаточно ясно представляет, что такое BIM	11	2017 г.
Использование цифровых технологий приведет к сокращению рабочих мест	3	2019 г.

На основе анализа литературных источников были обозначены возможные пути обеспечения

цифровой трансформации строительства (табл. 2).

Таблица 2

Направления цифровой трансформации строительства	Литературный источник	Период опубликования
Технология информационного моделирования (ТИМ)	13–16, 27–37	2016–2021 г.
3D-печать строительных материалов и конструкций	17, 18	2019–2020 г.
Технологии дополненной и виртуальной реальности	21, 22, 33	2019–2021 г.
Интернет вещей (IoT)	19, 20	2017–2020 г.
Применение робототехники	23, 24	2020 г.

Технология информационного моделирования была выбрана основным методом трансформации строительной отрасли, преимущества которой подтверждены на основании опроса большого количества ведущих проектных и строительных организаций. Распределение управленческих функций в условиях новой цифровой экономики было изучено на основе социальной пирамиды взаимодействия Толкотта Парсонса.

В рамках исследования было изучено практическое применение цифровой трансформации строительной отрасли на примере завода по изготовлению железобетонных изделий «ПУ-ЖБК-1».

Основная часть. В строительстве, как и в других отраслях, вне зависимости от количества уровней управления, согласно пирамиде Пар-

сонса (рис. 2), можно выделить три вида управления: институциональный, управленческий и технический [25]. На техническом уровне ответственные лица занимаются операциями, обеспечивающими непосредственное производство готового продукта. В строительстве к такому виду можно отнести управление при выполнении инженерных изысканий, проектировании, производстве работ и технической эксплуатации. На управленческом уровне главной особенностью является координация, согласование всех видов работ технического уровня. Руководители институциональных уровней разрабатывают масштабные и долгосрочные планы внутри отрасли, обеспечивают взаимодействие с другими отраслями народного хозяйства. В результате, осознанное выполнение локальных функций работника (ру-

ководителя) каждого уровня и слаженное взаимодействие с другими уровнями обеспечивает синергичное выполнение поставленных целей.

На уровне органов государственной власти перспективным направлением развития цифровизации является создание единой информационной платформы, которая в автоматическом ре-

жиме позволит пользователю (участнику инвестиционно-строительного процесса) в личном кабинете заполнить заявление, прикрепить необходимые документы и получить разрешения на выделение земельного участка, разрешение на строительство, ввод объекта в эксплуатацию с временным отслеживанием процессов, установленным законом.

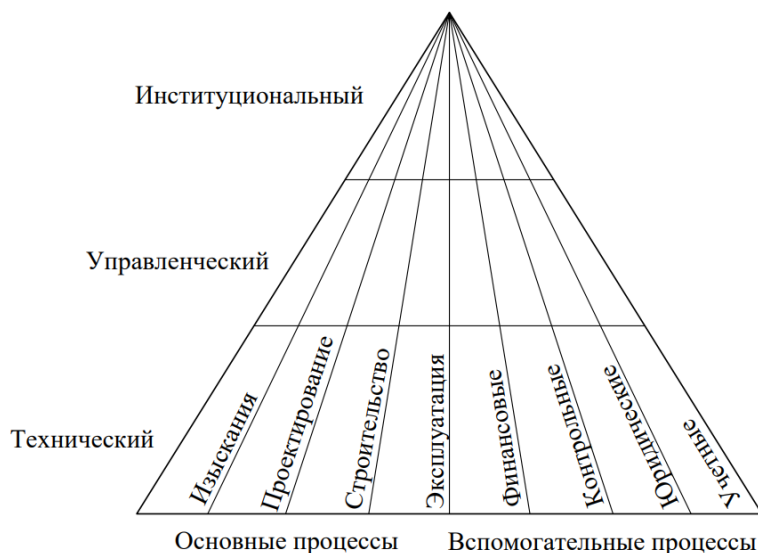


Рис. 2. Пирамида управления строительными процессами

Основой информационной платформы должна быть сформированная база актуальных и подробных данных о земельных участках, санитарных зонах, существующей проектной и исполнительной документации в виде информационной модели здания, государственных экспертизах, технических условиях и других документов, регламентирующих строительство.

Совмещение данных трехмерного рельефа городской среды с существующими искусственными сооружениями и расположенными на нем информационными моделями зданий создаст базу для проекта «б» [26], и позволит эффективнее управлять городскими ресурсами и повысить качество жизни граждан.

Частой проблемой, которая возникает у заказчика при классическом управлении строительством, является неосведомленность о производстве работ при реализации проекта. Именно заказчик заинтересован в соблюдении срока сдачи объекта, и он должен быть инициатором ведения строительных процессов с помощью цифровых технологий. Использование цифровых программ управления и сервисов облачного хранения файлов проекта, программ календарного планирования поможет заказчику видеть текущее положение дел на площадке и оценить пути решения проблем, замедляющих сдачу объекта в положенные сроки [27].

Изначальная необходимость о ведении проектных и строительных работ в цифровом формате должна быть отображена в техническом задании и информационных требованиях заказчика (рис. 3), описывающих правила предоставления информации по ключевым этапам проекта и содержащих технические, организационно-управленческие и коммерческо-правовые аспекты [28]. Реализация этих требований обеспечивается за счет соблюдения нормативно-технических документов, использования современных архитектурных и конструктивных решений, энергоэффективных материалов и оборудования, с использованием цифровых технологий, включая ТИМ.

Для генеральных подрядчиков цифровизация позволяет построить совершенно новые бизнес-модели, что дает ряд преимуществ [29, 30]:

- снижение рисков при выборе подрядных организаций, выполняющих капитальное строительство, контроль исполнения договорных обязательств;
- наполнение информационной модели, электронный документооборот с подрядчиками и другими участниками инвестиционно-строительного процесса;
- заказ строительных материалов непосредственно из ТИМ-моделей, что даст возможность интегрировать цифровые технологии в су-

ществующие системы закупок и привлечь к работе с информационными моделями большое количество поставщиков, в том числе представителей малого бизнеса [31];

- получение аналитики по подрядчикам, в том числе с учетом выполнения ими контрактов других заказчиков;
- снижение затрат за счет своевременного выполнения контрактов, мониторинга хода строительства.

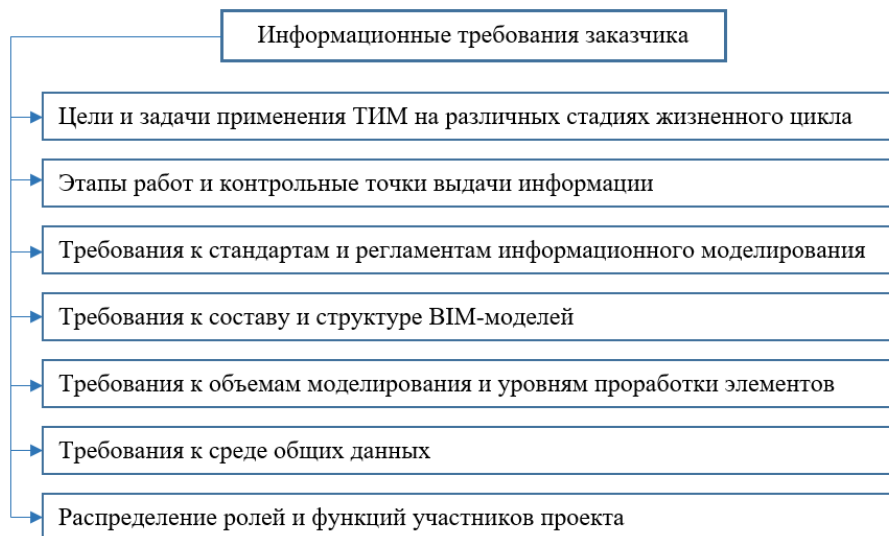


Рис. 3. Информационные требования заказчика к осуществлению ТИМ-проекта

Базовым документом, определяющим объект капитального строительства и все его характеристики, является проектная документация. Реализация проекта с применением ТИМ – это более эффективная альтернатива традиционному способу реализации проекта. Созданная модель является не только объемным выражением двухмерного чертежа и геометрических данных здания, она имеет дополнительную информацию о всех процессах архитектурного и конструктивного проектирования, расчетов конструкций, производства работ (4D), материальных затратах (5D) и мониторинге технического состояния здания (6D) [32].

Внедрение ТИМ на уровне проектной организации позволяет:

- использовать исходные данные на проектирование объекта капитального строительства из информационной платформы;

- повысить наглядность и качество проекта за счет объемного моделирования, виртуальной и дополненной реальности [33];

- в автоматическом режиме получить чертежи и спецификации из единой информационной модели (рис. 4) [34];

- посредством среды общих данных одновременно проектировать все разделы рабочей документации, в том числе проект организации строительства, проект производства работ и сметную документацию;

- использовать единую библиотеку готовых решений в виде разработанных семейств элементов;

- вести проектирование территориально отдаленными коллективами;

- отслеживать внесение изменений и посредством координирования, оперативно устранять пространственные коллизии до реализации модели на строительной площадке.

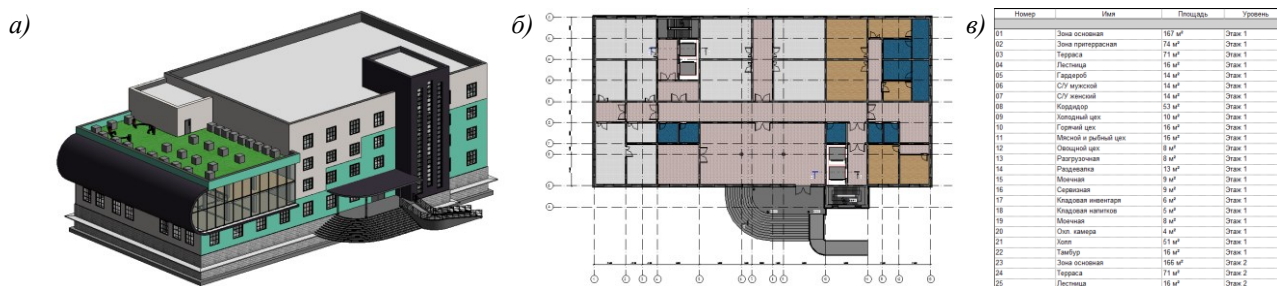


Рис. 4. Вывод необходимой документации из единой модели здания:

а – информационная модель; б – план типового этажа; в – спецификация помещений

При классической схеме разработки документации основным разработчиком документации является проектировщик отдельной специализации. Применение ТИМ в строительной организации основывается на другой модели, первым звеном команды является разработчик семейств различных элементов здания, проектировщик же собирает имеющиеся семейства в единую модель

конкретного раздела, которую вместе с другими моделями соединяет ТИМ-координатор, находя несоответствия и пересечения элементов различных разделов. Управляет всем процессом создания модели ТИМ-менеджер посредством системы облачных данных. Схема управления и взаимодействия проектной организации с помощью ТИМ представлена на рис. 5.



Рис. 5. Схема управления команды при разработке проектной документации с помощью ТИМ-моделирования

Инструментов для создания информационной модели проектирования достаточно много. Среди них можно выделить наиболее распространенные на российском рынке Autodesk Revit, Renga Software, Tekla Structures, ПК САПФИР, ANSYS, ABAQUS, Navisworks, Synchro Pro, 1C EPR и другие [35-37]. Однако нет таких, которые бы охватили весь процесс разработки проектной документации. Что бы облегчить взаимодействие различных программ между собой, был создан единый формат данных IFC.

Заводы-изготовители строительных конструкций и изделий переходят на качественно новый этап производства продукции. К примеру, заводы железобетонных изделий и крупнопанельного домостроения оснащены конвейерными технологиями горизонтального производства плоских изделий. Из конструктивной информационной модели стеновой панели в программе для станков с числовым программным управлением генерируются технологические карты и суточные задания на производство конкретных панелей (рис. 6).

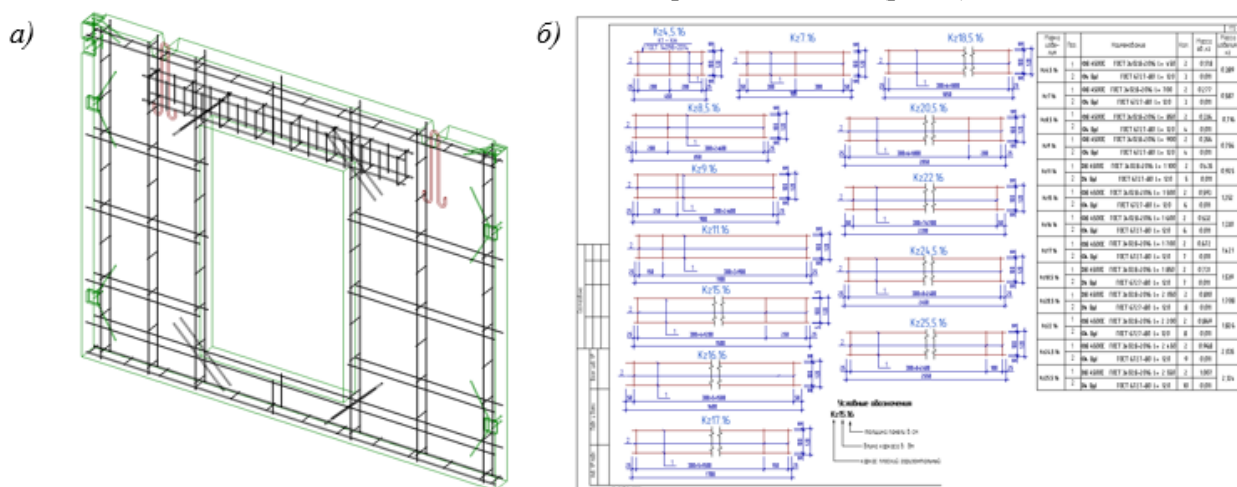


Рис. 6. Конструктивная информационная модель стеновой железобетонной панели:
а – 3D-вид, б – сборочный чертеж

Установка бортоснастки на поддоны, разметка мест проеомообразователей, монтажных петель, закладных деталей и скрытой электропро-

водки выполняется на основе информации габаритных размеров модели и открытой библиотекой типовых арматурных элементов, узлов соединений и закладных деталей (рис. 7).

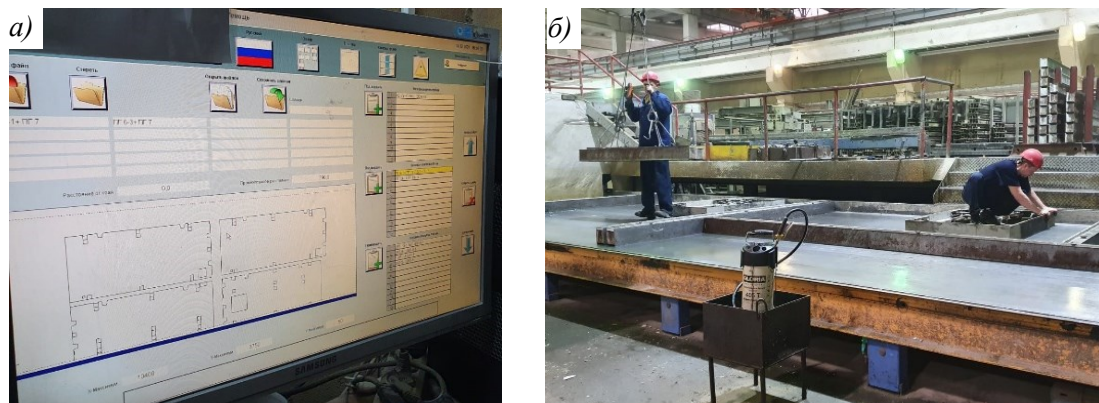


Рис. 7. Производство стеновых панелей:

а – заданная схема для бетононасоса, б – процесс укладки проеомообразователей

Сборка арматурных каркасов из отдельных стрежней различных классов и диаметров, работа автоматизированного бетоноукладчика выполняются в строгом соответствии со спецификациями на конкретное изделие. Это позволяет снизить отходы производства, за счёт понимания точного количества арматуры на производство каких именно каркасов необходимо сделать в данный промежуток времени (рис. 8).

После выполнения суточной программы производства и отгрузки изделий на строительную площадку все необходимые данные передаются в программу 1С ЕРР, которая учитывает уменьшение складских запасов материалов и прогнозирует сроки необходимого пополнения расходуемых материалов (цемент, песок, щебень, арматура и др.).

В наименьшей степени процессы цифровизации затронули производство строительных работ. При приемке грузов на строительную площадку паспорта и сертификаты от поставщиков зачастую не приходят сразу с материалом, производители работ фиксируют выполнение работ в записных книжках, задачи работникам выдаются по месту. Позже вручную заполняются журналы работ и акты освидетельствования скрытых работ, тратится много времени и сил. Исполнительная документация преимущественно выполняется вручную, по этапам выполнения работ, в результате чего изменения от проекта, возникшие в процессе производства работ, попадают к проектной организации значительно позже в бумажном виде. Грамотная и поэтапная цифровизация всех процессов, выполняемых на строительной площадке, позволит ликвидировать данные проблемы.



Рис. 8. Разрезка стержней на станке с числовым программным управлением для арматурных каркасов

Задачи при управлении на строительной площадке, которые может решить цифровизация строительных процессов:

- контроль доставки и складирования грузов на строительной площадке;
- контроль движения исполнителей и машин по объекту строительства с помощью датчиков передачи геоданных;
- контроль сроков, объемов и качества строительства [38];
- ведение исполнительной документации в электронном виде;
- автоматизированный строительный контроль с помощью VR-технологий;
- дистанционная диагностика машин и механизмов;
- дистанционное обслуживание инженерного оборудования здания;

– переход от продажи к сервисной модели, согласно которой оплачивается результат работы и фактическое использование строительного оборудования и техники.

Мобильные технологии изменили строительную индустрию несколькими способами. Для строительных подрядчиков одним из самых главных удобств является улучшение управления проектами. Используя смартфоны и планшеты, все заинтересованные стороны могут работать вместе, используя одни и те же консолидированные источники информации, гарантируя, что никто не останется в стороне, независимо от того, где они находятся. На сегодняшний момент существуют разработки программных продуктов, упрощающих процесс производства работ (рис. 9).

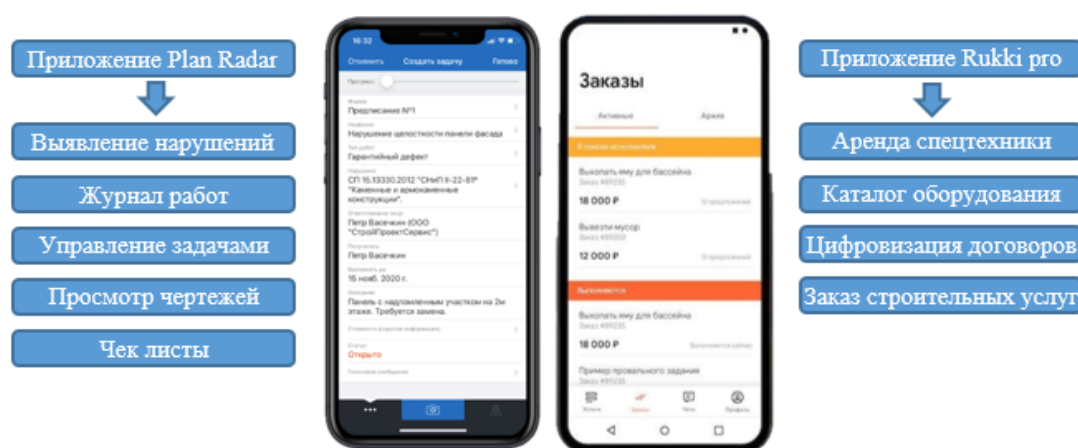


Рис. 9. Приложения для ведения строительных работ на строительной площадке

Пример такого продукта – приложение Plan Radar, с которым производитель работ, не присутствуя на участке, с помощью мобильного устройства может в любой момент отобразить актуальные рабочие чертежи, вести журнал работ с чек-листами, поставить задачу рабочему в виде метки на плане с комментариями и фотографиями. Мобильный сервис Rukki pro предоставляет возможность аренды спецтехники и оборудования, а также выполнения логистических услуг и некоторых видов строительных работ.

Выводы. Цифровая трансформация является необходимым шагом для устойчивого развития экономики и строительной отрасли. Анализ существующих проблем, препятствующих развитию цифровых технологий показал неосведомленность участников строительного процесса о сущности и эффективности проведения цифровизации и о правильном взаимодействии на различных уровнях управления объектами капитального строительства.

Применение современных цифровых технологий, таких как ТИМ, 3D-печать, интернет вещей, дополненная и виртуальная реальность, робототехника на стадиях проектирования и строительства позволит ускорить возведение, уменьшить трудовые и материальные затраты на всех стадиях жизненного цикла строительных объектов. При этом правильное взаимодействие участников строительного процесса на различных уровнях управления позволит достичь синергетического эффекта от цифровой трансформации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Указ Президента РФ № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы». Собрание законодательства Российской Федерации, № 20. 2017. 2901 с.
2. Dixit S., Mandal S.N., Sawhney A., Singh S. Relationship between skill development and

productivity in construction sector: a literature review // *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 2017. Vol. 8 (8) Pp. 649–665. doi:10.1007/978-3-030-42351-3_36

3. Борисова Л. А., Абидов М. Х. Проблемы цифровизации строительной отрасли // *УЭПС: управление, экономика, политика, социология.* 2019. № 3. С. 53–58.

4. Gerrish T., Ruikar K., Cook M., Johnson M., Phillip M., Lowry C., BIM application to building energy performance visualisation and management: challenges and potential // *Energy Build.* 2017. Vol. 144. Pp. 218–228. doi:10.1016/j.enbuild.2017.03.032

5. Anton L.A., Diaz J., Integration of life cycle assessment in a BIM environment // *Procedia Eng.* 2014. Vol. 85. Pp. 26–32. doi:10.1016/j.pro-eng.2014.10.525

6. Durdyev S., Mbachu J., Thurnell D., Zhao L., Hosseini M.R., BIM adoption in the Cambodian construction industry: key drivers and barriers // *ISPRS Int. J. GeoInf.* 2021. Vol. 10. 215. doi:https://doi.org/10.3390/ijgi10040215

7. Танько В.Д., Калинина Д.А., Савина В.А. Тенденции цифровизации в строительной сфере // *Экономика и предпринимательство.* 2021. № 2(127). С. 184–187. doi:10.34925/EIP.2021.127.2.033.

8. Ahmed S. Barriers to implementation of building information modeling (BIM) to the construction industry: a review // *J. Civil Eng. Construct.* 2018. Vol. 7. Pp. 107–113. doi:10.32732/jces.2018.7.2.107

9. Jang R., Collinge W., Improving BIM asset and facilities management processes: a Mechanical and Electrical (M&E) contractor perspective // *J. Build. Eng.* 2020. Vol. 32. 101540. doi:10.1016/j.jobbe.2020.101540

10. Sun C., Jiang S., Skibniewski M.J., Man Q., Shen L., A literature review of the factors limiting the application of BIM in the construction industry // *Technol. Econ. Dev. Econ.* 2017. Vol. 23. Pp. 764–779. doi:10.3846/20294913.2015.1087071

11. Ghaffarianhoseini A., Tookey J., Ghaffarianhoseini A., Naismith N., Azhar S., Efimova O., Raahemifar K. Building Information Modelling (BIM) uptake: clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017. Vol. 75. Pp. 1046–1053. doi:10.1016/j.rser.2016.11.083

12. Сыроваткина Т.Н. Цифровизация производственной инфраструктуры экономики строительства // *Фундаментальные исследования.* 2020. № 4. С. 104–108. doi:10.17513/fr.42732

13. Сулейманова Л.А., Сапожников П.В. Реализация учетной политики в строительстве с использованием цифровых технологий // *В сб.: Тех-*

нологии информационного моделирования. Жизненный цикл объекта. М.: Изд-во МГСУ, 2021. С. 5–16.

14. Rafsanjani H., Nabizadeh A.H. Towards Digital Architecture, Engineering, and Construction (AEC) Industry through Virtual Design and Construction (VDC) and Digital Twin // *Energy and Built Environment.* 2021. Vol. 2.

15. Каракозова И.В., Малыха Г.Г., Куликова Е.Н., Павлов А.С., Панин А.С. Организационное сопровождение BIM-технологий // *Вестник МГСУ.* 2019. Т. 14. №12. С. 1628–1637. doi:10.22227/1997-0935.2019.12. 1628-1637

16. Итоги опросов проектировщиков и изыскателей по использованию BIM-технологий // *Единый ресурс застройщика.* 2019 [Эл. ресурс]. URL: <https://erzrf.ru/news/itogi-oprosoy--proyektirovshchikov-i-izyskateley-po-ispolzovaniyu-bim-tekhnologiy?regions=> (дата обращения: 10.11.2021).

17. Lee D., Kim H., Sim J., Lee D., Cho H., Hong D. Trends in 3D Printing Technology for Construction Automation Using Text Mining // *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2019. Vol. 20. P. 871–882. doi: 10.1007/s12541-019-00117-w

18. Classen M., Ungermann, J., Sharma R. Additive Manufacturing of Reinforced Concrete –Development of a 3D Printing Technology for Cementitious Composites with Metallic Reinforcement // *Appl. Sci.* 2020. No 10. Pp. 3791. doi:10.3390/app10113791

19. Колчин В.Н. Специфика применения технологии "интернет вещей" в строительстве // *Инновации и инвестиции.* 2017. № 5. С. 19–22.

20. Paul S., Naik B., Kumar Bagal D. Enabling technologies of IoT and challenges in various field of construction industry in the 5G Era: A review // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020. Vol. 970(1). P. 012019. doi:10.1088/1757- 899X/970/1/012019

21. Nassereddine H., Hanna A., Veeramani D. Exploring the current and future states of augmented reality in the construction industry // *International Conference on Construction in the 21st Century.* 2019. Pp. 185–189. doi:10.1007/978-3-030-48465-1_31

22. Тускаева З.Р., Албегов З.В. Осуществление строительного контроля с применением технологий информационного моделирования зданий и виртуальной реальности // *Инженерный вестник Дона.* 2021. № 2(74). С. 371–384.

23. Reinhardt D., Haeusler M.H., London K., Loke L., Feng Y., Barata E.D.O. Investigating the potential of collaborative robotics for subject matter experts // *International Journal of Architectural Computing.* 2020. Vol. 18(4). Pp. 353–370. doi: 10.1177/1478077120948742

24. Долгополов Д.В. Возможности использования беспилотных авиационных систем для контроля соответствия результатов строительства площадных объектов трубопроводного транспорта проектным решениям // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. 2020. Т. 25. № 4. С. 85–95. doi:10.33764/2411-1759-2020-25-4-85-95
25. Парсонс Т. Система современных обществ: пер. с англ. Л.А. Седова, А.Д. Ковалева. М.: Аспект-Пресс, 1997. 271 с.
26. Талапов В.В. Информационная модель – основа «умного города» // САПР и графика. Москва. 2018. № 11. С. 4–7.
27. Tallgren M.V., Roupé M., Johansson M. 4D modelling using virtual collaborative planning and scheduling // Journal of Information Technology in Construction (ITcon). 2020. Vol. 26. Pp. 763–782. doi:10.36680/j.itcon.2021.042
28. Талапов В. Роль технического заказчика в организации процесса информационного моделирования // САПР и графика. 2019. № 11(277). С. 4–12.
29. Бенклян С., Рогачёв И., Зобнин М., Баранник С., Миронюк В., Белец В. Руководство по информационному моделированию инфраструктурных объектов и формированию стандарта проектной организации с применением решений компании Autodesk. М. 2019. 201 с.
30. Chen Y.-R.H., Tserng P. An Integrated Methodology for Construction BIM & ERP by Using UML Tool // 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 2017. 6.
31. Гришина Н.М., Мицко Д.И. Разработка и внедрение BIM-стандарта: исследование методов управления в строительстве // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 3(41). С. 266–276.
32. Вайсман С.М., Байбурун А.Х. Разработка организационно-технологических решений в строительстве с использованием технологий информационного моделирования (ТИМ) // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Т. 16. № 4. С. 21–28. doi:10.14529/build160404
33. Тускаева З.Р., Албегов З.В. Осуществление строительного контроля с применением технологий информационного моделирования зданий и виртуальной реальности // Инженерный вестник Дона. 2021. № 2(74). С. 371–384.
34. Познахирко Т.Ю., Топчий Д.В. Особенности внедрения BIM в процесс разработки проектной документации // Строительное производство. 2020. № 1. С. 69–72.
35. Shick Alshabab M., Petrichenko M., Vysotskiy A., Khalil T. BIM-Based Quantity Take-off in Autodesk Revit and Navisworks Manage // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 70. Pp. 413–421. doi: 10.1007/978-3-030-42351-3_36
36. Задорожная А.В., Трофимова В.М., Аксенов Н.Б. Особенности использования BIM технологий при расчёте железобетонных конструкций // Инженерный вестник Дона. 2019. № 7(58). С. 18.
37. Bobrova T.V., Panchenko P.M. Техническое нормирование рабочих процессов в строительстве на основе пространственно-временного моделирования // Magazine of Civil Engineering. 2017. No 8(76). Pp. 84–97. doi:10.18720/MCE.76.8
38. Оцоков К.А. Инновационные технологии в строительстве и их использование в организационно-технологических мероприятиях // Строительные материалы и изделия. 2020. Т. 3. № 1. С. 7–13. doi:10.34031/2618-7183-2020-3-1-7-13

Информация об авторах

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

Сапожников Павел Владимирович, кандидат технических наук, директор ООО «ГК ЭкспертПроектСтрой». E-mail: info@expertps.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308000, г. Белгород, Харьковский пер., д. 36Г

Кривчиков Андрей Николаевич, директор ООО «ПУ-ЖБК-1». Россия, 308017, г. Белгород, ул. Кооперативная, д. 6.

Поступила 23.11.2021 г.

© Сулейманова Л.А., Сапожников П.В., Кривчиков А.Н., 2022

^{1,*}*Suleymanova L.A.*, ²*Sapozhnikov P.V.*, ³*Krivchikov A.N.*
¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova
²ООО «GC Expertproektstroy»
³ООО "PU-ZHBK-1"
 *E-mail: kafedrasigsh@mail.ru

DIGITALIZATION OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY AS IT-STRUCTURING OF THE PROCESS MANAGEMENT PYRAMID

Abstract. The article considers the issue of implementation of digitalization processes in the construction industry within the framework of the state program "Digital Economy of the Russian Federation". Analysis of the current development of digitalization has shown the need for interaction of all participants in the management of capital construction facilities. At the level of government authorities, the transition to digitalization is carried out through electronic document management and the issuance of permits for construction in electronic form. The customer must see the current state of affairs at each stage of construction through the digitalization of design and construction works. The general contractor is interested in monitoring the work of contractors and reducing material costs. By developing a single digital information model of a building, the design organization simplifies the processes of creating drawings, specifications and correcting errors of related departments. At the level of work on the construction site, digitalization processes are least developed. Digitalization of the production of works will speed up the processes of controlling the delivery of goods, the work of performers and mechanisms, will facilitate the maintenance of work logs and executive documentation. As a result, digitalization of each construction process will lead to improved interaction of participants, as well as to the effect of "synergy".

Keywords: digitalization, information modeling technology (IMT), capital construction object.

REFERENCES

1. Presidential Decree No. 203 "On the Strategy for the Development of Information Society in the Russian Federation for 2017-2030" [Ukaz Prezidenta RF № 203 «O Strategii razvitiya informacionnogo obshchestva v Rossijskoj Federacii na 2017-2030 gody»]. Sbornik zakonodatel'stva Rossijskoj Federacii. 2017. No. 20. 2901 p. (rus)
2. Dixit S., Mandal S.N., Sawhney A., Singh S. Relationship between skill development and productivity in construction sector: a literature review. *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 2017. Vol. 8 (8) Pp. 649–665. doi:10.1007/978-3-030-42351-3_36
3. Borisova, L. A., Abidov M. H. Problems of digitalization of the construction industry [Problemy cifrovizacii stroitel'noj otrasli] UEPS: upravlenie, ekonomika, politika, sociologiya. 2019. No. 3. Pp. 53–58. (rus)
4. Gerrish T., Ruikar K., Cook M., Johnson M., Phillip M., Lowry C., BIM application to building energy performance visualisation and management: challenges and potential. *Energy Build.* 2017. Vol. 144. Pp. 218–228. doi:10.1016/j.enbuild.2017.03.032
5. Anton L.A., Diaz J., Integration of life cycle assessment in a BIM environment. *Procedia Eng.* 2014. Vol. 85. Pp. 26–32. doi:10.1016/j.pro-eng.2014.10.525
6. Durdyev S., Mbachu J., Thurnell D., Zhao L., Hosseini M.R., BIM adoption in the Cambodian construction industry: key drivers and barriers. *IS-PRS Int. J. GeoInf.* 2021. Vol. 10. 215. doi:10.3390/ijgi10040215
7. Tanko V.D., Kalinina D.A., Savina V.A. Trends of digitalization in the construction sphere [Tendencii cifrovizacii v stroitel'noj sfere]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo.* 2021. No. 2(127). Pp. 184–187. doi:10.34925/EIP.2021.127.2.033 (rus)
8. Ahmed S. Barriers to implementation of building information modeling (BIM) to the construction industry: a review. *J. Civil Eng. Construct.* 2018. Vol. 7. Pp. 107–113. doi:10.32732/jcec.2018.7.2.107
9. Jang R., Collinge W. Improving BIM asset and facilities management processes: a Mechanical and Electrical (M&E) contractor perspective. *J. Build. Eng.* 2020. Vol. 32. P. 101540. doi:10.1016/j.job.2020.101540
10. Sun C., Jiang S., Skibniewski M.J., Man Q., Shen L., A literature review of the factors limiting the application of BIM in the construction industry. *Technol. Econ. Dev. Econ.* 2017. Vol. 23. Pp. 764–779. doi:10.3846/20294913.2015.1087071
11. Ghaffarianhoseini A., Tookey J., Ghaffarianhoseini A., Naismith N., Azhar S., Efimova O., Raahemifar K. Building Information Modelling (BIM) uptake: clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017. Vol. 75. Pp. 1046–1053. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.083

12. Syrovatkina T.N. Digitalization of the Reproductive Infrastructure of the Economy of Construction [Cifrovizaciya vosproizvodstvennoj infrastruktury ekonomiki stroitel'stva]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2020. No. 4. Pp. 104–108. doi:10.17513/fr.42732 (rus)
13. Suleimanova L.A., Sapozhnikov P.V. Realization of accounting policy in construction using digital technologies [Realizaciya uchetoj politiki v stroitel'stve s ispol'zovaniem cifrovyyh tekhnologij]. *Tekhnologii informacionnogo modelirovaniya. ZHiznennyj cikl ob'ekta*. Moscow: MSCU Publishing House, 2021. Pp. 5–16. (rus)
14. Rafsanjani H., Nabizadeh A.H. Towards Digital Architecture, Engineering, and Construction (AEC) Industry through Virtual Design and Construction (VDC) and Digital Twin. *Energy and Built Environment*. 2021. Vol. 2.
15. Karakozova I.V., Malyha G.G., Kulikova E.N., Pavlov A.S., Panin A.S. Organizational support of BIM-technologies [Organizacionnoe soprovozhdenie BIM-tekhnologij]. *Bulletin of MSCU*. 2019. Vol. 14. No.12. P. 1628–1637. doi:10.22227/1997-0935.2019.12. Pp. 1628–1637. (rus)
16. The results of surveys of designers and surveyors on the use of BIM-technologies [Itogi oprosov proektirovshchikov i izyskatelej po ispol'zovaniyu BIM-tekhnologij]. *Edinyj resurs zastroyshchika*. 2019. URL: <https://erzrf.ru/news/itogi-oprosov--proyektirovshchikov-i-izyskateley-po-ispolzovaniyu-bim-tekhnologiy?regions=> (date of access: 10.11.2021). (rus)
17. Lee D., Kim H., Sim J., Lee D., Cho H., Hong D. Trends in 3D Printing Technology for Construction Automation Using Text Mining. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2019. Vol. 20. Pp. 871–882. doi:10.1007/s12541-019-00117-w
18. Classen M.; Ungermann J.; Sharma, R. Additive Manufacturing of Reinforced Concrete-Development of a 3D Printing Technology for Cementitious Composites with Metallic Reinforcement. *Appl. Sci.* 2020. 10. 3791. doi:10.3390/app10113791
19. Kolchin V.N. Specificity of Application of the "Internet of Things" Technology in Construction [Specifika primeneniya tekhnologii "internet veshchej" v stroitel'stve]. *Innovacii i investicii*. 2017. No. 5. Pp. 19–22. (rus)
20. Paul S., Naik B., Kumar Bagal D. Enabling technologies of IoT and challenges in various field of construction industry in the 5G Era: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 970(1). 012019. doi:10.1088/1757-899X/970/1/012019
21. Nasserredine H., Hanna A., Veeramani D. Exploring the current and future states of augmented reality in the construction industry. *International Conference on Construction in the 21st Century*. 2019. Pp. 185–189. doi:10.1007/978-3-030-48465-1_31
22. Tuskaeva Z.R., Albegov Z.V. Implementation of construction control using building information modeling and virtual reality technologies [Osushchestvlenie stroitel'nogo kontrolya s primeneniem tekhnologij informacionnogo modelirovaniya zdaniy i virtual'noj real'nosti]. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2021. No. 2(74). Pp. 371–384. (rus)
23. Reinhardt D., Haeusler M.H., London K., Loke L., Feng Y., Barata E.D.O. Investigating the potential of collaborative robotics for subject matter experts. *International Journal of Architectural Computing*. 2020. Vol. 18(4). Pp. 353–370. doi:10.1177/1478077120948742
24. Dolgoplov D.V. Possibilities of using unmanned aerial systems to control the compliance of the results of construction of pipeline transport sites with the design solutions [Vozmozhnosti ispol'zovaniya bespilotnyh aviacionnyh sistem dlya kontrolya sootvetstviya rezul'tatov stroitel'stva ploshchadnyh ob'ektov truboprovodnogo transporta proektnym resheniyam]. *Bulletin of Siberian State University of Geosystems and Technology*. 2020. Vol. 25. No. 4. Pp. 85–95. doi:10.33764/2411-1759-2020-25-4-85-95 (rus)
25. Parsons T. The system of modern societies [Sistema sovremennykh obshchestv]: translated from English by L.A. Sedova, A.D. Kovaleva. M.: Aspect-Press, 1997. 271 p.(rus)
26. Talapov V.V. Information model - the basis of "smart city" [Informacionnaya model' – osnova «umnogo goroda»]. *SAPR i grafika*. Moskva. 2018. No. 11. P. 4–7. (rus)
27. Tallgren M.V., Roupé M., Johansson M. 4D modelling using virtual collaborative planning and scheduling. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*. 2020. Vol. 26. Pp. 763–782. doi:10.36680/j.itcon.2021.042
28. Talapov V. The role of the technical customer in organizing the process of information modeling [Rol' tekhnicheskogo zakazchika v organizacii processa informacionnogo modelirovaniya]. *SAPR i grafika*. 2019. No. 11(277). Pp. 4–12. (rus)
29. Benklian S., Rogachev I., Zobnin M., Barannik S., Mironyuk V., Belets V. Guidelines for information modeling of infrastructure facilities and the formation of the standard of the design organization using Autodesk solutions [Rukovodstvo po informacionnomu modelirovaniyu infrastruktury ob'ektov i formirovaniyu standarta proektnoj organizacii s primeneniem reshenij kompanii Autodesk]. M. 2019. 201 p. (rus)
30. Chen Y.-R.H., Tserng P. An Integrated Methodology for Construction BIM & ERP by Using

UML Tool. 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 2017. 6.

31. Grishina N.M., Mitsko D.I. Development and implementation of BIM-standard: study of management methods in construction [Razrabotka i vnedrenie BIM-standarta: issledovanie metodov upravleniya v stroitel'stve]. Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2017. No 3(41). Pp. 266–276. (rus)

32. Vaisman S.M., Bayburin A.Kh. Development of organizational and technological solutions in construction using information modeling technologies (TIM) [Razrabotka organizacionno-tekhnologicheskikh reshenij v stroitel'stve s ispol'zovaniem tekhnologij informacionnogo modelirovaniya (TIM)]. Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture. 2016. Vol. 16. No. 4. Pp. 21–28. doi:10.14529/build160404 (rus)

33. Tuskaeva Z.R., Albegov Z.V. Construction Control Using Building Information Modeling and Virtual Reality Technologies [Osushchestvlenie stroitel'nogo kontrolya s primeneniem tekhnologij informacionnogo modelirovaniya zdaniy i virtual'noj real'nosti]. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. No. 2(74). Pp. 371–384. (rus)

34. Poznahirko T., Topchiy D.V. Features of the introduction of BIM in the development of design

documentation [Osobennosti vnedreniya BIM v process razrabotki proektnoj dokumentacii]. Construction Production. 2020. No. 1. P. 69–72. (rus)

35. Shick Alshabab M., Petrichenko M., Vysotskiy A., Khalil T. BIM-Based Quantity Take-off in Autodesk Revit and Navisworks Manage. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 70. Pp. 413–421. doi:10.1007/978-3-030-42351-3_36

36. Zadorozhnaya A.V., Trofimova V.M., Aksenov N.B. Features of using BIM technologies in the calculation of reinforced concrete structures [Osobennosti ispol'zovaniya BIM tekhnologij pri raschyote zhelezobetonnykh konstrukcij]. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. No. 7(58). Pp. 18. (rus)

37. Bobrova T.V., Panchenko P.M. Technical rationing of work processes in construction based on spatial and temporal modeling [Tekhnicheskoe normirovanie rabochih processov v stroitel'stve na osnove prostranstvenno-vremennogo modelirovaniya]. Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 8 (76). Pp. 84–97. doi:10.18720/MCE.76.8 (rus)

38. Otsokov K.A. Innovative technologies in construction and their use in organizational and technological measures [Innovacionnye tekhnologii v stroitel'stve i ih ispol'zovanie v organizacionno-tekhnologicheskikh meropriyatiyah]. Building Materials and Products. 2020. Vol. 3. No. 1. Pp. 7–13. doi:10.34031/2618-7183-2020-3-1-7-13 (rus)

Information about the authors

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

Sapozhnikov, Pavel V. PhD, Director of GK ExpertProjectStroy LLC. E-mail: info@expertps.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308000, Belgorod, Kharkovsky lane, 36G

Krivchikov, Andrey N. Director of OOO "PU-ZHBK-1", Russia, 308017, Belgorod, st.. Cooperative, 6

Received 23.11.2021

Для цитирования:

Сулейманова Л.А., Сапожников П.В., Кривчиков А.Н. Цифровизация строительной отрасли как ИТ-структурирование пирамиды управления процессами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 12–24. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-12-24

For citation:

Suleymanova L.A., Sapozhnikov P.V., Krivchikov A.N. Digitalization of the construction industry as it-structuring of the process management pyramid. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 4. Pp. 12–24. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-12-24

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-25-38

Смоляго Г.А., *Обернихина Я.Л.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: yana.ishuk@yandex.ru

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, УСИЛЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОМ

Аннотация. Усиление железобетонных изгибаемых элементов полимеркомпозитными материалами нашло широкое применение в современном строительстве. В связи с этим представляется, что анализ проведенных экспериментальных исследований прочности, деформативности таких конструкций является актуальным. В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов, усиленных углеволокном. А именно, шести балок трех серий. Первая серия балок - эталонные не усиленные образцы. Вторая серия балок включала в себя образцы, нагруженные нагрузкой, соответствующей нормативной, т.е. при наличии пластических деформаций, трещин и прогибов, затем усиленные углеволокном после разгрузки, путем приклеивания его к растянутой зоне с U-образной анкерровкой на приопорных участках. К третьей серии балок относились образцы, усиленные, аналогично второму типу балок, но до приложения нагрузки. Кроме того, в ходе экспериментальных исследований выполнено испытание контрольных образцов бетона, арматуры и углеволокна для установления их основных физико-механических характеристик. Получены предельные значения экспериментальных изгибающих моментов и прогибов в середине пролета образцов всех серий. Выявлено, что разрушение всех образцов, внешне армированных углепластиком, наступило в результате выкола бетона сжатой зоны, возникшего вследствие увеличения ширины и высоты нормальных трещин, расположенных в зоне чистого изгиба и возрастания прогибов, что также стало причиной отслоения самого композиционного материала от бетона.

Ключевые слова: железобетонная балка, усиление, напряженно-деформированное состояние, трещиностойкость, углеволокно, полимеркомпозитные материалы

Введение. Усиление несущих конструкций является одним из основных направлений при перепрофилировании и реконструкции объектов капитального строительства, а также при снижении их силового сопротивления и исчерпания остаточного ресурса. В современной практике строительства широко используются технологии внешнего армирования с высокой удельной прочностью и стойкостью к электрохимической коррозии [1–2]. Благодаря высоким физико-механическим свойствам применение системы внешнего армирования углеволокном при усилении несущих конструкций признано эффективным методом [3].

Исследования влияния усиления углепластиком на изменение прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов представлены в работах [4–7]. В ходе данных экспериментальных исследований авторы, варьируя количеством слоев системы усиления, схемой усиления, типом волокна, а также уровнем предварительного нагружения перед усилением, установили, что усиление железобетонных балок полимеркомпозитными материалами на основе углеродных волокон привело к существенному увеличению их несущей способности.

Кроме того, вопросам усиления изгибаемых железобетонных элементов также посвящено множество работ зарубежных исследователей.

В частности, изучением механизма разрушения изгибаемых железобетонных элементов, усиленных углеволокном занимались следующие авторы [8–11].

Обоснованию выбора оптимального способа анкерровки композиционного материала, который зависит от распределения нормальных и касательных напряжений на концевом участке приклеенной к бетону полосы композиционного материала, посвящены работы [12–17].

Авторами [18] были проведены экспериментальные исследования двух серий образцов: 8 железобетонных балок, предварительно нагруженных до 30 % от разрушающей нагрузки контрольных образцов, усиленных углепластиком после разгрузки; и 2 железобетонных балок, усиленных углеволокном при эксплуатационной нагрузке. В ходе испытания выявлено, что в среднем несущая способность образцов первой серии увеличилась на 24 % по сравнению с контрольной балкой, а второй серии – только на 16 %.

В работе [19] представлены экспериментальные исследования 19 железобетонных балок, усиленных углепластиком с разной ориентацией волокон, при наличии дефектов и повреждений.

Впоследствии, балки были нагружены до разрушения. В зависимости от ориентации волокна наблюдались различные типы разрушения. Целью данного исследования было изучить влияние ориентации волокон углепластика на прочность и жесткость балок. Оценка влияния уровня повреждений на несущую способность не проводилась.

Авторы [20] исследовали влияние двух разных вариантов предварительного нагружения – усиление при нагрузке соответствующей упругой стадии работы конструкции и при упругопластической – на несущую способность железобетонных балок, усиленных углеволокном. После разгрузки балки были усилены углепластиком с высоким или сверхвысоким модулем упругости (210 или 400 ГПа). Результаты испытаний показали, что уровень ранее существовавших дефектов и повреждений незначительно влияет на эффективность усиления и тип разрушения конструкции.

В работе [21] представлены исследования влияния уровня предварительного нагружения на несущую способность изгибаемых элементов, усиленных углеволокном. Были испытаны 3 железобетонные балки, которые предварительно нагрузили, а затем полностью разгрузили и усилили. Результаты экспериментов показали, несущая способность образцов после усиления увеличилась на 83 %, 56 % и 48 % для уровней предварительного нагружения 35 %, 66 % и 100 % от предельной расчетной нагрузки соответственно.

Авторами [22] проведено экспериментальное исследование предварительно нагруженных железобетонных балок, усиленных углепластиком. Образцы были разделены на 2 серии в зависимости от уровня предварительного нагружения. Образцы первой серии перед усилением были предварительно нагружены до 50 % от разрушающей нагрузки контрольной балки. Образцы второй серии предварительно нагрузили до 50 %, затем разгрузили до 25 % от разрушающей нагрузки контрольной балки, усилили и разрушили. Результаты испытаний показали, что чем выше уровень предварительной нагрузки, тем ниже несущая способность усиленных образцов.

В работе [23] приведены результаты экспериментальных исследований 8 железобетонных балок, усиленных углепластиком под нагрузкой. Образцы были предварительно нагружены до 40 %, 60 % и 80 % от разрушающей нагрузки контрольной балки и усилены углепластиком. В ходе испытания выявлено, что предельная несущая способность железобетонных балок, усиленных

под нагрузкой несущественно отличается от несущей способности образцов, усиленных без нагрузки.

Авторы [24] провели испытания 6 железобетонных балок, усиленных углепластиком под нагрузкой. Уровень нагружения, при котором проводилось усиление, соответствовал 0 %, 50 % и 70 % от разрушающей нагрузки контрольного образца. Экспериментальные исследования показали, что величина нагрузки усиления оказывает большее влияние на деформативность балок на высоких уровнях нагружения, чем на прочность (предварительное нагружение практически не повлияло).

В работах [25–27] приведены результаты экспериментальных исследований 6 железобетонных балок, усиленных углепластиком, под нагрузкой и с различной историей нагружения. Испытания показали, что нагрузка усиления является важным фактором, влияющим на прочность образцов, усиленных углеволокном. Изгибная прочность железобетонных балок, усиленных углеволокном под нагрузкой, тем выше, чем ниже уровень нагрузки усиления. Если нагрузка усиления одинакова, несущая способность железобетонных балок, усиленных углепластиком, почти одинакова, независимо от истории нагружения.

Однако, несмотря на накопленный мировой опыт экспериментальных исследований изгибаемых железобетонных элементов, усиленных полимеркомпозиционными материалами [28–38], изучению влияния уровня предварительного нагружения и разгрузки на изменение прочности и деформативности посвящено достаточно мало работ.

Методы и оборудование. Для исследования напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов, усиленных углеволокном, были проведены экспериментальные исследования опытных образцов – 6-ти балок трех типов. Первый тип балок – эталонные образцы без усиления. Второй тип балок – балки, нагруженные до стадии, соответствующей нагружению нормативной нагрузкой, для которой характерно наличие трещин и прогибов не превышающих предельных значений, усиленные углеволокном после разгрузки, путем приклеивания его к растянутой зоне с U-образной анкерровкой на приопорных участках. К третьему типу балок относятся образцы, усиленные углеволокном до приложения нагрузки, аналогично второму типу балок.

Конструкция опытных образцов и схема их армирования представлена на рис. 1.

В качестве армирования балок применялись плоские сварные каркасы с рабочей и конструктивной арматурой класса А400 диаметром 10 и 6 мм соответственно. В качестве поперечной арматуры использовалась проволока класса Вр500 диаметром 5 мм.

Балки изготавливались из бетона класса по прочности на сжатие В35.

В качестве материала усиления была использована система внешнего армирования, состоящая из однонаправленного углеродного холста на основе высокопрочного углеродного волокна со стеклянной уточной тканью марки FibARM 530/300 с прочностью на растяжение 4200 МПа и модулем упругости 240 000 МПа и адгезива – клея на основе эпоксидной смолы FibArm Resin 530+.

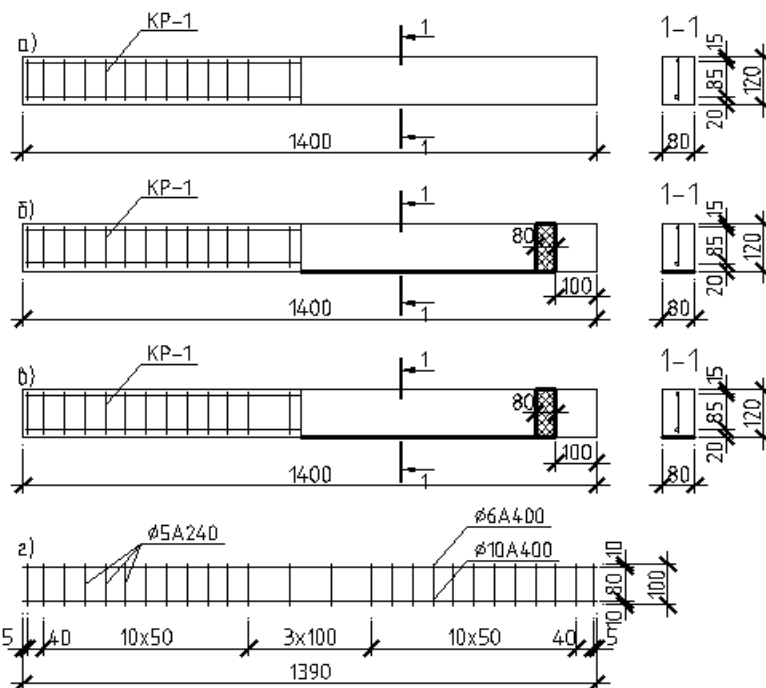


Рис. 1. Конструкция и схема армирования экспериментальных образцов:
а) балки серии «А»; б) балки серии «Б»; в) балки серии «В»; г) каркас КР-1

Экспериментальные исследования проводились на испытательной установке, основанной на стенде, описанном в работе [39] (рис. 2)

Схема нагружения экспериментальных образцов приведена на рис. 3.

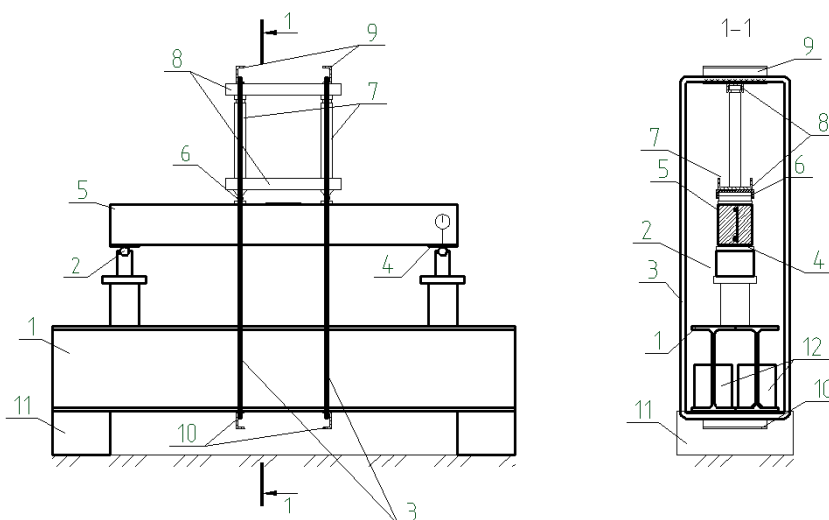


Рис. 2. Схема испытательной установки:

- 1 – основание из двух двутавров №30Ш1; 2 – шарнирная опора; 3 – тяжи; 4 – опорные пластины; 5 – испытуемый образец; 6 – катки с распределительными плитами; 7 – гидравлические цилиндры; 8 – распределительные траверсы швеллер №12; 9; 10 – верхние и нижние траверсы швеллер № 6; 11 – опора основания [39]

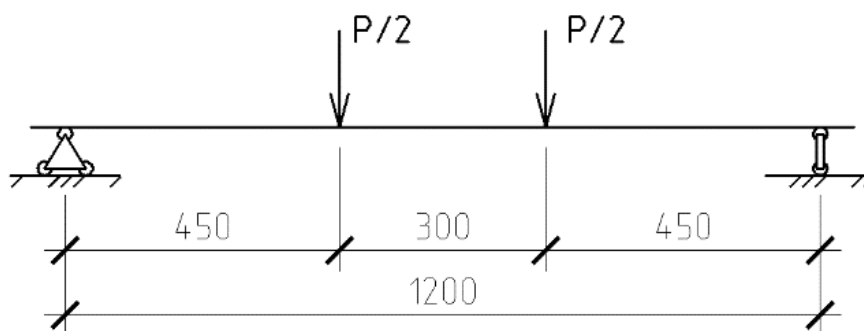


Рис. 3. Схема нагружения экспериментальных образцов

Измерение продольных деформаций бетона сжатой и растянутой зон осуществлялось с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм при базе измерения 200 мм. Кроме того, измерения механических индикаторов дублировались с помощью тензорезисторов. Для измерения деформаций верхнего фибрового волокна бетона были приняты тензорезисторы с базой измерения 80 мм и сопротивлением 120 Ом. Помимо

этого, для определения продольных деформаций углеволокна и стальной арматуры использовались тензорезисторы с базой измерения 20 мм, которые устанавливались непосредственно на углеводную ленту и рабочую арматуру соответственно. Схема расположения тензорезисторов приведена на рис. 4.

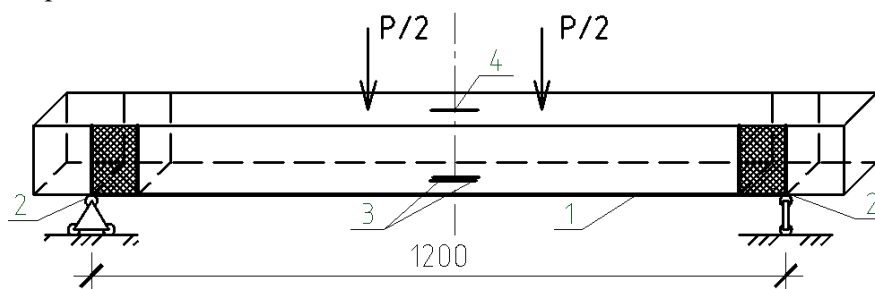


Рис. 4. Схема расположения тензорезисторов на опытном образце:

1 – углепластик; 2 – углепластиковая U-образная анкеровка; 3 – тензорезисторы для измерения деформаций растянутой зоны; 4 – тензорезисторы для измерения деформаций сжатой зоны

Определение прогибов осуществлялось с помощью многооборотного прогибомера типа 6-ПАО (прогибомера Аистова) с ценой деления 0,01 мм.

Ширина раскрытия трещин на каждом этапе нагружения фиксировалась с помощью лабораторного микроскопа МПБ -100.

Экспериментальное исследование состояло из нескольких этапов [39]:

Первый этап заключался в подготовке экспериментальных образцов к испытанию. Для этого все образцы одной партии осматривались на наличие дефектов. Затем исследуемая балка устанавливалась на испытательный стенд [40], где выполнялась разметка и последующая установка измерительных приборов.

Второй этап включал подготовку и исследование контрольных образцов. Контрольные испытания прочности образцов бетона на сжатие выполнялись в соответствии с ГОСТ 10180.

На третьем этапе экспериментальных исследований проводилось непосредственно само испытание балок (рис. 5).

Балки серии «А» нагружались поэтапно вплоть до разрушения.

Балки серии «Б», нагруженные до 70 % от разрушающей нагрузки, разгружались и усиливались углеводным волокном по описанной ранее схеме и технологии [41]. Затем повторно нагружались вплоть до разрушения.

Балки серии «В» усиливались углеволокном и нагружались поэтапно вплоть до разрушения.



Рис. 5. Общий вид испытания до усиления углеволокном и после усиления

Основная часть. Все опытные образцы были доведены до разрушения. По результатам экспериментальных исследований средний предельный изгибающий момент эталонных балок без усиления (балки А1 и А2) составил 5,07 кНм. Все образцы данной партии разрушились в результате увеличения ширины и высоты нормальных трещин, расположенных в зоне чистого изгиба и возрастания прогибов, что приводило к выколу бетона сжатой зоны на заключительном этапе эксперимента (рис. 6).



Рис. 6. Характер разрушения эталонных образцов А1 и А2

Прочностные характеристики балок, полученные в ходе экспериментальных исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Прочностные характеристики
экспериментальных образцов серии А**

Марка балки	Разрушающая нагрузка $R_{разр}$, кН	Средняя разрушающая нагрузка $R_{ср}$, кН	Разрушающий момент M_u , кНм	Средний разрушающий момент $M_{ср/u}$, кНм
A1	21,41	22,625	5,36	5,09
A2	23,84		4,82	

В начале и конце каждого этапа экспериментальных исследований проводились фиксация деформаций бетона сжатой и растянутой зон, растянутой арматуры по описанной выше схеме. Зафиксированные показания тензодатчиков позволяли описать характер изменения средних относительных деформаций эталонных образцов (рис. 7)



Рис. 7. Графики зависимости «нагрузка-деформации» для образцов первой партии (без усиления)

Для оценки деформативности также фиксировались значения прогибов в начале и конце каждого этапа экспериментальных исследований. Значения прогибов для соответствующей нагрузки представлены на рис. 8.

На основании полученной диаграммы можно сделать вывод, что при увеличении нагрузки и приближении ее к разрушающей не

наблюдается ползучесть бетона. Среднее значение прогиба балок в середине пролета при разрушающей нагрузке составляет 7,24 мм.

В результате испытаний было выявлено, что средний предельный изгибающий момент балок, усиленных углеволокном на стадии близкой к исчерпанию несущей способности (балки В1 и В2) составил 8,1 кНм, а балок, усиленных без нагружения (балки В1 и В2) – 6,6 кНм (рис. 9).

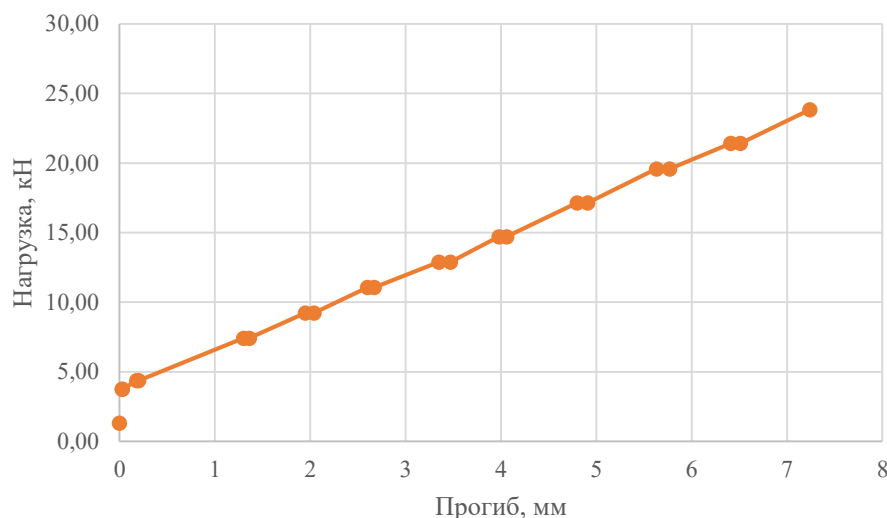


Рис. 8. Усредненная зависимость «нагрузка-прогиб» для образцов первой партии (без усиления)

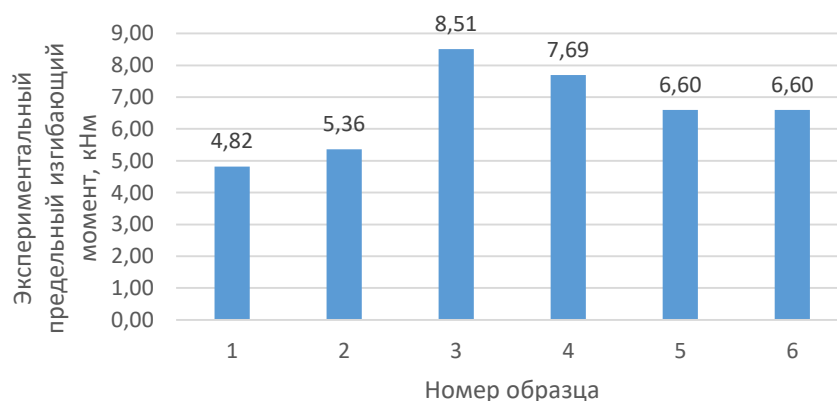


Рис. 9. Гистограмма экспериментальных предельных значений изгибающих моментов: образцы 1–2 – эталонные (А1 и А2); 3–4 – усиленные углеволокном, на стадии близкой к исчерпанию несущей способности (Б1 и Б2); 5–6 – усиленные без предварительного нагружения (В1 и В2)

Разрушение всех образцов, внешне армированных углеволокном, произошло в результате увеличения ширины и высоты нормальных трещин, расположенных в зоне чистого изгиба и возрастания прогибов, что стало причиной отслоения полимеркомпозитного материала от бетона и выкола бетона сжатой зоны (рис. 10).



Рис. 10. Общий характер разрушения образцов, внешне армированных углепластиком

При этом наблюдалось отслоение углеволокна, без разрушения полимеркомпозита, которое возникло, как и предполагалось, в результате отрыва бетона непосредственно на границе склеиваемой поверхности (рис. 11).



Рис. 11. Поверхность разрушения, усиливаемых образцов

Прочностные характеристики балок, усиленных углеволокном, полученные в ходе экспериментальных исследований приведены в таблице 2.

Таблица 2

Прочностные параметры экспериментальных образцов серий Б и В

Марка балки	Разрушающая нагрузка $R_{разр}$, кН	Средняя разрушающая нагрузка $R_{ср}$, кН	Разрушающий момент M_u , кНм	Средний разрушающий момент $M_{ср/u}$, кНм
Б1	37,84	36,02	8,51	8,1
Б2	34,19		7,69	
В1	29,32	29,32	6,6	6,6
В2	29,32		6,6	

В начале и конце каждого этапа экспериментальных исследований проводилась фиксация деформаций бетона сжатой и растянутой зон, растянутой арматуры и углеволокна по описанной выше схеме. Зафиксированные показания тензодатчиков позволили описать характер изменения средних относительных деформаций усиленных образцов (рис. 12–13).

Оценка деформативности осуществлялась путем фиксации прогибов в начале и конце каждого этапа экспериментальных исследований. Графики зависимости «нагрузка-прогиб» каждой серии балок приведены на рис. 14–15.



Рис. 12. Графики зависимости «нагрузка-деформации» для образцов второй партии (Б1 и Б2)



Рис. 13. Графики зависимости «нагрузка-деформации» для образцов второй партии (Б1 и Б2)

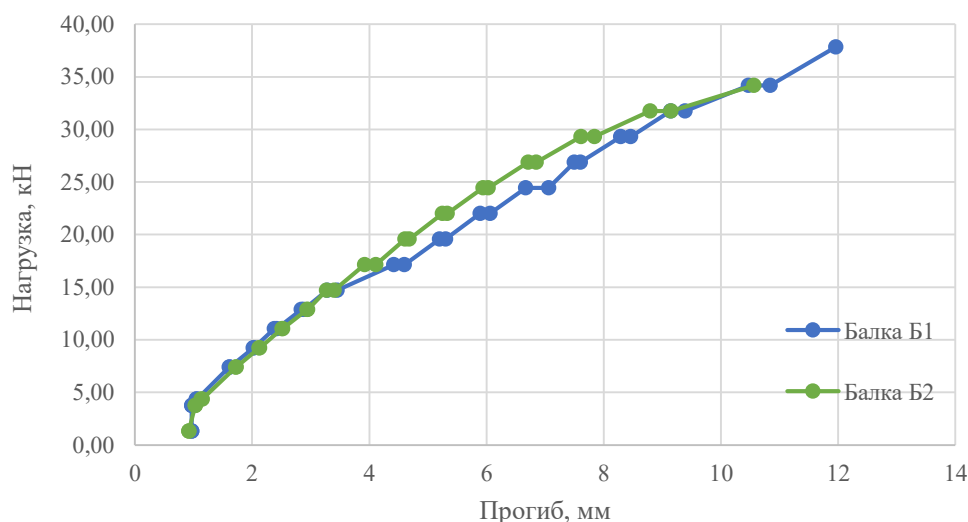


Рис. 14. Зависимость «нагрузка-прогиб» для образцов Б1 и Б2

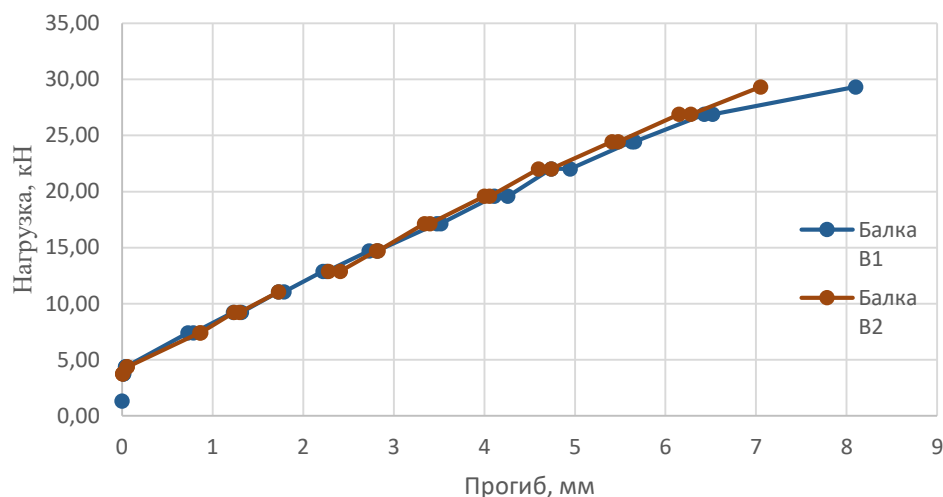


Рис. 15. Зависимость «нагрузка-прогиб» для образцов В1 и В2

На основании полученной диаграммы можно сделать вывод, что при увеличении нагрузки и приближении ее к разрушающей не наблюдается выраженная ползучесть бетона. Среднее значение прогиба в середине пролета при нормативной нагрузке балок серии Б составляет 5,6 мм, серии В – 4,16 мм.

Величина прогиба при нормативной нагрузке 14,71 кН у балок серии Б составляла 6,11 мм, а после – 4,05 мм, таким образом, прогиб уменьшился на 34 %.

Выводы. В ходе экспериментальных исследований установлено следующее:

На основании испытаний образцов арматуры и углеволокна на растяжение определены их основные деформативно-прочностные характеристики. Разрушение всех образцов углепластика – хрупкое, с разрывом поперек волокон

(без образования шейки) и с их продольным расслоением, что отличается от характера разрушения металлической арматуры.

Диаграмма деформирования углеволокна линейна вплоть до разрыва, т.е. углеродные волокна практически не подвержены пластическим деформациям.

По результатам испытаний образцов бетонных кубов на сжатие установлены значения основных механических характеристик бетона при центральном (однородном) деформировании.

Разрушение эталонных неусиленных образцов происходило вследствие достижения деформаций в сжатой зоне бетона предельных значений.

Все образцы, внешне армированные углеволокном, разрушались по нормальному сечению с выколом бетона сжатой зоны и отслоением композиционного материала от бетона. В то время

как, сам композиционный материал не разрушался.

На основании полученных величин разрушающих изгибающих моментов и нагрузок можно утверждать, что усиление внешним армированием из углепластика повышает прочность по нормальному сечению по сравнению с эталонными образцами без усиления на 59 % для балок серии Б и на 30 % – для серии В. Предположительно, полученный эффект можно объяснить тем, что при нагрузке, не превышающей 80 % от разрушающей, у балок серии Б не наблюдалось возникновение новых трещин, а происходило увеличение высоты и ширины раскрытия уже существующих, и только на этапе перед разрушением, процесс трещинообразования возобновлялся. В то время как для балок серии В, трещинообразование происходило на протяжении всего нагружения, вплоть до разрушения, а общее количество трещин было значительно больше.

Среднее значение прогиба в середине пролета при нормативной нагрузке балок серии Б составляет 5,6 мм, серии В – 4,16 мм.

Величина прогиба при нормативной нагрузке 14,71 кН у балок серии Б составляла 6,11 мм, а после – 4,05 мм, таким образом, прогиб уменьшился на 34 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Ч.1. Отечественные эксперименты при статическом нагружении // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2016. Т. 8. №3.
2. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Ч.2. Влияние температуры // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2016. Т. 8. №4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN416.pdf>.
3. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами. М.: Стройиздат, 2007. 180 с.
4. Быков А.А., Румянцев С.Д., Бирин А.С. Экспериментальное исследование прочностных и деформационных характеристик железобетонных балок, усиленных углепластиком // Вестник ПНИПУ. 2016. №2(22). С. 112–126.
5. Григорьева Я.Е. Экспериментальное исследование влияния внешнего армирования изгибаемых железобетонных балок углеволокном на прочность и жесткость конструкций // Вестник Московского государственного строительного университета. 2011. №8. С. 181–184.
6. Бокарев С.А., Костенко А.Н., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Экспериментальные исследования при пониженных и повышенных температурах железобетонных образцов, усиленных полимерными композиционными материалами // Интернет-журнал «Наукоеведение». 2013. №3 (16). С. 1–9.
7. Смердов М.Н., Смердов Д.Н., Клементьев А.О. Экспериментальные исследования прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, армированных в сжатой и растянутой зоне неметаллической композиционной арматурой // Транспорт Урала. 2014. №4. С. 49–54.
8. Aram M.R., Czaderski C., Motavalli M. Debonding failure modes of flexural FRP-strengthened RC beams // Composites Part B: Engineering. 2008. Vol. 39. Pp. 826–841. doi:10.1016/j.compositesb.2007.10.006
9. Matthys S. Structural behaviour and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement. Ghent University, Department of structural engineering. 2000
10. Pham H., Al-Mahaidi R. Assessment of available prediction models for the strength of FRP retrofitted RC beams // Composite Structures. 2004. Vol. 66. Pp. 601–610. doi:10.1016/j.compstruct.2004.05.008
11. Teng G.J., Smith T.S., Yao J., Chen J.F. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs // Construction and Building Materials. 2003. Vol.17. Pp. 447–462. doi:10.1016/S0950-0618(03)00043-6
12. Alam M.A., Jumaat M.Z. Behavior of U and L shaped end anchored steel plate strengthened reinforced concrete beams // European Journal of Scientific Research. 2008. Vol. 22. Pp. 184–196.
13. Ceroni F., Pecce M., Matthys S., Taerwe L. Debonding strength and anchorage devices for reinforced concrete elements strengthened with FRP sheets // Composites Part B: Engineering. 2008. Vol. 39. Pp. 429–441. doi:10.1016/j.compositesb.2007.05.002
14. Jumaat M.Z., Alam M.A. Experimental and numerical analysis of end anchored steel plate and CFRP laminate flexurally strengthened r. c. Beams // Int. J. Phys. Sci. 2010. Vol.5. Pp. 132–144.
15. Pham H., Al-Mahaidi R. Prediction models for debonding failure loads of carbon fiber reinforced polymer retrofitted reinforced concrete beams. // J.

Compos Constr. ASCE. 2006. Vol. 10. Pp. 48–59. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:1(48)

16. Wang Y.C., Hsu K. Design recommendations for the strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite plates // Composite Structures. 2009. Vol. 88. Pp. 323–332. doi:10.1016/j.compstruct.2007.12.001

17. Xiong G.J., Jiang X., Liu J.W., Chen L. A way for preventing tension delamination of concrete cover in midspan of FRP strengthened beams. Construction and Building Materials. 2007. Vol. 21. Pp. 402–408. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.08.005

18. Arduini M., Nanni A. Behaviour of pre-cracked R. C. beams strengthened with carbon FRP sheets // ASCE Journal of Composites for Construction. 1997. Vol. 1. № 2. Pp. 63–70. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0268(1997)1:2(63)

19. Norris T., Saadatmanesh H., Ehsani M. R. Shear and flexural strengthening of RC beams with carbon fiber sheets // ASCE. J. Struct. 1997. Vol. 123. Pp. 903–911. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:7(903)

20. Richardson T., Fam A. Modulus effect of bonded CFRP laminates used for repairing preyield and postyield cracked concrete beams // J. Compos. Constr. 2014. Vol. 18. № 4. Pp. 30–54. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000454

21. Fayyadh M.M., Abdul Razak H. Assessment of effectiveness of CFRP repaired RC beams under different damage levels based on flexural stiffness // Constr. Build. Mater. 2012. Vol. 37. Pp. 125–134. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.021

22. Cao G., Fang Z., Wu J. Experimental study on RC beams strengthened with FRP laminates // Build. Struct. 2005. Vol. 35. Pp. 214–225.

23. Wang T., Chang Y. Experimental research on the flexural behavior of RC beams strengthened by NSM CFRP sheets // J. Wuhan Univ. Technol. 2009. Vol. 31. Pp. 5–15.

24. Shin Y.S., Lee C. Flexural behavior of r.c. beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer laminates at different levels of sustaining load // ACI Struct. J. 2003. Vol. 100. Pp. 231–239.

25. Wenwei W., Guo L. Experimental study and analysis of RC beams strengthened with CFRP laminates under sustaining load // Int. J. Solids Struct. 2006. Vol. 43. Pp. 1372–1387. doi:10.1016/j.ijsolstr.2005.03.076

26. Wang W., Zhao G., Huang C., Ren H. An experimental study of strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using CFRP sheets // Eng. Mech. 2004. Vol. 21. Pp. 7–19.

27. Wang W., Zhao G., Huang C. An experimental study of RC beams strengthened with CFRP sheets under simulated continuous traffic loads // Eng. Mech. 2006. Vol. 23. Pp. 6–21.

28. Grace N.F., Abdel-Sayed G., Soliman A.K., Saleh K.R. Strengthening of reinforced concrete beams using fibre reinforced polymer (FRP) laminates // ACI Structural Journal. 1999. Vol. 96. № 5. Pp. 865–874.

29. Ross C.A., Jerome D.M., Tedesco J.W., Hughes M.L. Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates // ACI Structural Journal. 1999. Vol. 96. № 2. Pp. 65–71.

30. Sebastian W.M. Significance of mid-span de-bonding failure in FRP-plated concrete beams // ASCE Journal of Structural Engineering. 2001. Vol. 127. № 7. Pp. 792–798. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(792)

31. Smith S.T., Teng J.G. FRP-strengthened RC beams I: Review of debonding strength models // Engineering Structures. 2002. Vol. 24. № 4. Pp. 385–395. doi:10.1016/S0141-0296(01)00105-5

32. Yang Z.J., Chen J.F., Proverbs D. Finite element modelling of concrete cover separation failure in FRP plated R. C. beams // Construction and Building Materials. 2003. Vol. 17. № 1. Pp. 3–13. doi:10.1016/S0950-0618(02)00090-9

33. Aiello M.A., Ombres L. Cracking and deformability analysis of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded carbon fiber reinforced polymer sheet // ASCE Journal of Materials in Civil Engineering. 2004. Vol. 16. № 5. Pp. 292–399. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:5(392)

34. Obaidat Y.T., Susanne H., Ola D., Ghazi A., Yahia A. Retrofitting of reinforced concrete beams using composite laminates // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 25. Pp. 591–597. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.082

35. Ritchie P.A., Thomas D.A., Lu L.W., Connelly G.M. External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastic // ACI Structural Journal. 1991. Vol. 88(4). Pp. 490–500.

36. Garden H.N., Hollaway L.C. An experimental study of the influence of plate end anchorage of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams // Composite Structures. 1998. Vol. 42. Pp. 175–188. doi:10.1016/S0263-8223(98)00070-1

37. Saadatmanesh H., Ehsani M.R. RC beams strengthened with FRP plates. I: Experimental study // Journal of Structural Engineering. 1991. Vol. 117(11). Pp. 3417–3433. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:11(3417)

38. Buyukozturk O., Hearing B. Failure behavior of precracked concrete beams retrofitted with FRP // Journal of composites for construction. 1998. Vol. 2(3). Pp. 138–144.

39. Ищук Я.Л. Программа исследования прочности, жесткости и трещиностойкости железобетонных изгибаемых элементов, усиленных полимеркомпозиционными материалами // Международный студенческий строительный форум – 2016 (к 45-летию кафедры строительства и городского хозяйства): электронный сборник докладов. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. С. 349–353.

40. Обернихин Д.В., Никулин А.И. Экспериментальные исследования прочности, трещи-

нотойкости и деформативности железобетонных балок трапециевидного и прямоугольного поперечных сечений // Инновационная наука. 2016. № 8-2. С. 73–77.

41. Смоляго Г.А., Ищук Я.Л. Технология применения полимеркомпозитных материалов при реконструкции гражданских зданий // Материалы всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы реновации жилищного фонда города: взаимосвязь экономических, технических и правовых аспектов». Белгород: НИУ БелГУ, 2016. С. 366–369.

Информация об авторах

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

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

Поступила 03.11.2021 г.

© Смоляго Г.А., Обернихина Я.Л., 2022

Smolyago G.A., *Obornikhina Y.L.

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

**E-mail: yana.ishuk@yandex.ru*

STRENGTH AND DEFORMATION OF BENDED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS REINFORCED WITH CARBON FIBER

Abstract. Reinforcement of reinforced concrete flexible elements with polymer composite materials has found wide application in modern construction, so the accumulation of experimental studies of the strength of such structures is relevant. This paper presents the results of experimental studies of the stress-strain state of flexible reinforced concrete elements forced with carbon fiber. Namely, six beams of three types. The first type of beams - reference samples without reinforcement. The second type of beams – beams loaded at the stage corresponding to the standard load, in the presence of cracks and deflections, reinforced with carbon fiber, by gluing it to a stretched zone with a U-shaped anchorage on the supporting areas after unloading. The third type of beams includes samples reinforced, similar to the second type of beams but before the application of loads. In addition, during the experimental study, control images of concrete, rebar and carbon fiber were tested to establish their basic physical and mechanical characteristics. The limit values of experimental bending moments in the middle of the span of samples of all series are obtained. It was found that all samples externally reinforced with carbon fiber were destroyed as a result of increasing the width and height of normal cracks located in the zone of pure bending and increasing deflections, which led to the separation of the composite material from the concrete and the indent of the concrete of the compressed zone.

Keywords: reinforced concrete beam, reinforcement, stress-strain state, crack resistance, carbon fiber, polymer composite materials

REFERENCES

1. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. Analysis of experimental studies on the reinforcement of reinforced concrete structures with polymer composite materials. Part 1. Domestic experiments under static loading [Analiz eksperimental'nyh issledovaniy po usileniyu zhelezobetonnykh konstrukcij polimernymi kompozitnymi materialami. CH.1. Otechestvennye

eksperimenty pri staticheskom nagruzenii]. Naukovedenie Internet magazine. 2016. Vol. 8. No. 3. (rus)

2. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. Analysis of experimental studies on the reinforcement of reinforced concrete structures with polymer composite materials. Part 2. Influence of temperature [Analiz eksperimental'nyh issledovaniy po usileniyu zhelezobet-

onnyh konstrukcij polimernymi kompozitnymi materialami. CH.2. Vliyanie temperatury]. Online magazine "Science". 2016. Vol. 8. No. 4 <http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN416.pdf> (free access). (rus)

3. Shilin A.A., Pshenichny V.A., Kartuzov D.V. External reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials [Vneshnee armirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami]. Moscow: Stroyizdat, 2007. 180 p. (rus)

4. Bykov A.A., Rumyantsev S.D., Birin A.S. Experimental study of the strength and deformation characteristics of reinforced concrete beams reinforced with carbon fiber [Eksperimental'noe issledovanie prochnostnyh i deformacionnyh harakteristik zhelezobetonnyh balok, usilennyh ugleplastikom]. Vestnik PNRPU. 2016. No. 2 (22). Pp. 112–126. (rus)

5. Grigorieva Ya.E. The strength and deformability of reinforced concrete beams, reinforced with carbon fiber at a stage close to the exhaustion of the bearing capacity [Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya vneshnego armirovaniya izgibaemyh zhelezobetonnyh balok uglevoloknom na prochnost' i zhestkost' konstrukcij]. Vestnik of the Moscow State University of Civil Engineering Moscow. 2011. No. 8. Pp.181–184. (rus)

6. Bokarev S.A., Kostenko A.N., Smerdov D.N., Nerovnykh A.A. Experimental studies at low and high temperatures of reinforced concrete specimens reinforced with polymer composite materials [Eksperimental'nye issledovaniya pri ponizhennyh i povyshennyh temperaturah zhelezobetonnyh obrazcov, usilennyh polimernymi kompozicionnymi materialami]. Naukovedenie Internet journal. 2013. No. 3 (16). Pp. 1–9. (rus)

7. Smerdov M.N., Smerdov D.N., Klementyev A.O. Experimental studies of the strength and deformability of bending reinforced concrete elements reinforced in a compressed and stretched zone with non-metallic composite reinforcement [Eksperimental'nye issledovaniya prochnosti i deformativnosti izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov, armirovannyh v szhatoy i rastyanutoj zone nemetallicheskoj kompozicionnoj armaturoj]. Transport of the Urals. 2014. No. 4. Pp. 49–54. (rus)

8. Aram M.R., Czaderski C., Motavalli M. Debonding failure modes of flexural FRP-strengthened RC beams. Composites Part B: Engineering. 2008. Vol. 39. Pp. 82–841. doi:10.1016/j.compositesb.2007.10.006

9. Matthys S. Structural behaviour and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement. Ghent University, Department of structural engineering. 2000

10. Pham H., Al-Mahaidi R. Assessment of available prediction models for the strength of FRP retrofitted RC beams. Composite Structures. 2004. Vol. 66. Pp. 601–610. doi:10.1016/j.compstruct.2004.05.008

11. Teng G.J., Smith T.S., Yao J., Chen J.F. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs. Construction and Building Materials. 2003. Vol.17. Pp. 447–462. doi:10.1016/S0950-0618(03)00043-6

12. Alam M.A., Jumaat M.Z. Behavior of U and L shaped end anchored steel plate strengthened reinforced concrete beams. European Journal of Scientific Research. 2008. Vol. 22. Pp. 184–196.

13. Ceroni F., Pecce M., Matthys S., Taerwe L. Debonding strength and anchorage devices for reinforced concrete elements strengthened with FRP sheets. Composites Part B: Engineering. 2008. Vol. 39. Pp. 429–441. doi:10.1016/j.compositesb.2007.05.002

14. Jumaat M.Z., Alam M.A. Experimental and numerical analysis of end anchored steel plate and CFRP laminate flexurally strengthened r. c. beams. Int. J. Phys. Sci. 2010. Vol.5. Pp. 132–144.

15. Pham H., Al-Mahaidi R. Prediction models for debonding failure loads of carbon fiber reinforced polymer retrofitted reinforced concrete beams. J. Compos Constr., ASCE. 2006. Vol. 10. Pp. 48–59. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:1(48)

16. Wang Y.C., Hsu K. Design recommendations for the strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite plates. Composite Structures. 2009. Vol. 88. Pp. 323–332. doi:10.1016/j.compstruct.2007.12.001

17. Xiong G.J., Jiang X., Liu J.W., Chen L. A way for preventing tension delamination of concrete cover in midspan of FRP strengthened beams. Construction and Building Materials. 2007. Vol. 21. Pp. 402–408. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.08.005

18. Arduini M., Nanni A. Behaviour of pre-cracked R. C. beams strengthened with carbon FRP sheets. ASCE Journal of Composites for Construction. 1997. Vol. 1. No. 2. Pp. 63–70. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(1997)1:2(63)

19. Norris T., Saadatmanesh H., and Ehsani M. R. Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets. ASCE. J. Struct. 1997. Vol. 123. Pp. 903–911. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:7(903)

20. Richardson T., Fam A. Modulus effect of bonded cfrp laminates used for repairing preyield and postyield cracked concrete beams. J. Compos. Constr. 2014. Vol. 18. No. 4. Pp. 30–54. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000454

21. Fayyadh M.M., Abdul Razak H. Assessment of effectiveness of CFRP repaired RC beams

- under different damage levels based on flexural stiffness. *Constr. Build. Mater.* 2012. Vol. 37. Pp. 125–134. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.021
22. Cao G., Fang Z., Wu J. Experimental study on RC beams strengthened with FRP laminates. *Build. Struct.* 2005. Vol. 35. Pp. 214–225.
23. Wang T., Chang Y. Experimental research on the flexural behavior of RC beams strengthened by NSM CFRP sheets. *J. Wuhan Univ. Technol.* 2009. Vol. 31. Pp. 5–15.
24. Shin Y.S., Lee C. Flexural behavior of rc beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer laminates at different levels of sustaining load. *ACI Struct. J.* 2003. Vol. 100. Pp. 231–239.
25. Wenwei W., Guo L. Experimental study and analysis of RC beams strengthened with CFRP laminates under sustaining load. *Int. J. Solids Struct.* 2006. Vol. 43. Pp. 1372–1387. doi:10.1016/j.ijsolstr.2005.03.076
26. Wang W., Zhao G., Huang C., Ren H. An experimental study of strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using CFRP sheets. *Eng. Mech.* 2004. Vol. 21. Pp. 7–19.
27. Wang W., Zhao G., Huang C. An experimental study of RC beams strengthened with CFRP sheets under simulated continuous traffic loads. *Eng. Mech.* 2006. Vol. 23. Pp. 6–21.
28. Grace N.F., Abdel-Sayed G., Soliman A.K., Saleh K.R. Strengthening of reinforced concrete beams using fibre reinforced polymer (FRP) laminates. *ACI Structural Journal.* 1999. Vol. 96. No. 5. Pp. 865–874.
29. Ross C.A., Jerome D.M., Tedesco J.W., Hughes M.L. Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates. *ACI Structural Journal.* 1999. Vol. 96. No. 2. Pp. 65–71.
30. Sebastian W.M. Significance of mid-span de-bonding failure in FRP-plated concrete beams. *ASCE Journal of Structural Engineering.* 2001. Vol. 127. No. 7. Pp. 792–798. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(792)
31. Smith S.T., Teng J.G. FRP-strengthened RC beams I: Review of debonding strength models. *Engineering Structures.* 2002. Vol. 24. No. 4. Pp. 385–395. doi:10.1016/S0141-0296(01)00105-5
32. Yang Z.J., Chen J.F., Proverbs D. Finite element modelling of concrete cover separation failure in FRP plated R. C. beams. *Construction and Building Materials.* 2003. Vol. 17. No. 1. Pp. 3–13. doi:10.1016/S0950-0618(02)00090-9
33. Aiello M.A., Ombres L. Cracking and deformability analysis of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded carbon fiber reinforced polymer sheet. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering.* 2004. Vol. 16. No. 5. Pp. 292–399. DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:5(392)
34. Obaidat Y.T., Susanne H., Ola D., Ghazi A., Yahia A. Retrofitting of reinforced concrete beams using composite laminates. *Construction and Building Materials.* 2010. Vol. 25. Pp. 591–597. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.082
35. Ritchie P.A., Thomas D.A., Lu L.W., Connelly G.M. External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastic. *ACI Structural Journal.* 1991. Vol. 88(4). Pp. 490–500.
36. Garden H.N., Hollaway L.C. An experimental study of the influence of plate end anchorage of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams. *Composite Structures.* 1998. Vol. 42. Pp. 175–188. doi:10.1016/S0263-8223(98)00070-1
37. Saadatmanesh H., Ehsani M.R. RC beams strengthened with FRP plates. I: Experimental study. *Journal of Structural Engineering.* 1991. Vol. 117(11). Pp. 3417–3433.
38. Buyukozturk O., Hearing B. Failure behavior of precracked concrete beams retrofitted with FRP. *Journal of composites for construction.* 1998. Vol. 2(3). Pp. 138–144. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:11(3417)
39. Ishchuk Y.L. Program for studying the strength, rigidity and cracking resistance of reinforced concrete bending elements, reinforced with polymeric composition materials [Programma issledovaniya prochnosti, zhestkosti i treshchinostoykosti zhelezobetonnykh izgibayemykh elementov, usilenykh polimerkompozitsionnymi materialami]. *CONFERENCE International student construction forum – 2016, BSTU, Belgorod, 2016.* Pp. 349–353. (rus)
40. Obernikhin D.V., Nikulin A.I. Experimental studies of the deformability of bending reinforced concrete elements of various cross sections [Eksperimental'nyye issledovaniya prochnosti, treshchinostoykosti i deformativnosti zhelezobetonnykh balok trapetsiyevidnogo i pryamougol'nogo poperechnykh secheniy]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.* 2017. No. 4. 56–59. (rus)
41. Smolyago G.A., Ishchuk Y.L. Technology of using polymer-composite materials in the reconstruction of civil buildings [Tekhnologiya primeneniya polimerkompozitnykh materialov pri rekonstruktsii grazhdanskikh zdaniy]. In: Nikulina, O.M. (eds.) *CONFERENCE Actual problems of renovation of the city's housing stock: the relationship of economic, technical and legal aspects, BelsU, Belgorod, 2016.* 366–370. (rus)

Information about the authors

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

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

Received 03.11.2021

Для цитирования:

Смоляго Г.А., Обернихина Я.Л. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, усиленных углепластиком // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 25–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-25-38

For citation:

Smolyago G.A., Obernikhina Y.L. Strength and deformation of bended reinforced concrete elements reinforced with carbon fiber. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 4. Pp. 25–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-25-38

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-39-48

¹Меркулов С.И., ^{2,*}Есипов С.М., ²Есипова Д.В.¹Курский государственный университет²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: sk31.sm@gmail.com

КОМПОЗИТНЫЕ СИСТЕМЫ ВНЕШНЕГО АРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. В статье рассмотрены конструктивные решения систем внешнего армирования железобетонных конструкций композитными материалами. Изучены схемы деформирования и разрушения конструкций при статическом изгибе. Обобщены полученные зависимости и закономерности совместной работы бетона и неметаллической арматуры. Приведены результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций нескольких авторов, проведено сопоставление, показавшее схожесть результатов эмпирических методов в подходах различных ученых. Показано, что на работу составной конструкции с внешним армированием существенное влияние оказывает наличие в момент усиления напряженно-деформированного состояния и силовых повреждений, а также их уровень относительно критических величин. Подтверждена гипотеза об изменении типичного характера разрушения конструкций, а именно – вследствие потери прочности на восприятие касательных напряжений зон контакта бетона и внешнего армирования. Показано, что работа бетона сжатой зоны в меньшей степени определяет несущую способность в усиленных конструкциях, нежели чем в неусиленных. Предложен новый способ оценки несущей способности путем введения понятия о предельных относительных деформациях клеевого шва в зоне контакта. Получена зависимость между прочностью зоны контакта и прочностью бетона усиливаемой конструкции.

Ключевые слова: внешнее армирование, железобетонные конструкции, композитные системы, сцепление.

Введение. В настоящее время накоплен определенный опыт применения строительных конструкций с внешним армированием композитами [1–6]. Внешнее армирование железобетонных конструкций композитами позволяет обеспечить неповреждаемость конструкции в агрессивной среде, а также решить задачи усиления конструкций без остановки основного производства. Для внешнего армирования железобетонных конструкций предпочтительно применять однонаправленные тканые композитные материалы. Внешнее армирование изгибаемых железобетонных конструкций создает сложную конструктивную систему, несущую способность которой определяют прочность бетона сжатой зоны, прочность арматуры растянутой зоны. Более сложная картина напряженного состояния конструкции получается, когда внешнее армирование применяется в комплексе с армированием конструкции стальной арматурой [7, 8]. Экспериментальные исследования в значительной степени касаются несущей способности изгибаемых железобетонных конструкций с внешним армированием композитным материалом, обусловленной прочностью сцепления композита с бетоном поверхности конструкции [9–13]. Также эффективность внешнего армирования железобетонных конструкций определяется прочностными и деформативными характеристиками композитных материалов. Система армирования создается на основе омоноличивания композитной

ткани полимерным связующим, образуя ламинаты. Сухая композитная ткань и ламинат, полученный на основе этой ткани, отличаются прочностными характеристиками, прочность на растяжение ламината до 1,4 раза выше прочности исходной композитной ткани [14].

Материалы и методы. В качестве опорных показателей сравнения были выбраны результаты экспериментально-теоретических исследований нескольких групп авторов [1–3]. Работы сгруппированы по принципу схожести расчетных схем неусиленных и усиленных конструкций, классов прочности бетона, схем армирования и материалов усиления. Класс бетона по прочности варьируется в интервале В15...В25, основное армирование – пространственные каркасы из арматуры класса А400 и А240, материалы усиления – ламинаты на основе углеродных волокон в эпоксидной матрице (производство как заводское под марками FibARM [1] и MBace BASF [2], так и самостоятельного изготовления [3]). Расчетные схемы – однопролетные балки с шарнирными опорами без консолей. Нагрузка – сосредоточенная в третях пролета. Сечения – прямоугольные с соотношением высота:ширина – 2:1. Сравнительные показатели усиления приведены в таблице 1.

В [1] выявлены характеры разрушения изгибаемых конструкций с внешним армированием. Разрушения образцов 1,2 произошло с отслоением внешнего армирования в середине пролета с

образованием нормальных трещин. В образцах 3-6 отслоение композитного материала внешнего армирования произошло в зоне образования наклонных трещин. Образец 7: внешнее армирование выполнялось при наличии нормальных

трещин в растянутой зоне, а разрушение сопровождалось отслоением композитного материала в зоне трещин.

Таблица 1

Схемы усиления изгибаемых железобетонных конструкций

№ схемы	Схема усиления образцов	Характер армирования	Прирост несущей способности на восприятие изгибающего момента, %
Исследования группы авторов [1]			
1		по нижней грани одним слоем шириной 50мм	136
2		по нижней грани одним слоем шириной 100мм	154
3		по нижней грани одним слоем шириной 150мм	185
4		по нижней грани двумя слоями шириной 150мм	188
5		по нижней грани с устройством анкеров	189
6		по нижней грани с выходом материала на боковые поверхности	219
7		по нижней грани при наличии нормальных трещин	159
Исследования группы авторов [2]			
8		по нижней грани одним слоем	164
9		по нижней грани с выходом материала на боковые поверхности	252
10		по нижней грани с выходом материала на боковые поверхности с устройством анкеров	284
11		по нижней грани с устройством анкеров	206
12		по нижней грани одним слоем, наклейка поверх слоя еще материала с выходом на боковые поверхности	240

В [2] выявлены схожие характеры разрушения изгибаемых конструкций с внешним армированием. Разрушение образца 8 произошло из-за

отслоения внешнего армирования в середине пролета с образованием нормальных трещин шириной раскрытия не выше предельных. В образцах

9–11 отслоение композитного материала элемента внешнего армирования произошло в зоне образования наклонных трещин, в образце 12 – комбинированный вариант.

Основная часть. Для решения задачи по проверке гипотез разрушения и получения опытных данных автором в объеме экспериментальных исследований предусмотрены испытания основных образцов – железобетонных балок, изготовленных из тяжёлого бетона класса по прочности В20. Поперечное сечение: $100 \times 150(h)$, пролет – 1300 мм. Расчетный пролет составил 1200 мм. Конструктивное решение образцов приведено на рисунке 1.

Образцы железобетонных балок были испытаны в 4 серии: Б-1, Б-2, Б-3, Б-4. В серию Б-1 вошли две балки-близнеца Б-1-1 и Б-1-2. Серия Б-1 являлась контрольной.

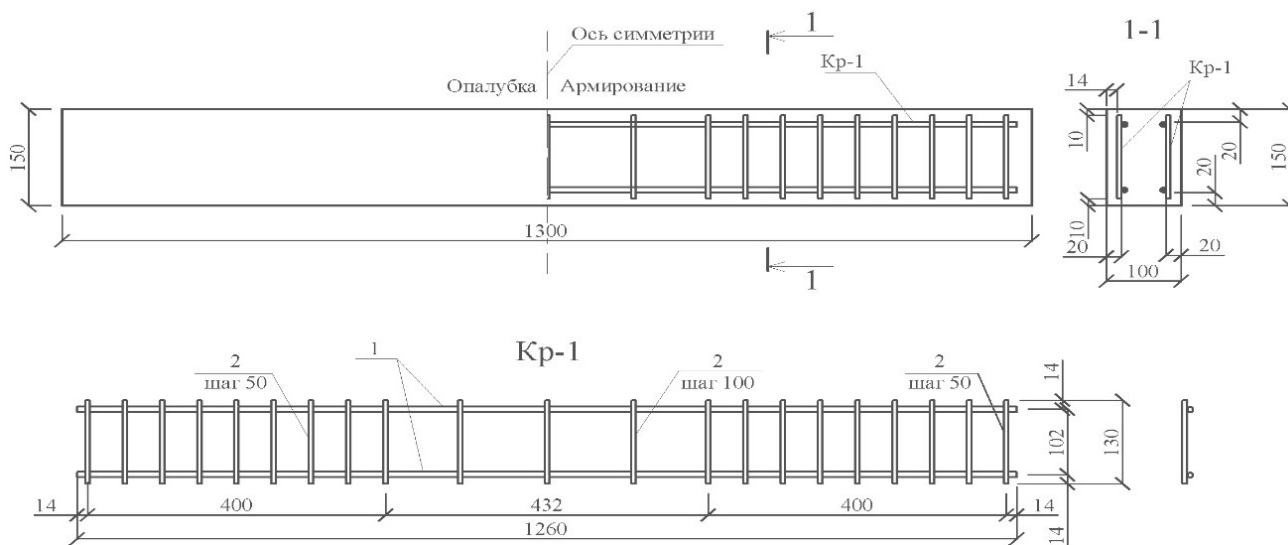
В серию Б-2 вошли две балки Б-2-1 и Б-2-2. Обе балки до испытаний были усилены внешним армированием из приклеенного к нижней грани однослойного композитного материала шириной 90 мм на основе углеродных волокон. На балке Б-2-2 были устроены торцевые хомуты шириной 120 мм из аналогичного композитного материала. На балке Б-2-1 хомутов нет.

В серию Б-3 вошли две балки Б3-1 и Б-3-2. Балка Б-3-1 была нагружена кратковременной

нагрузкой до величины изгибающего момента, равного 50 % от разрушающего для серии Б-1, после чего была полностью разгружена и усилена аналогично балке Б-2-2. Балка Б-3-2 была испытана аналогично, но с преднагружением величиной 70 % от разрушающего.

В серию Б-4 вошли две балки Б-4-1 и Б-4-2. Балка Б-4-1 была нагружена кратковременной нагрузкой до величины изгибающего момента, равного 50 % от разрушающего для серии Б-1, после чего была усилена под нагрузкой аналогично балке Б-2-2. Балка Б-4-2 была испытана аналогично, но усилена под нагрузкой величиной в 70 % от разрушающего.

Все образцы были нагружены кратковременной нагрузкой вплоть до разрушения. В качестве расчетной схемы была принята схема с однопролетным шарнирным опиранием по двум сторонам, с 2 равными сосредоточенными силами, равноудаленными от опор. Нагружение велось ступенями по 5% от разрушающей. На этапах, предшествующих разрушению, величина ступени снижалась до 2.5% для подробного рассмотрения НДС элементов. Время выдержки стабилизации на каждой ступени – 600 сек. Общий вид испытаний приведен на рисунке 2.



Спецификация арматуры

Марка изделия	Поз.	Наименование	Кол.	Масса 1 дст., кг	Масса изделия, кг
Кр-1	1	Ø8 А400, L=1260	2	0.995	1.601
	2	Ø6 А400, L=130	21	0.606	

Рис. 1. Опалубочные и арматурные чертежи образцов



Рис. 2. Общий вид проведения испытаний

Значения величин разрушающих изгибающих моментов приведены в таблице 1. Согласно полученным данным для серий Б-2, Б-3, Б-4 свойственно повышение несущей способности по из-

гибающему моменту по сравнению с Б-1. Под величиной $M_{\text{разр}}$ в таблице 1 обозначается величина предельного изгибающего момента образца без усиления, под величиной $M_{\text{разр}}^f$ – то же, усиленного образца.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований

Серия	Маркировка образца	$M_{\text{разр}}$, кН·м	$M_{\text{разр}}^f$, кН·м	$\frac{M_{\text{разр}}^f}{M_{\text{разр}}}$	Характер разрушения
Б-1	Б-1-1	7,12	-	-	По нормальным сечениям в зоне чистого изгиба
	Б-1-2	7,19	-	-	
Б-2	Б-2-1	-	10,02	140%	Отслоение композита с разрушением защитного слоя бетона
	Б-2-2	-	11,63	163%	Разрыв композита в приопорной зоне, раздробление бетона сжатой зоны
Б-3	Б-3-1	-	9,54	134%	Разрыв части волокон композита в приопорной зоне с частичным разрушением защитного слоя бетона.
	Б-3-2	-	8,64	121%	
Б-4	Б-4-1	-	9,2	129%	Проскальзывание композита под анкером
	Б-4-2	-	8,64	121%	Отслоение композита с разрушением защитного слоя бетона

Было установлено следующее:

- Для образцов серии Б-2 характерно увеличение угла наклона к оси абсцисс диаграммы по сравнению с серией Б-1 вследствие повышения изгибной жесткости образца. Перелом диаграммы при появлении нормальных трещин находится на диаграмме выше, чем для образцов серии Б-1. При изгибающем моменте, равном $M=8.64$ кН·м происходит перелом диаграммы, соответствующий началу разрушения защитного слоя бетона и свидетельствующий о начале пластической стадии работы контактной зоны «композит-бетон» [15, 16]. Образец Б-2-1 разрушается вследствие отслоения композита с разрушением

защитного слоя бетона по касательным площадкам. Диаграмма приведена на рисунке 3.

- В образце Б-2-2 к моменту разрушения образца Б-2-1 защитный слой бетона разрушился, адгезия между бетоном и композитом практически нулевая, растянутая зона воспринимает усилия только за счет внешней арматуры, которая анкеруется в торцевых хомутах. Разрушение происходит за счет потери прочности композита на растяжение. Авторы отмечают положительное влияние хомутов, обеспечивающих более полное использование прочности композита на растяжение. Образец Б-2-2 после разрушения представлен на рисунке 4.

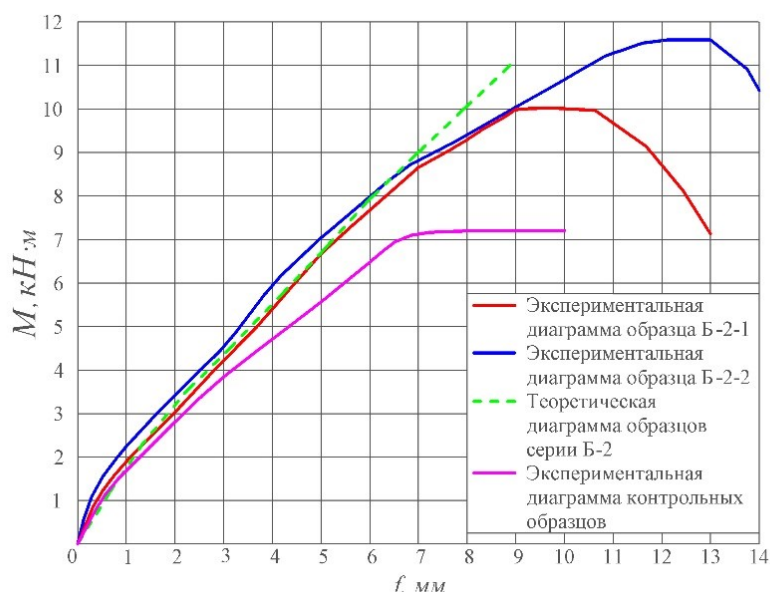


Рис. 3. Зависимость «момент – прогиб» серии Б-2

- Образцы серии Б-3 работают под нагрузкой не аналогично серии Б-2 (за исключением предельных моментов) - сказывается разница в величине предварительного нагружения. Чем ближе был образец к разрушению до разгрузки и усиления, тем меньший эффект дает усиление. Диаграмма образца Б-3-1 после усиления схожа с диаграммой образцов серии Б-2: видно, что диаграмма усиленного образца лежит выше диаграммы контрольного образца и имеет больший угол наклона к оси прогибов. Диаграмма образца Б-3-2 мало отлична от контрольной. Виден лишь прирост несущей способности, деформативность

осталась на прежнем уровне. До величины изгибающего момента $M=7,5...8$ кН·м внешнее армирование и бетон работают совместно.

- Образцы серии Б-4 демонстрируют те же закономерности, что и образцы серии Б-3. Если у диаграммы образца Б-4-1 замечен излом и уменьшение деформативности после стадии усиления при нагрузке, равной 50 % от разрушающей, вплоть до разрушения, то диаграмма образца Б-4-2 после усиления при нагрузке, равной 70 % от разрушающей повторяет диаграмму контрольных образцов.



Рис. 4. Характерное разрушение образца Б-2-2

Отслоение внешнего армирования начинается после образования критической нормальной трещины в защитном слое бетона. Взаимное горизонтальное и вертикальное смещение берегов трещин способствует отслоению [17].

Трещина проходит по нормали защитный слой бетона до нижней растянутой стальной арматуры и поворачивает в горизонтальной плоскости в направлении опор и наклонных трещин. Величина раскрытия критической трещины при

старте отслоения составила 0,16–0,17 мм. Аналитически [18–20] легко выявить точку излома диаграмм для образцов серий Б-2, Б-3, соответствующую значению изгибающего момента 7,5 кНм. При моменте, превышающем указанную величину, нарастание величины раскрытия трещин ускоряется на 15 % для серии Б-2 и на 5 % для серии Б-3.

По данным, полученным в ходе экспериментальных исследований, определены характерные точки излома «реальной» диаграммы. Установлено, что работа клеевого соединения на сдвиг носит упругий характер вплоть до достижения предельных величин касательных напряжений, после чего зависимость характеризуется ниспадающей ветвью. На рисунке 5 изображена зависимость $\tau - \varepsilon$ для клеевого соединения, определенная по экспериментальным данным.

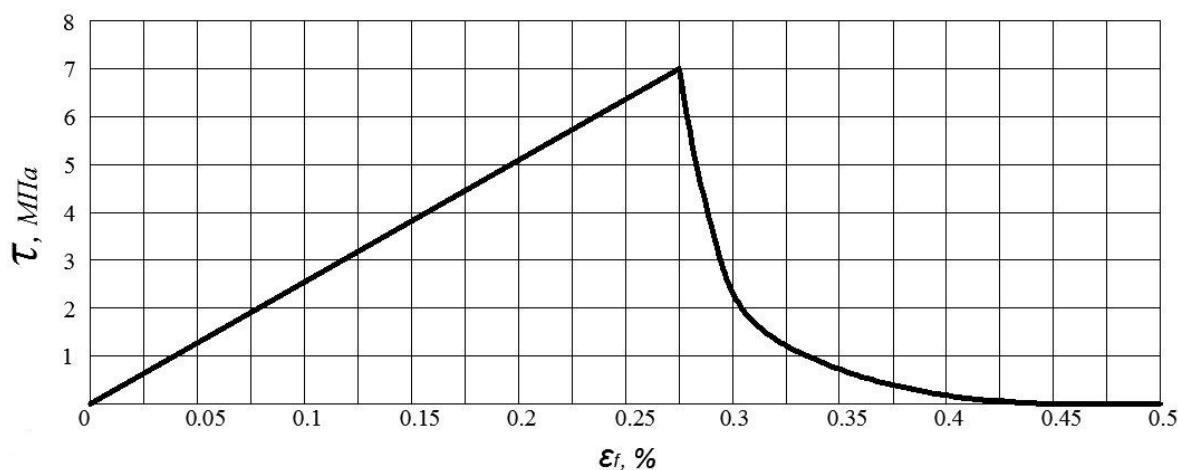


Рис. 5. Предлагаемая зависимость $\tau - \varepsilon$ в контактном шве «композит-бетон» для бетона класса В20 и $n \cdot t_f \cdot E_f = 39300 \text{ Н / мм}$

Выводы

1. Разрушение усиленных конструкций происходило вследствие нарушения совместной работы элементов усиления с бетоном конструкций. При усилении ненагруженных конструкций увеличение несущей способности составляет от 40 % (без анкеров) до 63 % (с анкерами). При усилении конструкций, разгруженных после приложения нагрузки прирост несущей способности составляет 21–34 %. При усилении под нагрузкой прирост составляет 21–29 %. Усиление на проектных стадиях работы изменяет расчетную схему, при которой конструкция работает как балка с затяжкой.

2. Форма разрушения усиленных конструкций – потеря сцепления между бетоном и внешним армированием при достижении предельных деформаций. Это подтверждается опытом других исследователей.

3. Установлено, что усиление уменьшает деформативность изгибаемых конструкций вследствие увеличения изгибной жесткости при

Обобщая результаты испытаний авторов с результатами экспериментальных исследований [1–6], была получена обобщенная формула предельных касательных напряжений в зоне контакта:

$$\tau_{u,ult} = 2,7 \cdot R_b^{0.3} \quad (1)$$

Определена величина предельных относительных деформаций внешней арматуры, при которой проявляется процесс отслоения внешнего армирования от поверхности бетона, установлено, что она практически не зависит от класса бетона и продольной жесткости композита [17–18]:

$$\varepsilon_{u,ult} = 0,0028 \div 0,003 \quad (2)$$

нагрузках до 70 % от разрушающих и вследствие изменения расчетной схемы при нагрузках свыше 70 % соответственно. Усиление ненагруженных образцов вызывает снижение прогибов на 30 %, разгруженных после приложения нагрузки – на 10–11 %, усиленных под нагрузкой – на 20–28 %. При наличии воздействия на усиливаемую конструкцию нагрузки, величина которой превышает 70 % от разрушающей, внешнее армирование практически не влияет на деформативность.

4. Наличие композитных анкерных устройств на торцах повышает их несущую способность на 16,4 % и позволяет реализовать рост несущей способности за счет изменения расчетной схемы.

5. Получены апробированные выражения определения предельных напряжений и деформаций в контактной зоне, являющиеся критерием разрушения усиленных конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами // Известия вузов. Строительство. 2010. №2. С. 112–124.
2. Неровных А.А. Совершенствование методики оценки грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов, усиленных композитными материалами: Авт. реф. дис. ...канд. техн. наук. Новосибирск. 2013. 24 с.
3. Меркулов С.И., Есипов С.М. Увеличение несущей способности железобетонных конструкций усилением внешним армированием композитным материалом // Бюллетень строительной техники. 2018. №2. С. 56–57.
4. Alferjani M.B.S., Abdul Samad A.A., Blkasem S. Elrawaff, N. Mohamad, M. Hilton. Shear strengthening of reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer laminate: A review // American Journal of Civil Engineering. 2014. 2(1). Pp. 1–7. doi:10.11648/J.AJCE.20140201.11
5. Lu X.Z., Teng J.G., Ye L.P., Jiang J.J. Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete // Engineering Structures. 2005. Vol. 27. Issue 6. Pp. 920–937. doi:10.1016/j.engstruct.2005.01.014
6. Смердов Д.Н., Клементьев А.О. Расчет по прочности сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием металлической и полимерной композиционной арматурой, с использованием нелинейной деформационной модели материалов // Интернет-журнал "Науковедение". 2017. № 1. С. 1–8.
7. Лесовик Р.В., Ключев С.В. Расчет усиления железобетонных колонн углеродной тканью // Инновационные материалы технологии; сборник докладов Международной научно-практической конференции: Белгород, 11-12 октября 2011 г. / Белгор. гос. технол. ун-т, Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. Ч. 2. С. 3–5
8. Римшин В.И., Меркулов С.И. Элементы теории развития бетонных конструкций с металлической композитной арматурой // Промышленное и гражданское строительство. 2015. №5. С. 38–42.
9. Невский А.В. Прочность сжатых углеоро-дофибробетонных элементов с углекомпозитным стержневым и внешним армированием при кратковременном динамическом нагружении: дис. ...канд. техн. наук : 05.23.01 / Невский Андрей Валерьевич. Томск, 2018. 210 с.
10. Морозов В.И., Юшин А.В., Хегай А.О. Анализ напряженно-деформированного состояния двухпролетных железобетонных балок, усиленных фиброармированными пластиками по наклонному сечению // В сборнике: Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия. Под редакцией А.Г. Тамразяна, Д.Г. Копаницы. 2016. С. 282–286.
11. Меркулов С.И., Есипов С.М., Есипова Д.В. Экспериментальные исследования трещинообразования железобетонных балок, усиленных композитными материалами // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2019. № 3 (137). С. 102–107.
12. Меркулов С.И., Есипов С.М. Использование тканых композитов для восстановления строительных конструкций // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019. № 3 (381). С. 256–259.
13. Ali-Ahmad, M.K., Subramaniam K.V., Ghosn M. Analysis of scaling and instability in FRP-concrete shear debonding for beam-strengthening applications // Journal of Engineering Mechanics. 2007. Pp. 58–65. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:1(58)
14. Nakaba K., Kanakubo T., Furuta T., Yoshizawa H. Bond Behavior between Fiber-Reinforced Polymer Laminates and Concrete // ACI Structural Journal. 2020. Vol. 98, No. 3. Pp. 1–9. doi:10.14359/10224
15. Spyarakos C.C., Raftoyiannis I.G., Credali L. and Ussia J. Experimental and Analytical Study on Reinforced Concrete Beams in Bending Strengthened with FRP // The Open Construction and Building Technology Journal. 2014. 8. Pp. 153–163. doi:10.2174/1874836801408010153
16. Krishan A., Troshkina E., Rimshin V. Experimental research of the strength of compressed concrete filled steel tube elements // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1116 AISC. Pp. 560–566. doi:10.1007/978-3-030-37919-3_56
17. Kuzina E., Rimshin V. Strengthening of concrete beams with the use of carbon fiber // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 983. Pp. 911–919. doi:10.1007/978-3-030-19868-8_90
18. Krishan A.L., Narkevich M.Yu., Sagadatov A.I., Rimshin V.I. The strength of short compressed concrete elements in a fiberglass shell // Magazine of Civil Engineering. 2020. Vol. 2 (94). Pp. 3–10. doi:10.18720/MCE.94.1
19. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Terekhov I.A., Kudyakov K.L. Determination of the criteria of deformation in a special limiting state // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. Issue 1. Pp.

108–116. doi:10.22337/2587-9618-2021-17-1-108-116

20. Fediuk R.S., Lesovik V.S., Liseitsev Yu.L., Timokhin R.A., Bituyev A.V., Zaiakhanov M.Ye.,

Mochalov A.V. Composite binders for concretes with improved shock resistance // Magazine of Civil Engineering. 2019. Vol. 1 (85). Pp. 28–38. doi:10.17213/0321-2653-2018-4-85-91

Информация об авторах

Меркулов Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства. E-mail: mersi.dom@yandex.ru. Курский государственный университет. Россия, 305000, Курск, ул. Радищева, д. 33.

Есипов Станислав Максимович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Есипова Диана Васильевна, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: diana.gridiakina@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 31.10.2021 г.

© Меркулов С.И., Есипов С.М., Есипова Д.В., 2022

¹Merkulov S.I., ^{2,*}Esipov S.M., ²Esipova D.V.

¹Kursk State University

²Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov

*E-mail: sk31.sm@gmail.com

COMPOSITE SYSTEMS FOR EXTERNAL REINFORCEMENT OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Abstract. The article considers structural solutions for external reinforcement systems of reinforced concrete structures with composite materials. Schemes of deformation and destruction of structures under static bending are studied. The obtained dependences and laws of joint operation of concrete and nonmetallic reinforcement are generalized. The results of experimental studies of reinforced concrete structures by several authors are presented, and a comparison is made that shows the similarity of the results of empirical methods in the approaches of various scientists. It is shown that the operation of a composite structure with external reinforcement is significantly affected by the presence of stress-strain state and force damage at the time of reinforcement, as well as their level relative to critical values. The hypothesis of a change in the typical nature of structural failure, namely, due to the loss of strength to perceive tangential stresses of the contact zones of concrete and external reinforcement, is confirmed. It is shown that the work of concrete in the compressed zone determines the load-bearing capacity in reinforced structures to a lesser extent than in non-reinforced ones. A new method for estimating the load-bearing capacity is proposed by introducing the concept of limiting relative deformations of the adhesive joint in the contact zone. The relationship between the strength of the contact zone and the strength of the reinforced concrete structure is obtained.

Keywords: external reinforcement, reinforced concrete structures, composite systems, coupling.

REFERENCES

1. Bokarev S.A., Smerdov D.N. Experimental studies of bent reinforced concrete elements reinforced with composite materials [Eksperimentalnye issledovaniya izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh kompozitnymi materialami]. News of higher educational institutions. Construction. 2010. No. 2. Pp. 112–124. (rus)
2. Nerovnyh A.A. Improving the methodology for assessing the carrying capacity of reinforced concrete spans of railway bridges, reinforced composite materials. Extended abstract of candidate's thesis. Novosibirsk, 2013. 24 p. (rus)
3. Merkulov S.I., Esipov S.M. Increasing the bearing capacity of reinforced concrete structures by strengthening external reinforcement with composite material [Uvelichenie nesushchej sposobnosti zhelezobetonnykh konstrukcij usileniem vneshnim armirom kompozitnym materialom]. Byulleten stroitelnoj tehniki. 2018. No. 2. Pp. 56–57. (rus)
4. Alferjani M.B.S., Abdul Samad A.A., Blkasem S. Elrawaff, N. Mohamad, M. Hilton. Shear strengthening of reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer laminate: A review. American Journal of Civil Engineering. 2014. 2(1). Pp. 1–7. doi:10.11648/J.AJCE.20140201.11

5. Lu X.Z., Teng J.G., Ye L.P., Jiang J.J. Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. *Engineering Structures*. 2005. Vol. 27, issue 6. Pp. 920–937. doi:10.1016/j.eng-struct.2005.01.014
6. Smerdov D.N., Klementiev A.O. The calculation of the strength of the cross-sections normal to the longitudinal axis of bendable concrete elements with combined reinforcement in metal and polymer composite fittings, using a nonlinear deformation model of the material [Raschet po prochnosti sechenij, normalnyh k prodolnoj osi izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov s kombinirovannym armirovaniem metallicheskoj i polimernoj kompozicionnoj armaturoj, s ispolzovaniem nelinejnoj deformacionnoj modeli materialov]. Online magazine "SCI-ENCE STUDIES". 2017. Vol. 9. No.1. Pp. 1–8. (rus)
7. Lesovik R.V., Klyuev S.V. Calculation of reinforcement of reinforced concrete columns with carbon fabric [Raschet usileniya zhelezobetonnyh kolonn uglerodnoj tkanyu]. *Innovacionnye materialy i tekhnologii; sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet*. 2011. Part 2. Pp. 3–5. (rus)
8. Rimshin V.I., Merkulov S.I. Elements of the theory of development of concrete structures with nonmetallic composite reinforcement [Elementy teorii razvitiya betonnyh konstrukcij s nemetallicheskoj kompozitnoj armaturoj]. *Industrial and Civil Engineering*. 2015. No. 5. Pp. 38–42. (rus)
9. Nevsky A.V. Strength of compressed carbon fiber concrete elements with carbon composite core and external reinforcement under short-term dynamic loading [Prochnost szhatyh uglerodofibrobetonnyh elementov s uglekompozitnym sterzhnevym i vneshnim armirovaniem pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii]. Extended abstract of candidate's thesis. Tomsk, 2018. 210 p. (rus)
10. Morozov V.I., Yushin A.V., Khagai A. O. Analysis of the stress-strain state of two-span reinforced concrete beams reinforced with fiber-reinforced plastics along the inclined section [Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya dvuhproletnyh zhelezobetonnyh balok, usilennyh fibroarmirovannymi plastikami po naklonnomu secheniyu]. *Sovremennye problemy rascheta zhelezobetonnyh konstrukcij, zdaniy i sooruzhenij na avarijnye vozdejstviya*. 2016. Pp. 282–286. (rus)
11. Merkulov S.I., Esipov S.M., Esipova D.V., Experimental studies of crack formation in reinforced concrete beams reinforced with composite materials [Eksperimentalnye issledovaniya treshchinoobrazovaniya zhelezobetonnyh balok, usilennyh kompozitnymi materialami]. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2019. No. 3 (137). Pp. 102–107. (rus)
12. Merkulov S.I., Esipov S.M. Use of woven composites for restoration of building structures [Ispolzovanie tkanyh kompozitov dlya vostanovleniya stroitelnyh konstrukcij]. *News of higher educational institutions. Technology of the textile industry*. 2019. No. 3 (381). Pp. 256–259. (rus)
13. Ali-Ahmad M.K., Subramaniam K.V., Ghosn M. Analysis of scaling and instability in FRP-concrete shear debonding for beam-strengthening applications. *Journal of Engineering Mechanics*. 2007. Pp. 58–65. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:1(58)
14. Nakaba K., Kanakubo T., Furuta T., Yoshizawa H. Bond Behavior between Fiber-Reinforced Polymer Laminates and Concrete. *ACI Structural* 2020. Vol. 98. No. 3. Pp. 1–9. doi:10.14359/10224
15. Spyarakos C.C., Raftoyiannis I.G., Credali L., Ussia J. Experimental and Analytical Study on Reinforced Concrete Beams in Bending Strengthened with FRP. *The Open Construction and Building Technology Journal*. 2014. 8. Pp. 153–163. doi:10.2174/1874836801408010153
16. Krishan A., Troshkina E., Rimshin V. Experimental research of the strength of compressed concrete filled steel tube elements. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1116 AISC. Pp. 560–566. doi:10.1007/978-3-030-37919-3_56
17. Kuzina E., Rimshin V. Strengthening of concrete beams with the use of carbon fiber. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 983. Pp. 911–919. doi:10.1007/978-3-030-19868-8_90
18. Krishan A.L., Narkevich M.Yu., Sagadatov A.I., Rimshin V.I. The strength of short compressed concrete elements in a fiberglass shell. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. Vol. 2 (94). Pp. 3–10. doi:10.18720/MCE.94.1
19. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Terekhov I.A., Kudyakov K.L. Determination of the criteria of deformation in a special limiting state. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. Vol. 17. Issue 1. Pp. 108–116. doi:10.22337/2587-9618-2021-17-1-108-116
20. Fediuk R.S., Lesovik V.S., Liseitsev Yu.L., Timokhin R.A., Bituyev A.V., Zaiakhanov M.Ye., Mochalov A.V. Composite binders for concretes with improved shock resistance. *Magazine of Civil Engineering*. 2019. Vol. 1 (85). Pp. 28–38. doi:10.17213/0321-2653-2018-4-85-91

Information about the authors

Merkulov, Sergei I. Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: mersi.dom@yandex.ru. Kursk State University. Russia, 305000, Kursk, st. Radishcheva, 33.

Esipov, Stanislav M. PhD, Associate Professor. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Esipova, Diana V. Post-graduate student. E-mail: diana.gridiakina@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Received 31.10.2021

Для цитирования:

Меркулов С.И., Есипов С.М., Есипова Д.В. Композитные системы внешнего армирования железобетонных конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 39–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-39-48

For citation:

Merkulov S.I., Esipov S.M., Esipova D.V. Composite systems for external reinforcement of reinforced concrete structures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 4. Pp. 39–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-39-48

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-49-56

Донченко О.М.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: kafedrasigsh@mail.ru

СОПРОТИВЛЕНИЕ КОРОТКИХ БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕЦЕНТРЕННОМУ СЖАТИЮ С БОЛЬШИМИ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТАМИ

Аннотация. В статье рассмотрена методика расчета коротких бетонных элементов при внецентренном сжатии с большими эксцентриситетами. Проведен анализ нормативных методик расчета внецентренно-сжатых элементов и установлены причины несоответствия расчетных значений экспериментальным для бетона классов В15-В60. Приведены уравнения условий равновесия, деформаций, физические законы и геометрические соотношения, разработанные автором на основании анализа результатов многочисленных экспериментальных лабораторных исследований бетонных и железобетонных элементов в условиях центрального и внецентренного сжатия и изгиба. Проведено численное исследование несущей способности внецентренно-сжатых элементов с большими эксцентриситетами (от 0,167 до 0,45h) и различной прочности бетона на сжатие в сопоставлении с данными других исследований и нормативной методикой. Результаты показали, что несущая способность большинства рассчитанных элементов по сравнению с определенной по нормативной методике оказалась на 20–25 % больше, а поперечная жесткость на 30–35 %. Установлено, что разработанное решение дает качественно более правильные и количественно более точные результаты во всем диапазоне изменения эксцентриситетов и прочности бетона, чем полученные с помощью нормативной литературы, осуществляя дифференцированный подход к различным по прочности бетонам. Аналитические зависимости разработанной методики, полученные в замкнутой форме, могут быть рекомендованы для использования в проектной практике.

Ключевые слова: внецентренно-сжатые элементы, большие эксцентриситеты, условия равновесия, предельные усилия и деформации, предельная сжимаемость бетона, коэффициент пластичности бетона.

Введение. Значительная часть коротких внецентренно-сжатых бетонных элементов – подпорные стены, пилоны, колонны, столбы и диафрагмы жесткости – работают в условиях больших эксцентриситетов, и точность их расчетов существенно влияет на надежность и экономичность строительства [1–3]. От элементов с малыми эксцентриситетами они отличаются не только двухзначными эпюрами напряжений и деформаций в поперечном сечении, но и наличием растянутой зоны бетона и горизонтальных или наклонных трещин на его наименее напряженной грани. Физически разделение на эти случаи определяется положением нормальной сжимающей силы N – на грани или за пределами ядра сечения, что аналитически определяется величиной ее относительного эксцентриситета, равного $e_0/h \geq 0,167$ [4–6].

Несмотря на столь существенное различие случаев, методика, которая описана в СП 63.13330.2018, назначает их расчет одинаково – путем установления величины внешней продольной сжимающей силы N только сопротивлением сжатой зоны бетона прямоугольной эпюрой напряжений с центром по линии ее действия, без определения напряженно-деформированного состояния (НДС) растянутой зоны поперечного сечения, как это приведено на рис. 1, а,

отражая их несущую способность простейшей аналитической зависимостью:

$$N \leq A_b R_b = R_b b h (1 - \frac{2e_0}{h}) \quad (1)$$

Таким образом, нормативная методика искусственно наделяет реальный бетонный элемент свойствами односторонних связей, то есть рассматривает его работающим только на сжатие и не сопротивляющимся растягивающим напряжениям и деформациям, тем самым постулируя, что исчерпание сопротивления внецентренно-сжатого элемента, независимо от величины относительного эксцентриситета e_0/h , всегда начинается с появления горизонтальной или наклонной трещины на наименее напряженной (сжатой) грани с разделением его на две взаимно независимые вертикальные призмы, одна из которых подвержена центральному сжатию, а другая – отстранена от каких-либо воздействий.

К достоинствам нормативного решения относится его исключительная простота и хорошо знакомый инженеру аналитический аппарат. Однако его точность и надежность недостаточны для развития бетонных и железобетонных конструкций, поскольку позволяет получать довольно точные результаты только для бетонов невысокой прочности классов В12,5-В20. Для бетонов классов В40-В60 погрешности нормативной методики достигают 20 %.

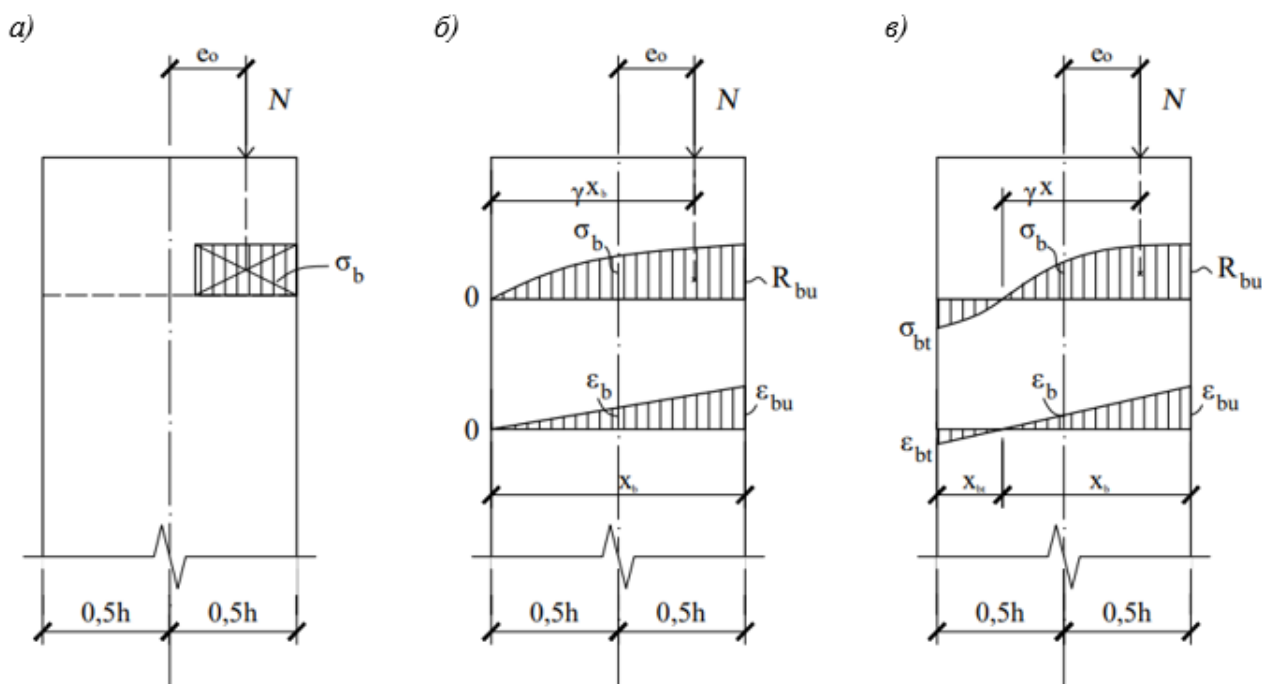


Рис. 1. Физические модели НДС в поперечном сечении внецентренно-сжатого элемента с большими эксцентриситетами: а – по нормам; б и в – в решениях автора

Несмотря на известные успехи в исследовании строительных материалов, достоверная физическая теория работы и сопротивления внецентренно-сжатого бетона еще не создана и действующие нормы проектирования и расчета вынуждены прибегать к существенно упрощенным решениям и методикам. Но естественный ход событий, в первую очередь, постоянное внедрение в практику строительства новых эффективных видов бетонов, в том числе композитных и высокопрочных, выдвигает настоятельную необходимость создания физически обоснованной теории сопротивления бетонных и железобетонных конструкций внецентренному сжатию и изгибу [7, 8]. Главное, чтобы она была общей для широкого круга применяемых материалов, базировалась на действительных физических предпосылках и допущениях, не противоречащих друг другу, а также была более точной для различных случаев внецентренного сжатия. Естественное при этом усложнение математического аппарата в условиях широкого использования электронно-вычислительных машин может быть допущено без ограничений.

Методы, оборудование, материалы. В БГТУ им. В.Г. Шухова разработаны новая физическая теория работы и расчет внецентренно-сжатых бетонных элементов, лишенные недостатков нормативной методики [9]. В основу теории положен ряд общепринятых и выдвигаемых автором новых гипотез и предпосылок, а именно:

- в общем случае внецентренного сжатия бетона верное решение возможно лишь при совместном рассмотрении и использовании условий равновесия предельных усилий и деформаций;
- в расчетах должны использоваться только зависимости, описывающие действительные (нелинейные) свойства бетона, который не наделяется свойствами абсолютной упругости или пластичности. Это реальный упругопластический материал, обладающий свойствами двусторонних связей, то есть работающий на сжатие и растяжение;
- по условиям работы, внецентренно-сжатые элементы, в предельном состоянии разрушения сжатого бетона, рассчитываются без учета сопротивления их растянутой зоны;
- законы однородного НДС центрального сжатия бетона (эпюры и диаграммы напряжений и деформаций) не переносятся однозначно на описание его неоднородного НДС при внецентренном сжатии, для которого характерны градиенты сопротивлений и предельных деформаций, а трансформируются с увеличением их значений на наиболее напряженной грани;
- для условий деформации принимается закон плоских сечений;
- важнейшим фактором общего решения для бетона является его основное свойство, отличающее от абсолютно упругих материалов – пластичность;

– коэффициенты полноты эпюры нормальных напряжений бетона заранее не задаются, а определяются в ходе общего решения;

– в качестве критерия прочности принимается предельная сжимаемость бетона при неоднородном НДС, которое можно определить в экспериментах прямыми методами.

Основная часть. Формализация авторских предпосылок и гипотез строгими физическими моделями НДС в поперечном сечении бетонного элемента (рис. 1, б, в), отображаемые соответствующими аналитическими зависимостями при нахождении искомого продольного усилия сжатия N , приводит к необходимости решения следующей системы совместных уравнений:

I. Условия равновесия:

$$N = \omega_{bu} b x_{bu} R_{bu} \quad (2)$$

$$Ne_0 \leq \omega_{bu} b x_{bu}^2 (1 - \gamma_{bu}) R_{bu} \quad (3)$$

II. Условия деформаций:

$$\varepsilon_{bu}/x_{bu} = \varepsilon_{bt}/x_{bt} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{bu} = \varepsilon_b (1 + 6e_0/h) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{bt} = \varepsilon_b (1 - 6e_0/h) \quad (6)$$

III. Физические законы:

$$\lambda = 1/(1,25 + 0,015 \cdot R_b) \quad (7)$$

$$\varepsilon_b = 1,25 \cdot 10^{-3} + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot R_b \quad (8)$$

$$\sigma_b = \varepsilon_b E_b / (1 + \lambda E_b \varepsilon_b / R_b) \quad (9)$$

$$R_b = \varepsilon_{bu} E_b / (1 + \lambda E_b \varepsilon_{bu} / R_b) \quad (10)$$

IV. Геометрические соотношения:

$$h = x_b + x_{bt} \quad (11)$$

$$\omega_{bu} = \int_0^x \sigma_b dz = R_b \left[1 - \frac{R_b}{\lambda \varepsilon_{bu} E_b} \ln \left(1 - \frac{\lambda \varepsilon_{bu} E_b}{R_b} \right) \right] / \lambda R_{bu} \quad (12)$$

$$\gamma_{bu} = \int_0^x \sigma_b z dz = 0,333(2,5 - \omega_{bu}) \quad (13)$$

Аналитические зависимости вышеприведенных условий равновесия предельных усилий, деформаций и геометрических соотношений являются хорошо известными и в дополнительном объяснении не нуждаются. А уравнения и аналитические зависимости, отражающие физические законы, разработанные автором на основании анализа результатов многочисленных экспериментальных лабораторных исследований бетонных и железобетонных элементов в условиях центрального и внецентренного сжатия и изгиба, требуют определенных пояснений.

Так, зависимость (7) для определения коэффициента пластичности бетона λ , являющегося важнейшим свойством упругопластических материалов, установлена автором на основании

энергетических принципов – как отношение работы, затраченной на пластическое деформирование, к общей работе, пошедшей на его разрушение при центральном сжатии (рис. 2).

Зависимость (8) позволяет получать теоретические значения предельных относительных деформаций укорочения коротких центрально-сжатых бетонных призм из различных по прочности бетонов при исчерпании их сопротивления, установленного по результатам опытных экспериментальных исследований [10].

Зависимости (9) и (10) отображают кривую, ограничивающую эпюру нормальных напряжений внецентренно-сжатого элемента (рис. 2). В связи с невозможностью прямыми методами экспериментально определять градиенты краевых напряжений укорочения при исчерпании сопротивления бетона, в качестве основы физического закона при его неоднородном напряженно-деформированном состоянии принимаем кривую деформирования, полученную с постоянной скоростью при осевом нагружении, то есть без ниспадающей ветви, с теоретической экстраполяцией вперед. Эти монотонные дробно-рациональные функции выгодно отличаются от других аналитических зависимостей отсутствием экстремума, то есть открытым с одной стороны интервалом. Их теоретическая экстраполяция вперед позволяет подобным образом наиболее просто и с наименьшими погрешностями отобразить эпюру нормальных напряжений и деформаций бетона при неоднородном НДС внецентренного сжатия бетона [11–13].

Анализ обработки по методу наименьших квадратов опытных результатов деформирования различных по прочности тяжелых бетонов при центральном сжатии позволяет полагать, что достаточно точно эти кривые можно провести так, чтобы они удовлетворяли трем точкам: началу координат ($\sigma_b = 0$), микротрещинообразования ($\sigma_b = 0,4R_b$), и последней устойчивой при измерении точке ($\sigma_b = 0,9R_b$), сохраняя для удобства практических расчетов условие равенства начального секущего модуля деформаций E'_b его нормативному значению E_b . Полученные по зависимостям (9) и (10) теоретические значения ($\sigma_b \varepsilon_b$, $R_{bu} \varepsilon_{bu}$) хорошо соответствуют результатам многочисленных экспериментов с бетонами различной прочности при центральном и внецентренном сжатии.

Необходимо отметить, что полученная автором на основании обработки многочисленных опытных данных зависимость (10) отображает принятый в качестве основного деформационный критерий прочности бетона, соответствующий концепции о том, что при неоднородном НДС исчерпание сопротивления наступает

вследствие достижения его наиболее напряженными (сжатыми) фибрами градиентов предельной сжимаемости. Теоретические значения ε_{bu} и R_{bu} , получаемые по (10), всегда больше ε_b и

R_b , и хорошо соответствуют опытным данным исследований для различных по прочности бетонов при внецентренном сжатии и изгибе.

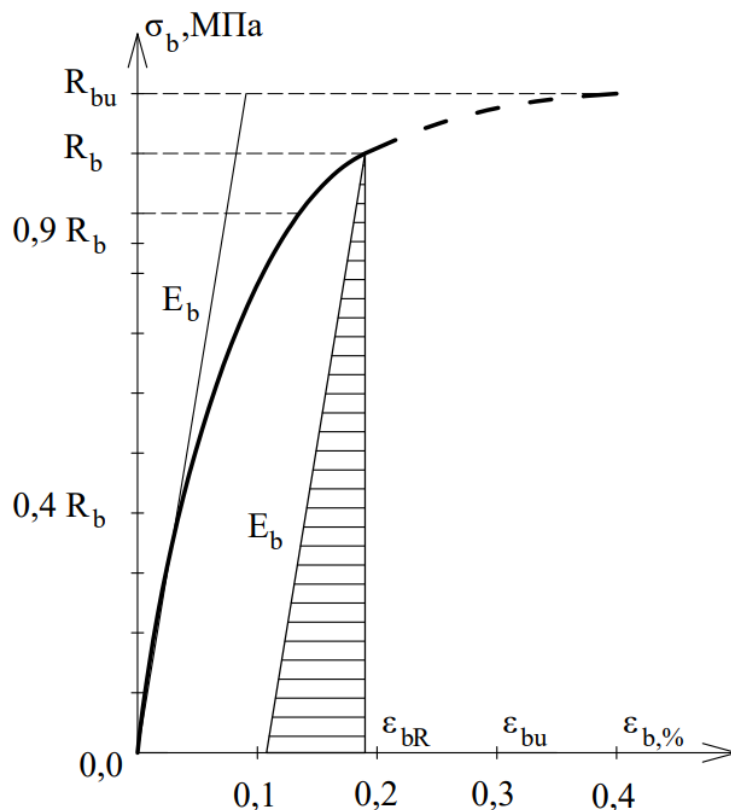


Рис. 2. Деформирование бетона при центральном (ε_b , R_b) и внецентренном сжатии (ε_{bu} , R_{bu})

Теперь эта сложная задача легко решается, поскольку мы располагаем системой всех необходимых совместных уравнений (2–13). На основании разработанного решения составлены алгоритмы и программы машинного счета для электронно-вычислительных машин, по которым искомое значение N устанавливается быстро [14]. Незатруднителен и соответствующий ручной счет, последовательность которого приведена ниже.

При заданных значениях класса бетона B , размеров поперечного сечения b и h и длины внецентренно-сжатого элемента, величины относительного эксцентриситета l_0/h — по зависимостям (5), (6) и (8) определяются соответственно значения ε_b , ε_{bu} и ε_{bt} , располагая которыми, устанавливаются по (4), (7) и (10) значения x_{bu} , λ и R_{bu} . Далее по уравнению (12) определяется величина ω_{bu} , позволяющая по зависимости (3) определить искомое значение продольной сжимающей силы N . В случае необходимости, определив по зависимости (13) величину координаты γ_{bu} , можно по зависимости (4) произвести проверку полученного решения.

Для установления качественного соответствия и количественной оценки степени точности

разработанного теоретического решения и аналитических зависимостей были проведены соответствующие машинные и ручные численные расчеты относительной несущей способности внецентренно-сжатых элементов с большими эксцентриситетами (от 0,167 до 0,45 h) классов бетона по прочности на сжатие от В15 до В60 в сопоставлении с данными других исследований [15–20] и нормативной методикой. Установлено, что разработанное решение дает качественно более правильные и количественно более точные результаты во всем диапазоне изменения этих эксцентриситетов и прочности бетона, чем в нормах, осуществляя дифференцированный подход к различным по прочности бетонам.

Разработанное теоретическое решение позволяет получить ряд важнейших следствий. Так, установлено, что несущая способность большинства рассчитанных элементов [9, 10], по сравнению с определенной по нормативной методике, оказалась на 20–25 % больше, а поперечная жесткость на 30–35 %.

Выводы. Основанная на наиболее физически достоверных, строгих предположениях и гипотезах, разработанная теория сопротивления и методика расчета коротких бетонных элементов

при внецентренном сжатии с большими эксцентриситетами оказалась наиболее общей и точной для различных по прочности бетонов.

Высокая степень точности разработанного теоретического решения позволяет считать оправданным и возможным учет особенностей деформирования бетона при неоднородном НДС градиентов предельных краевых сопротивлений и деформаций, для разработки верных физических теорий работы и сопротивления бетонных и железобетонных конструкций при внецентренном сжатии и изгибе. Аналитические зависимости разработанной методики, полученные в замкнутой форме, могут быть рекомендованы для использования в проектной практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Старишко И.Н. Варианты и случаи, предлагаемые для расчетов внецентренно сжатых элементов // Бетон и железобетон. 2012. № 3. С. 14–20.
2. Кодыш Э.Н., Никитин И.К., Трекин Н.Н. Расчет железобетонных конструкций из тяжёлого бетона по прочности, трещиностойкости и по деформациям. М.: Изд-во АСВ, 2011. 352 с.
3. Тамразян, А.Г. Расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов при динамическом нагружении в условиях огневых воздействий // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 29–35.
4. Тамразян А.Г., Аветисян Л.А. Расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов на кратковременную динамическую нагрузку // Строительство: наука и образование. 2013. № 4. С. 2.
5. Reliability Analysis for Eccentrically Loaded Columns. ACI Structural Journal. American Concrete Institute; 2005. 102(5). Available from: doi:10.14359/14663.
6. Lechman M., Stachurski A. Determination of stresses in RC eccentrically compressed members using optimization methods // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1922(130003). doi:10.1063/1.5019133.
7. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов В.И. Результаты экспериментальных исследований конструкций квадратного и коробчатого сечений из высокопрочного бетона при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2018. № 6(80). С. 32–43.
8. Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях. Часть II // Строительные материалы. 2008. № 3. С. 9–13.
9. Донченко О.М., Никулин А.И., Литовкин Н.И. Анализ теории сопротивления и методики расчета внецентренно сжатых железобетонных элементов // Сб. трудов «Строительные конструкции, здания и сооружения». Белгород: БТИСМ, 1988. С. 3–13.
10. Донченко О.М., Никулин А.И., Литовкин Н.И. Надежность и экономичность теории сопротивления внецентренно сжатых железобетонных элементов // Тезисы докладов к предстоящей Всесоюзной конференции: «Фундаментальные исследования и новые технологии в строительном моделировании». Белгород, 1989. Ч. 11. Т. 1.
11. Cherpurnenko V., Rusakova E., Bugayan I., Vysokovskiy D., Babakhina L. Calculation of eccentrically compressed reinforced concrete columns under various creep laws // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 281(01050). doi:0.1051/e3sconf/202128101050.
12. Никулин, А.И. Ломтев И.А., Никулина Ю.А. Прочность внецентренно сжатых железобетонных элементов с трещинами в растянутой зоне // Технические науки в мире: от теории к практике : Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону: Инновационный центр развития образования и науки, 2015. С. 58–61.
13. Ильин Н.А., Мордовский С.С., Мальгина В.А., Киреева Н.А. К расчету прочности внецентренно-сжатого железобетонного элемента прямоугольного сечения // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10. № 1(38). С. 4–8. doi:10.17673/Vestnik.2020.01.1.
14. Св. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616266 Российская Федерация. Определение прочности и трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов прямоугольного поперечного сечения. Оpubл. 15.06.2020 / А. И. Никулин, А. Ф. К. Аль-Хаваф. Заявитель ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».
15. Foster S., Attard M. Experimental Tests on Eccentrically Loaded High Strength Concrete Columns. ACI Structural Journal. American Concrete Institute. 1997. Vol. 94(3). doi:10.14359/481.
16. Szcześniak A., Stolarski A. Numerical analysis of failure mechanism of eccentrically compressed reinforced concrete columns // Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation. 1st Edition. 2016. Pp. 1325–1329. doi:10.1201/9781315641645-217.
17. Адищев В.В., Иванов А.И., Петрова О.В., Мальцев В.В. Применение нелинейных диаграмм деформирования бетона для расчета внецен-

тренно сжатых железобетонных колонн // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 9(717). С. 5–19.

18. Савин С.Ю. К построению деформационных критериев особого предельного состояния внецентренно-сжатых элементов железобетонных каркасов зданий и сооружений // Строительство и реконструкция. 2020. № 5(91). С. 59–69. doi:10.33979/2073-7416-2020-91-5-59-69.

19. Masiuk H., Aleksiievets V., Aleksiievets I., Masiuk V. Calculated reliability of eccentrically

compressed concrete columns under the action of low cycle loading with alternating eccentricities // Strength of Materials and Theory of Structures. 2020. Vol. 104. Pp. 289–298. doi:10.32347/2410-2547.2020.104.289-298.

20. Trapko T., Musiał M. The effectiveness of CFRP materials strengthening of eccentrically compressed reinforced concrete columns // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2011. Vol. 1. Pp. 249–262. doi:10.1016/s1644-9665(12)60187-3.

Информация об авторах

Донченко Олег Михайлович, кандидат технических наук, профессор кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: kafedrasigsh@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 23.11.2021 г.

© Донченко О.М., 2022

Donchenko O.M.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

E-mail: kafedrasigsh@mail.ru

RESISTANCE OF SHORT CONCRETE ELEMENTS TO OFF-CENTER COMPRESSION WITH LARGE ECCENTRICITIES

Abstract. The paper considers the methodology of calculation of short concrete elements under eccentric compression with large eccentricities. The analysis of normative methods of calculation of eccentrically-compressed elements has been carried out and the reasons of non-compliance of design values with experimental ones for concrete of B15-B60 classes have been established. The equations of equilibrium conditions, deformations, physical laws and geometrical relations developed by the author on the basis of the results analysis of numerous experimental laboratory researches of concrete and reinforced concrete elements under central and eccentric compression and bending are presented. The numerical investigation of the bearing capacity of eccentrically compressed elements with large eccentricities (from 0.167 to 0.45h) and different compressive strengths of concrete in comparison with the data of other researches and normative methods has been made. The results showed that the bearing capacity of the majority of calculated elements compared to the normative method turned out to be 20–25 % higher, and transverse stiffness by 30–35 %. It has been established that the developed solution gives qualitatively more correct and quantitatively more exact results in the whole range of eccentricities and concrete strength than those obtained by means of normative literature, realizing a differentiated approach to different concrete strengths. The analytical dependences of the developed method, obtained in closed form, can be recommended for use in design practice.

Keywords: eccentrically compressed elements, large eccentricities, equilibrium conditions, ultimate forces and deformations, ultimate compressibility of concrete, plasticity factor of concrete.

REFERENCES

1. Starishko I.N. Variants and cases proposed for calculations of eccentrically compressed elements [Varianty i sluchai, predлагаемые для расchetov vnecentrenno szhatyh elementov]. Beton i zhelezobeton. 2012. No. 3. Pp. 14–20. (rus)

2. Kodesh E.N., Nikitin I.K., Trekin N.N. Calculation of Reinforced Concrete Structures of Heavy Concrete for Strength, Fracture Resistance and Deformations [Расchet zhelezobetonnykh konstruktsiy iz tyazhylogo betona po prochnosti, treshchinos-tojnosti i po deformatsiyam]. Moscow: Publishing House ASV, 2011. 352 p. (rus)

3. Tamrazyan A.G. Calculation of eccentrically compressed reinforced concrete elements under dynamic loading under fire loads [Расchet vnecentrenno szhatyh zhelezobetonnykh elementov pri dinamicheskom nagruzhении v usloviyah ognevyyh vozdeystviy] Industrial and Civil Engineering. 2015. No. 3. Pp. 29–35. (rus)

4. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Calculation of eccentrically compressed reinforced concrete elements for short-term dynamic loading [Расchet vnecentrenno szhatyh zhelezobetonnykh elementov na kratkovremennuyu dinamicheskuyu nagruzku]. Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie. 2013. No. 4. P. 2. (rus)

5. Reliability Analysis for Eccentrically Loaded Columns. ACI Structural Journal. American Concrete Institute; 2005. 102(5). Available from: doi:10.14359/14663
6. Lechman M., Stachurski A. Determination of stresses in RC eccentrically compressed members using optimization methods. AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1922(130003). doi:10.1063/1.5019133
7. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I. Results of experimental studies of structures of square and box sections of high-strength concrete in torsion with bending [Rezultaty eksperimental'nyh issledovaniy konstrukcij kvadratnogo i korobchatogo sechenij iz vysokoprochnogo betona pri kruchenii s izgibom]. Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2018. No. 6(80). Pp. 32–43. (rus)
8. Kaprielov S.S., Travush V.I., Karpenko N.I. Modified high strength concretes of classes B80 and B90 in monolithic structures. Part II [Modificirovannye vysokoprochnye betony klassov V80 i V90 v monolitnykh konstrukciyah. CHast' II]. Stroitel'nye materialy. 2008. No. 3. Pp. 9–13. (rus)
9. Donchenko O.M., Nikulin A.I., Litovkin N.I. Analysis of the Theory of Resistance and Calculation Techniques of eccentrically Compressed Concrete Elements [Analiz teorii soprotivleniya i metodiki rascheta vnecentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov] Sb. trudov «Stroitel'nye konstrukcii, zdaniya i sooruzheniya». Belgorod: BTISM, 1988. Pp. 3–13. (rus)
10. Donchenko O.M., Nikulin A.I., Litovkin N.I. Reliability and efficiency of resistance theory of noncentrally compressed reinforced concrete elements [Nadezhnost' i ekonomichnost' teorii soprotivleniya vnecentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov]. «Fundamental'nye issledovaniya i novye tekhnologii v stroitel'nom modelirovanii». Belgorod, 1989. Part 11. Vol. 1. (rus)
11. Chepurnenko V., Rusakova E., Bugayan I., Vysokovskiy D., Babakhina L. Calculation of eccentrically compressed reinforced concrete columns under various creep laws. E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 281(01050). doi:10.1051/e3sconf/202128101050
12. Nikulin A.I., Lomtev I.A., Nikulina Y.A. The strength of eccentrically compressed reinforced concrete elements with cracks in the tensile zone [Prochnost' vnecentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov s treshchinami v rastyanutoj zone]. Tekhnicheskie nauki v mire: ot teorii k praktike. Rostov-na-Donu: Innovacionnyj centr razvitiya obrazovaniya i nauki, 2015. Pp. 58–61. (rus)
13. Ilyin N.A., Mordovsky S.S., Malgina V.A., Kireeva N.A. To the calculation of the strength of off-center-compressed reinforced concrete element of rectangular section [K raschetu prochnosti vnecentrenno-szhatogo zhelezobetonного элемента pryamougol'nogo secheniya]. Gradostroitel'stvo i arhitektura. 2020. Vol. 10. No. 1(38). Pp. 4–8. doi:10.17673/Vestnik.2020.01.1 (rus)
14. State Registration Certificate for a Computer Program No. 2020616266 of the Russian Federation. Determination of Strength and Cracking Resistance of Out-of-Center Compressed Reinforced Concrete Elements of Rectangular Cross-Section [Rossijskaya Federaciya. Opredelenie prochnosti i treshchinos-tojnosti vnecentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov pryamougol'nogo poperechnogo secheniya.]. Published on June 15, 2020. A.I. Nikulin, A.F. K. Al-Khawaf. Applicant FGBOU VPO "Belgorod State Technological University named after Shukhov. V.G. Shukhov". (rus)
15. Foster S., Attard M. Experimental Tests on Eccentrically Loaded High Strength Concrete Columns. ACI Structural Journal. American Concrete Institute. 1997. Vol. 94(3). doi:10.14359/481.
16. Szcześniak A., Stolarski A. Numerical analysis of failure mechanism of eccentrically compressed reinforced concrete columns. Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation. 1st Edition, 2016. Pp. 1325–1329. doi:10.1201/9781315641645-217
17. Adishev V.V., Ivanov A.I., Petrova O.V., Maltsev V.V. Application of nonlinear diagrams of concrete deformation to calculate eccentrically compressed reinforced concrete columns [Primenenie nelinejnykh diagramm deformirovaniya betona dlya rascheta vnecentrenno szhatykh zhelezobetonnykh kolonn]. News of higher educational institutions. Construction. 2018. No. 9(717). Pp. 5–19. (rus)
18. Savin S.Yu. To the construction of deformation criteria of the special limiting state of the noncentrally compressed elements of reinforced concrete frames of buildings and structures [K postroeniyu deformacionnykh kriteriev osobogo predel'nogo sostoyaniya vnecentrenno-szhatykh elementov zhelezobetonnykh karkasov zdaniy i sooruzhenij]. Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2020. No. 5(91). Pp. 59–69. doi:10.33979/2073-7416-2020-91-5-59-69 (rus)
19. Masiuk H., Aleksiievets V., Aleksiievets I., Masiuk V. Calculated reliability of eccentrically compressed concrete columns under the action of low cycle loading with alternating eccentricities. Strength of Materials and Theory of Structures. 2020. Vol. 104. Pp. 289–298. doi:10.32347/2410-2547.2020.104.289-298
20. Trapko T., Musiał M. The effectiveness of CFRP materials strengthening of eccentrically compressed reinforced concrete columns. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2011. Vol. 1. Pp. 249–262. doi:10.1016/s1644-9665(12)60187-3

Information about the author

Donchenko, Oleg M. PhD, Professor. E-mail: kafedrasigsh@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 23.11.2021

Для цитирования:

Донченко О.М. Сопротивление коротких бетонных элементов внецентренному сжатию с большими эксцентриситетами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 49–56. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-49-56

For citation:

Donchenko O.M. Resistance of short concrete elements to off-center compression with large eccentricities. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 4. Pp. 49–56. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-49-56

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-57-67

Кочерженко В.В., *Сулейманова Л.А.*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: kafedrasigsh@mail.ru*

ИННОВАЦИОННЫЕ СВАЙНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СОВРЕМЕННОМ ФУНДАМЕНТОСТРОЕНИИ

Аннотация. Свайные технологии в современном фундаментостроении являются ведущим направлением совершенствования их конструктивно-технологических решений. Несущая способность свайных фундаментов в значительной степени зависит от формирования силы трения грунтов по боковой поверхности свай. Авторами рассмотрены технологии возведения трансформируемых свай с применением невзрывчатого разрушающего вещества, модульных свай с развитой боковой поверхностью и оптимальным поперечным сечением, свай с использованием геополимерной технологии и свай, позволяющих изменять гранулометрический состав прилегающего грунта. Приведены результаты лабораторных исследований моделей данных свай, установлена эффективность их применения и предложены методики расчета их несущей способности. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что сопоставление удельной несущей способности забивных свай различного поперечного сечения, показало, что наиболее рациональное сечение – тавровое. Разработана нормативно-техническая документация – «Технические условия на сваи модульные забивные Т-образные» для изготовления, транспортировки и погружения этого вида свай для промышленного и гражданского строительства. Предложены варианты компоновки фундаментных систем на основе модульных свай таврового сечения в зависимости от характера действующей на них нагрузки.

Ключевые слова: свая, свайная технология, несущая способность, гранулометрический состав, угол внутреннего трения, висячие сваи, полости.

Введение. Свайные технологии в современном фундаментостроении являются ведущим направлением совершенствования их конструктивно-технологических решений. Несущая способность свайных фундаментов в значительной степени зависит от формирования силы трения грунтов по боковой поверхности свай.

Одним из перспективных направлений является разработка способов увеличения сил трения по боковой поверхности забивных висячих железобетонных свай, чего можно добиться за счет увеличения площади их боковой поверхности или за счет увеличения сил трения по ней, например, путем изменения гранулометрического состава прилегающего к свае грунта.

Авторами рассматриваются вопросы разработки модульных свай с повышенной площадью боковой поверхности и вопросы повышения несущей способности забивных висячих свай путем изменения гранулометрического состава грунта, прилегающего к свае, в процессе ее забивки.

Разработке и исследованию инновационных конструктивно-технологических решений забивных висячих свай, обеспечивающих значительное повышение их несущей способности, в настоящее время уделено особое внимание. Авторами проводятся исследования [1, 2] по следующим направлениям:

- возведение трансформируемых свай;

- использование модульных свай с развитой боковой поверхностью;

- использование геополимерной технологии при забивке свай;

- возведение свай, позволяющих изменять гранулометрический состав прилегающего грунта.

Материалы и методы. Методика исследования предусматривает анализ грунтовых лотков с прозрачными стенами и установок, позволяющих определять несущую способность моделей свай под действием статической нагрузки. На рис. 1 представлены грунтовые лотки с установками для исследования разработанных конструктивно-технологических решений и модели свай, используемые в экспериментальных исследованиях. При этом использовались стандартные методы определения несущей способности свайных фундаментов, методы лабораторного определения характеристик прочности и деформативности [3–7].

Основная часть. Сущность технологии трансформирования железобетонных свай состоит в том, что при формировании тела сваи в типовой опалубке сечением 30×30 см или 40×40 см на заводе железобетонных изделий по центру сваи в верхней ее части устанавливается пластиковая клинообразная конструкция в виде четырехлепестковой звезды длиной 0,75 от всей длины сваи (рис. 2).

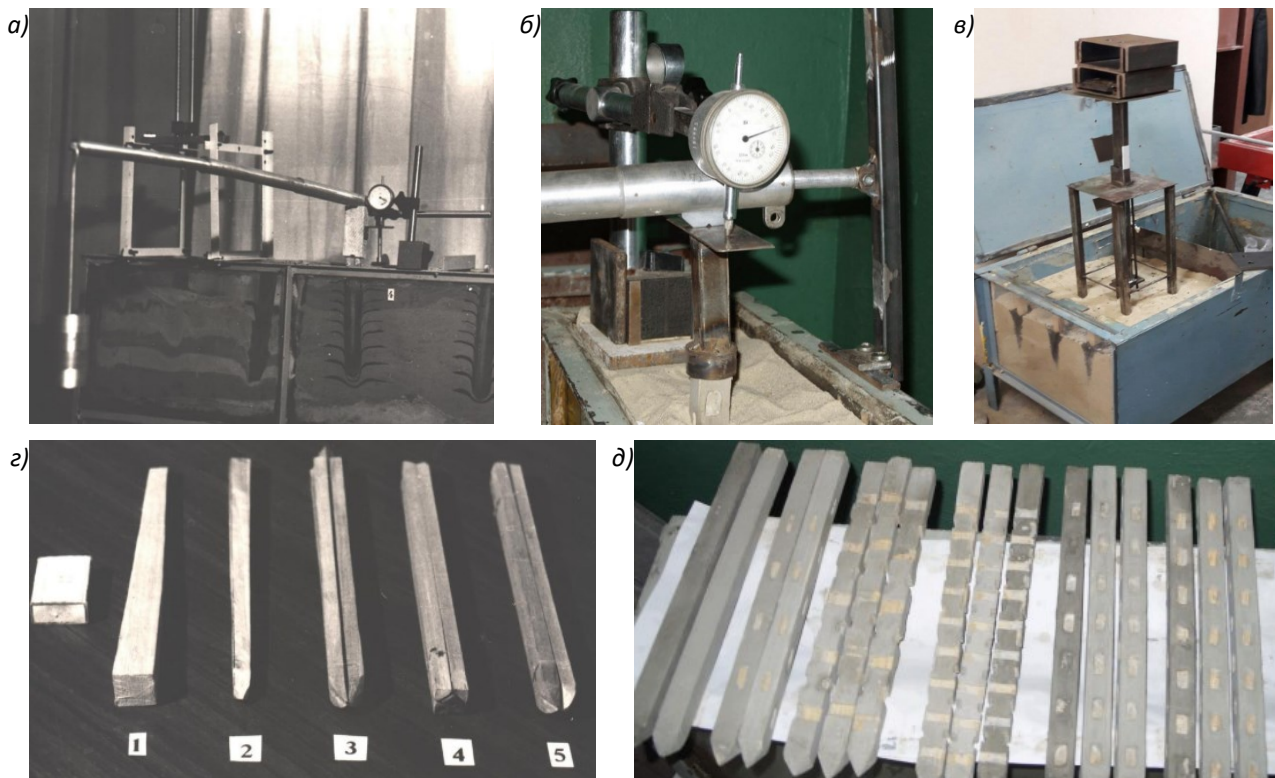


Рис. 1. Внешний вид грунтовых лотков с установками для исследования разработанных новых конструктивно-технологических решений и моделей свай, используемых в экспериментальных исследованиях:
 а и б – лоток с прозрачной стенкой и нагружающая установка для испытания трансформируемых моделей свай и моделей свай с использованием геополимерной технологии;
 в – грунтовых лоток с установкой для испытания моделей свай с «карманами»; г – модели трансформируемых свай;
 д – модели свай с «карманами»

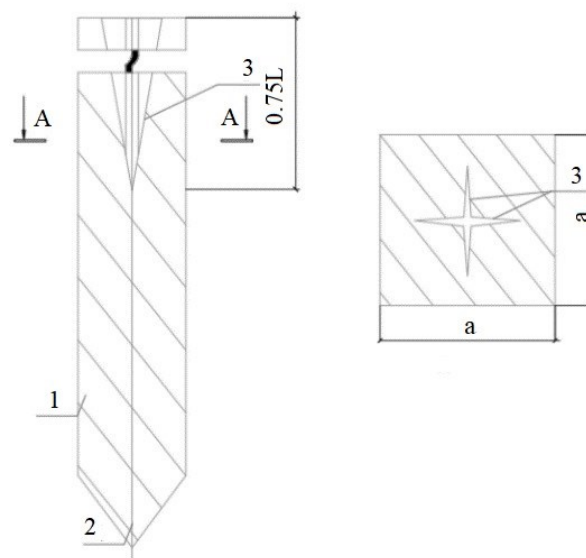


Рис. 2. Конструкция сборной железобетонной сваи, трансформируемой в пирамидальную с помощью невзрывчатого разрушающего вещества: 1 – тело железобетонной призматической сваи; 2 – острие сваи; 3 – пластиковый клинообразный канал в виде четырехлепестковой звезды

Перед забивкой призматической сваи внутрь пластиковой клинообразной конструкции заливается смесь экологически чистого невзрывчатого разрушающего вещества (НРВ) [8], которое в течение 1...2 сут увеличивается в объеме в 2...3 раза, оказывая на лепестках сваи давление до

40...50 МПа, раздвигает их, трансформируя сваю из призматической в пирамидальную.

Результаты лабораторных испытаний трансформируемой свайной технологии (рис. 1) представлены на рис. 3.

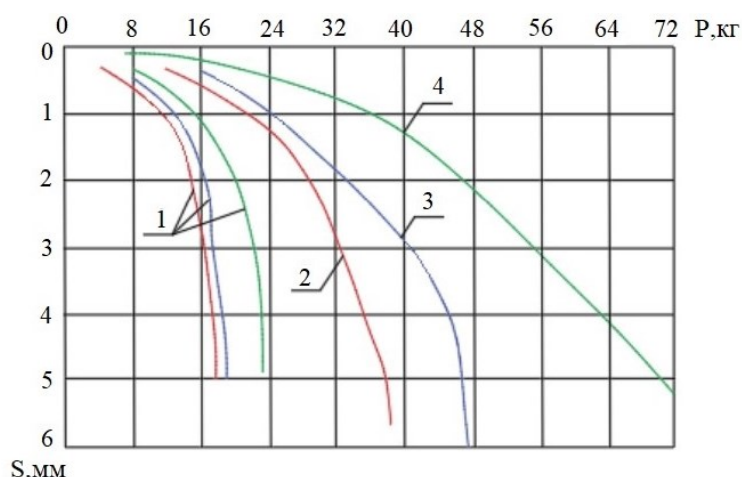


Рис. 3. Зависимость осадки моделей свай от нагрузки: 1 – для призматической сваи ($i = 0$); 2 – для пирамидальной сваи ($i = 0,01$); 3 – для забивной трансформируемой сваи с использованием НРВ с расклиниванием в одной плоскости ($i = 0,04$), 4 – для трансформируемых свай с использованием НРВ с расклиниванием в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях

Проведены полевые исследования трансформируемой сваи глубиной 1,5 м, собранной из четырех металлических уголков. После забивки сваи в центральную часть ее между уголками заливается НРВ. По прошествии 5...6 сут пирами-

дальные и призматические сваи (без использования НРВ) испытаны статической нагрузкой. Грунт представлен песком мелким средней плотности. Результаты полевых испытаний призматических и пирамидальных моделей свай глубиной 1,5 м в песке мелком представлены на рис. 4.

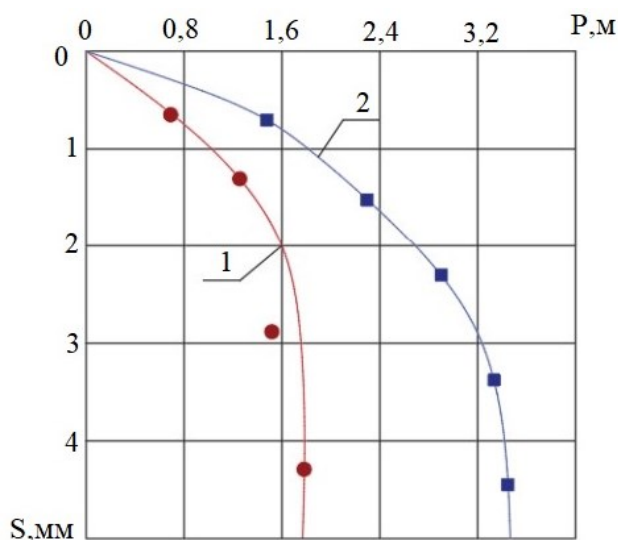


Рис. 4. Результаты полевых испытаний трансформированных моделей свай в мелком песке средней крупности: 1 – призматические сваи; 2 – пирамидальные сваи

Из данных, представленных на рис. 3 и 4, можно сделать вывод о соответствии результатов лабораторных и полевых испытаний по характеру зависимости «осадка-нагрузка», при этом несущая способность трансформированных (пирамидальных) свай значительно выше призматических свай (без применения НРВ).

Лабораторные и полевые исследования позволили установить, что трансформирование и призматических свай в пирамидальные (с $i = 0,04$) позволяют увеличить несущую способность свай после трансформации на 40...45 %.

Методика расчета несущей способности трансформируемых свай основывается на [9] с учетом угла конусности трансформируемой сваи – α , град, который определяется на строительной площадке на экспериментальной свае.

Оптимальное поперечное сечение модульных свай с развитой боковой поверхностью в своих исследованиях установлено с использованием программных комплексов. Выбор рационального поперечного сечения модульных свай с развитой боковой поверхностью осуществляется на основе зависимости удельного расхода железобетона свай различного поперечного сечения

от глубины в глинистых и песчаных грунтах. Зависимости отношения сил трения по боковой поверхности свай к сопротивлению под острием свай таврового сечения в глинистых грунтах различной конструкции ($I_L = 0,3$; $I_L = 0,4$; $I_L = 0,5$), а

также в песчаных грунтах различной крупности и плотности.

Установлена зависимость удельного расхода железобетона свай различного поперечного сечения от глубины погружения в глинистые и песчаные грунты и представлена на рис. 5.

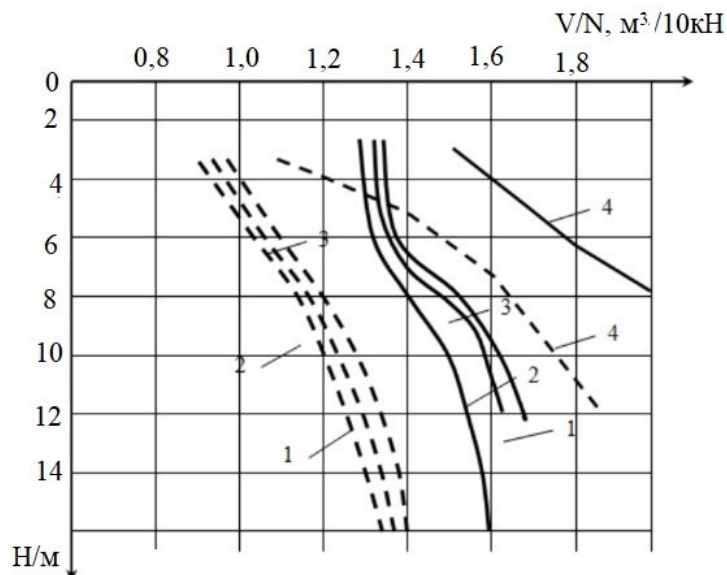


Рис. 5. Зависимость удельного расхода железобетона свай различного поперечного сечения от глубины погружения в глинистые грунты с $I_L = 0,5$ (сплошная линия) и песчаные грунты средней крупности, средней плотности (пунктирные линии): 1 – тавровое сечение; 2 – трехлепестковое сечение; 3 – треугольное сечение; 4 – квадратное сечение

Полученные результаты показали, что рациональным поперечным сечением модульных свай с развитой боковой поверхностью является тавровое, при погружении в глинистые песчаные грунты и песчаные грунты (рис. 5, кривая 1), так как это сечение имеет минимальный удельный расход железобетона на 100 кН.

Учитывая, что площадь сечения тавровой сваи под острием несколько меньше, чем сплошной квадратной сваи, установлена области рационального применения этой сваи с развитой боковой поверхностью (рис. 6).

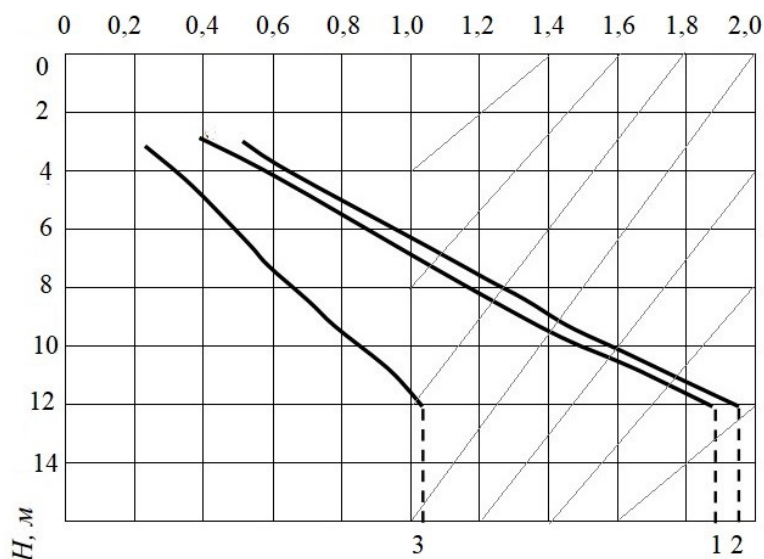


Рис. 6. Зависимость отношения сил трения по боковой поверхности к сопротивлению под острием свай различного поперечного сечения при погружении в пылевато-глинистые грунты с $I_L = 0,5$: 1 – тавровое сечение; 2 – треугольное сечение; 3 – квадратное сечение

Полученные результаты указывают на то, что область рационального применения свай с развитой боковой поверхностью располагается за соотношением сил трения к сопротивлению под острием более 1,0.

Изготовленные в заводских условиях сваи таврового сечения, согласно разработанным авторами Техническим условиям [10], испытано на осевое вдавливание по равномерной шкале нагрузок [11, 12], при величине ступени нагрузок 1/10

от ожидаемой величины предельной нагрузки. Результаты статических испытаний модульных свай таврового сечения длиной 6,0 м типовой призматической сваи длиной 8,0 м представлены на рис. 7.

Варианты компоновки фундаментных систем при основе модульных свай [13] таврового сечения представлены на рис. 8.

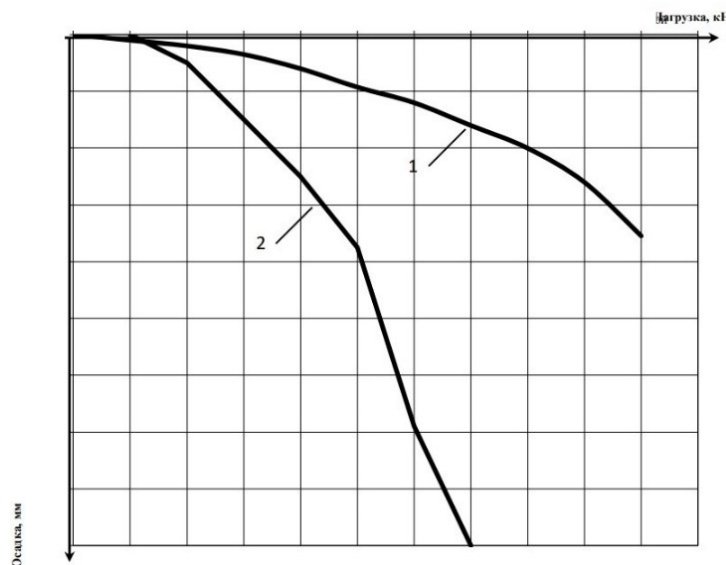


Рис. 7. Зависимость осадок свай от нагрузки при погружении в суглинки и глины полутвердые: 1 — типовая квадратная свая длиной 8,0 м; 2 — модульная свая таврового сечения длиной 6,0 м



Рис. 8. Варианты компоновки фундаментных систем на основе модульных свай таврового сечения

Серьезной проблемой являются применение свайных фундаментов в рыхлых песчаных или насыпных грунтах. Обычно в таких грунтах используют их химическое закрепление различными составами (геополимерная технология) [14, 15]. Авторами усовершенствована геополимерная технология возведения свайных фундаментов в рыхлых песчаных грунтах [16, 17]. Данное решение основано на том, что с целью исключения использования оборудования и сопутствующих технологических операций для подачи закрепляющих растворов в грунт, разработано конструктивно-технологическое решение, обеспечивающее проникновение раствора с воронки, установленной на поверхности грунта над точкой забивки свай. Для этого на боковой поверхности сваи (по всем четырем граням) предусматривают полости-«карманы», в которые попадает закреп-

ляющий состав и в процессе забивки выдавливается на них, проникая в рыхлый песок, окружающий тело сваи по всей глубине [18]. Схема разработанного конструктивно-технологического решения (геополимерной технологии) представлена на рис. 9.

Геополимерную технологию возведения свай в рыхлых песках исследовали в лабораторных условиях на установках представленной на рис. 1, б, модели сваи представлены на рис. 1, г. В качестве закрепляющего состава использовалась рецептура однорастворной силикатизации. На рис. 10 представлены модели свай с «карманами» после испытания извлечения их из грунтового лотка. Полученные результаты лабораторных испытаний моделей свай, возведенных с помощью геополимерной технологии, представлены в табл. 1.

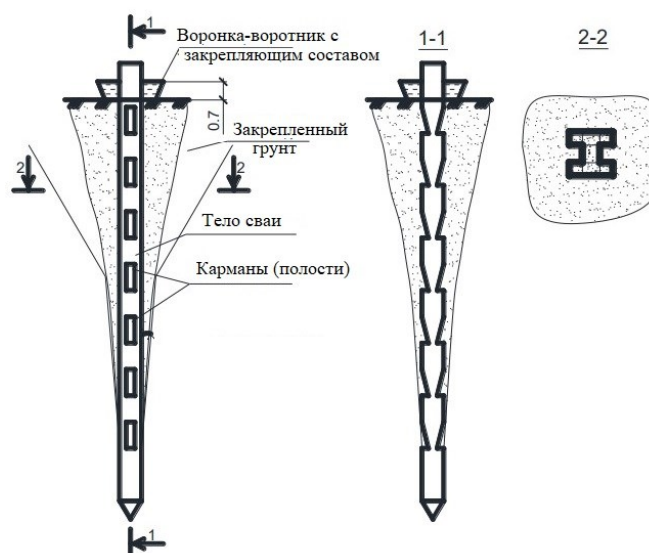


Рис. 9. Схема геополимерной технологии возведения свай в рыхлых грунтах

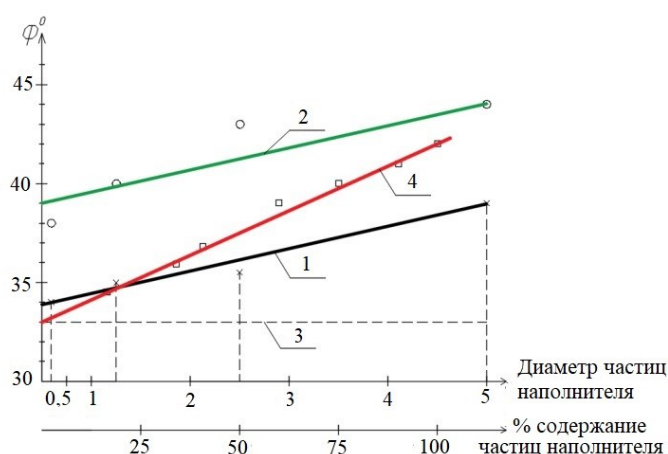


Рис. 10. Влияние содержания и крупности частиц наполнителя на угол внутреннего трения песка мелкого: 1 – содержание наполнителя в песке – 30 %; 2 – содержание наполнителя в песке – 50 %; 3 – песок мелкий без наполнителя (33°); 4 – процентное содержание наполнителя фракции 2,5 мм с шагом 15 %

Таблица 1

Результаты лабораторных испытаний моделей свай, возведенных с использованием геополимерной технологии (песок мелкий, рыхлый, воздушно-сухой влажности)

Вид моделей свай	Наличие закрепляющего состава при испытаниях	Несущая способность модели сваи, (кг)	Предельная осадка модели сваи, (мм)	Результаты испытаний относительно базовой модели (%)	
				Несущая способность	Осадка
Базовая (без «карманов»)	Без закрепляющего состава	20–25	6,0	–	–
Свая без «карманов»	С закрепляющим составом	60	6,0	+172	0
Свая с поперечными «карманами»	С закрепляющим составом	70	3,0	+218	-50
Свая с «карманами» вдоль сваи	С закрепляющим составом	90	6,0	+309	0

Полученные результаты лабораторных исследований геополимерной технологии при возведении свай в рыхлых грунтах позволили установить, что несущая способность свай при этой технологии их погружения увеличивается в

2,5...3 раза, при этом осадка свай уменьшается в 2 раза.

Методика расчета несущей способности свай, возведенных с применением геополимерной технологии предусматривает следующую последовательность:

– на площадке строительства на экспериментальной свае устанавливается угол конусности – α , град (при этом используют проектный закрепляющий состав);

– рассчитывается несущая способность сваи как пирамидальной на основе [9].

Исходя их требования к технологии погружения сваи, обеспечивающей изменение гранулометрического состава прилегающего грунта, с целью отказа от химических закрепляющих составов и расширения области применения (не только в рыхлых песках) разработано конструктивно-технологическое решение свайного фундамента, которое предполагает наличие полости

«карманов» определенной конфигурации на боковой поверхности сваи, воронку-воротник на поверхности грунта в точке забивки сваи.

Для подтверждения возможности увеличения силы трения при изменении гранулометрического состава песчаного грунта при забивке свай, в лабораторных условиях на сдвиговом приборе, исследовано влияние наполнителя в виде песка гравелистого к песку мелкому добавляли на его угол внутреннего трения. При этом к песку мелкому добавлялись частицы грунта крупностью 5; 2,5; 1,25; 0,65 мм, процентное содержание которых изменяли с шагом 15 %. Результаты лабораторных испытаний представлены на рис. 11.

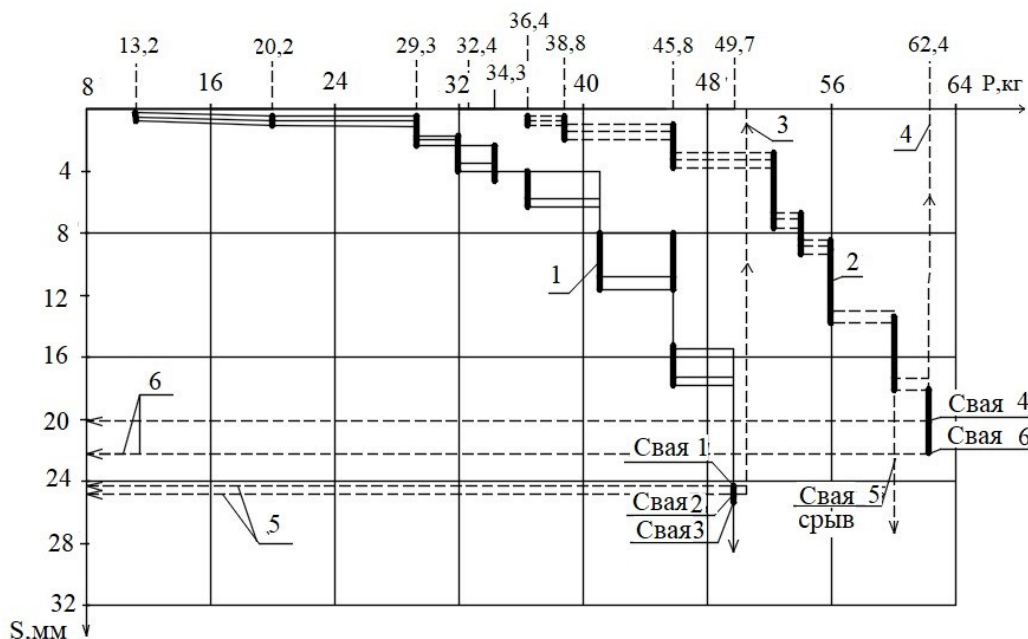


Рис. 11. График зависимости осадки моделей свай S от статической нагрузки P : 1 – результаты испытаний базовых свай № 1, 2 и 3; 2 – результаты испытаний свай с «карманами» № 3, 4 и 5; 3 – предельная нагрузка $P_{пр} = 49,7$ кг для базовых свай; 4 – предельная нагрузка $P_{пр} = 62,3$ кг для разработанных свай с «карманами»; 5 – осадка базовых свай при предельной нагрузке $S_{пр} = 25$ мм; 6 – осадка разработанных свай с «карманами» при предельной нагрузке $S_{пр} = 21$ мм

Полученные результаты (рис. 11, поз. 1) показали эффективность изменения гранулометрического состава песка на увеличение его угла внутреннего трения на 27...28 %. Следовательно, изменение гранулометрического состава прилегающего к свае грунта с увеличенным углом внутреннего трения приведет и к увеличению силы трения по боковой поверхности сваи и увеличению несущей способности свайного фундамента.

Несущую способность базовых и разработанных свай с «карманами» при наличии воротника с наполнителем фракции 1,25 мм, провели в лабораторных условиях с использованием установки и моделей свай, показанных на рис. 1, в и 1, г. Результаты экспериментов представлены на рис. 11, поз. 2.

Анализ результатов испытания моделей свай в лотке с мелким песком показали, что разработанные авторами конструктивно-технологические решения забивных висячих свай позволяют увеличивать их несущую способность на 25,3 % по сравнению с базовыми призматическими сваями. При этом предельная осадка моделей свай примерно одинаковая: 25 мм для базовых свай и 21 мм для разработанных.

Для изучения характера распределения наполнителя на глубине свай с «карманами», забивка моделей свай производится у прозрачной стенки лотка. При этом наполнитель с размерами частиц 1,25 мм окрашивается в черный цвет и засыпается в воротник. Результат полученного распределения наполнителя при забивке представлен на рис. 12.



Рис. 12. Характер распределения наполнителя (выкрашен в черный цвет) вокруг моделей свай с «карманами» в процессе забивки

Полученные результаты лабораторных исследований моделей свай с «карманами» при изменении гранулометрического состава по глубине и образованию угла наклона плоскости контакта наполнителя и грунтовой среды, очевидно, требует корректировки методики расчета несущей способности таких свай. При изменении гранулометрического состава прилежащего к свае грунта несущую способность забивной висячей сваи с «карманами» следует рассчитывать, как сумму сил:

$$N = \gamma_{\text{кар}}(R + T + R_{\text{кар}} + F_{\alpha}),$$

где R – расчетное сопротивление грунта основания под нижним концом сваи, рассчитываемое согласно [19, 20]; T – расчетное сопротивление наполнителя по боковой поверхности сваи (исключая площадь полостей по четырем граням сваи).

Выводы. Приведенные исследования инновационных свайных технологии позволяют сделать следующие выводы.

- лабораторные исследования моделей трансформируемых свай в грунтовой лотке с применением НРВ показал, что их несущая способность по сравнению с призматическими сваями на 60 % выше.

- Полевые испытания трансформируемых свай глубиной 1,5 м, проведенные в песках мелкой средней плотности показали, что трансформирование призматических свай в пирамидальные позволяет увеличить несущую способность свай на 40...43 %.

- сравнительный анализ технико-экономических показателей забивных свай с треуголь-

ным, крестообразным, трехлепестковым, тавровым, кольцевым и квадратным поперечными сечениями, нагружаемых в песчаных, пылевато-глинистых и глинистых грунтах показал, что наиболее рациональным сечением модульных свай с развитой боковой поверхностью является тавровое.

Эффективность тавровых свай по сравнению с призматическими, проявляется при соотношении сопротивления грунта под острием сваи к сопротивлению грунта на боковой поверхности более 1,0.

- использование геополимерной технологии при забивке свай с полостями на боковой поверхности в рыхлых песках позволяет увеличить их несущую способность в 2,5...3,0 раза, при этом осадка свай уменьшается в 2 раза.

- как показали результаты лабораторных исследований, изменение гранулометрического состава прилежащего к свае грунта, путем подачи через воронку и «карманы» наполнителя фракции 1,25 мм при забивке, увеличивает несущую способность свай на 25...28 %. При этом, как показало изучение характера распределения наполнителя вокруг моделей свай с «карманами» в процессе забивки, призматическая свая трансформируется в пирамидальную, если плоскость сдвига происходит по контакту «наполнитель–вмещающая среда».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kocherzhenko V., Suleymanova L. Methods for the construction of lowered structures and pile foundations // E3S Web of Conferences. 2021. 258. 09036. DOI:10.1051/e3sconf/202125809036

2. Kocherzhenko V., Suleymanova L., Kolesnikov M. Innovative structural and technological developments of pile foundation engineering // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 945(1). 012035. doi:10.1088/1757-899X/945/1/012035
3. ГОСТ 5686-2012. Грунты. Методы полевых испытаний сваями. М.: Стандартинформ, 2014. 47 с.
4. ГОСТ 12248-96. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Изд-во стандартов, 1996. 67 с.
5. ГОСТ 20276-85. Грунты Методы полевого определения характеристик деформируемости. М.: Госстрой СССР, 1985. 50 с.
6. Pronozin Y., Stepanov M., Volosyuk D. Pre-pressing soil physical-mechanical properties estimate of combined strip piles foundations ground base. // Construction and Architecture Bulletin. 2015. Pp. 64–73. doi:10.15593/2224-9826/2015.2.05
7. Langdon D. Foundations for structures. Spon's Civil Engineering and Highway Works Price Book 2009. 627 p.
8. Шереметьев Ю.Г., Удалов В.В., Сухарева А.И., Лучинина И.Г. Краткий экскурс в технологию получения и использования экологически чистого невзрывного разрушающего вещества (НРВ) // Проблемы строительного материаловедения и новые технологии. 1995. С. 113–120.
9. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85-М., 2011. М.: Минрегион России. 2011. 90 с.
10. ТУ 5817-005-02066339-00. Сваи модульные забивные Т-образные. М.: Департамент строительства и жилищно-коммунального хозяйства Белгородской области. 2000. 25 с.
11. Beim J., Niyama S. High strain dynamic testing of driven and cast in situ piles - Dynamic testing of large piles // Application of Stress-Wave Theory to Piles: Quality Assurance on Land and Off-shore Piling. CRC Press; 2000. Pp. 367–466.
12. Lacz S.W., Wells R.C. Design, Testing, and Automated Monitoring of ACIP Piles in Residual Soils // Contemporary Topics in Deep Foundations. American Society of Civil Engineers, 2009.
13. Пат. 3773 U1, Российская Федерация, МПК E04C 1/00. Забивная модульная свая с развинутой боковой поверхностью / В.А. Ивахнюк, В.В. Кочерженко, Ю.В. Осадько; заявитель и патентообладатель БГТАСМ. № 95120867/20; заявл. 13.12.1995; опубл. 16.03.1997, 5 с.
14. Пособие по химическому закреплению грунтов инъекцией в промышленном и гражданском строительстве (к СНиП 3.02.01.-83). М.: НИИОСП им. Н.М. Герсевича. 1985. 130 с.
15. СТО НОСТРОЙ 2.3.18-2011 Укрепление грунтов инъекционными методами в строительстве. М.: Изд-во БСТ. 2012. 73 с.
16. Буслов А.С., Бакулина А.А., Бурмина Е.Н. Технологическая и прочностная эффективность геополимерной технологии «самообмазки» при забивке свай // Промышленное и гражданское строительство. 2017. №5. С. 51–56.
17. Brown M. Recommendations for Static use and interpretation of piles installed in clay // Rapid Load Testing on Piles. CRC Press; 2008. Pp. 33–46.
18. Пат. 2492293 C2, Российская Федерация, МПК E02D 5/00. Свая забивная железобетонная для химического закрепления рыхлых песков и способ закрепления грунта, окружающего тело сваи / В.В. Кочерженко, Н.Г. Соколов; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2011141663/03; заявл. 13.10.2011; опубл. 10.09.2013, Бюл No 25. 9 с.
19. Efimov V.O. Experimental evaluation of pile distortion settlement of boring and driven piles // Bulletin of Civil Engineers. 2020. №17(2). Pp. 95–99. doi:10.23968/1999-5571-2020-17-2-95-99
20. Leong W.K., Yusoff N.A., Abd Aziz A.N., Abu Talib Z. Theoretical and Actual Bearing Capacity of Driven Piles Using Model Piles in Sand // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, Ltd.; 2015. 773–774. Pp. 1453–1459. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.773-774.1453

Информация об авторах

Кочерженко Владимир Васильевич, профессор кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: vvkpgrs1946@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Сулейманова Людмила Александровна, зав. кафедрой строительства и городского хозяйства, профессор. E-mail: kafedrasigsh@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 28.11.2021 г.

© Кочерженко В.В., Сулейманова Л.А., 2022

Kocherzhenko V.V., *Suleymanova L.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: kafedrasigsh@mail.ru

INNOVATIVE PILE TECHNOLOGIES IN MODERN FOUNDATION ENGINEERING

Abstract. *Pile technologies in modern foundation engineering are the leading direction for improving their constructive and technological solutions. The bearing capacity of pile foundations largely depends on the formation of the frictional force of the soil along the lateral surface of the piles. The authors considered technologies for the construction of transformable piles using non-explosive destructive substances, modular piles with a developed lateral surface and an optimal cross-section, piles using geopolymer technology and piles that allow changing the granulometric composition of the adjacent soil. The results of laboratory studies of the models of these piles are given, the effectiveness of their application is established and methods for calculating their bearing capacity are proposed, the directions of research activities are indicated. The studies carried out allow us to conclude that the comparison of the specific bearing capacity of driven piles of different cross-sections showed that the most rational section is tавровое. The developed, approved and registered "Technical conditions for modular driven T-shaped piles" make it possible to manufacture, transport, and drive this type of piles for industrial and civil construction. Options for the layout of foundation systems based on modular T-section piles are proposed, depending on the nature of the load acting on them.*

Keywords: *pile, geopolymer technology, bearing capacity, soil, transformation, granulometric composition, pockets, cavities, laboratory studies, methodology.*

REFERENCES

1. Kocherzhenko V., Suleymanova L. Methods for the construction of lowered structures and pile foundations. E3S Web of Conferences. 2021. 258. 09036. doi:10.1051/e3sconf/202125809036
2. Kocherzhenko V., Suleymanova L., Kolesnikov M. Innovative structural and technological developments of pile foundation engineering. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. 945(1). 012035. doi:10.1088/1757-899X/945/1/012035
3. GOST 5686-2012. Soils. Field test methods with piles [GOST 5686-2012. Grunty. Metody polevyh ispytaniy svayami]. M.: Standartinform, 2014. 47 p. (rus)
4. GOST 12248-96. Soils. Methods for laboratory determination of strength and deformability characteristics [GOST 12248-96. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya harakteristik prochnosti i deformiruемости]. M.: Izd-vo standartov, 1996. 67 p. (rus)
5. GOST 20276-85. Soils Methods of field determination of deformability characteristics [GOST 20276-85. Grunty Metody polevogo opredeleniya harakteristik deformiruемости]. M.: Gosstroj SSSR, 1985. 50 p. (rus)
6. Pronozin Y., Stepanov M., Volosyuk D. Prepressing soil physical-mechanical properties estimate of combined strip piles foundations ground base. Construction and Architecture Bulletin. 2015. Pp. 64–73. doi:10.15593/2224-9826/2015.2.05
7. Langdon D. Foundations for structures. Spons Civil Engineering and Highway Works Price Book 2009. 627 p.
8. Sheremetyev Yu.G., Udalov V.V., Sukhareva A.I., Luchinina I.G. A brief excursion into the technology of obtaining and using an environmentally friendly non-explosive destructive substance (NRV) [Kratkij ekskurs v tekhnologiyu polucheniya i ispol'zovaniya ekologicheskogo chistogo nevzryvnogo razrushayushchego veshchestva (NRV)]. Problemy stroitel'nogo materialovedeniya i novye tekhnologii. 1995. Pp. 113–120.
9. SP 24.13330.2011. Pile foundations. Updated edition of SNiP 2.02.03-85-M., 2011. [SP 24.13330.2011. Svaynye fundamenty. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.02.03-85-M., 2011.] M.: Minregion Rossii. 2011. 90 p. (rus)
10. TU 5817-005-02066339-00. T-shaped modular driven piles [TU 5817-005-02066339-00. Svai modul'nye zabivnye T-obraznye]. M.: Departament stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Belgorodskoj oblasti. 2000. 25 p. (rus)
11. Beim J., Niyama S. High strain dynamic testing of driven and cast in situ piles - Dynamic testing of large piles. Application of Stress-Wave Theory to Piles: Quality Assurance on Land and Off-shore Piling. CRC Press; 2000. Pp. 367–466.
12. Lacz S.W., Wells R.C. Design, Testing, and Automated Monitoring of ACIP Piles in Residual Soils. Contemporary Topics in Deep Foundations. American Society of Civil Engineers; 2009.
13. Ivakhnyuk V.A., Kocherzhenko V.V., Osadko Yu.V. Driven modular pile with a developed lateral surface. Patent RF, no. 3773, 1995.
14. Manual on the chemical consolidation of soils by injection in industrial and civil construction (to SNiP 3.02.01.-83) [Posobie po himicheskomu zakrepleniyu gruntov in'ekciej v promyshlennom i grazhdanskom stroitel'stve (k SNiP 3.02.01.-83)]. M.: NIIOSP im. N.M. Gersevanova. 1985. 130 p. (rus)
15. STONOSTROY 2.3.18-2011 Strengthening of soils by injection methods in construction [STO

NOSTROJ 2.3.18-2011 Ukreplenie gruntov in"ekcionnymi metodami v stroitel'stve]. M.: Izd-vo BST. 2012. 73 p. (rus)

16. Buslov A.S., Bakulina A.A., Burmina E.N. Technological and strength efficiency of geopolymer technology "self-coating" when driving pile [Tekhnologicheskaya i prochnostnaya effektivnost' geopolimernoj tekhnologii «samoobmazki» pri zabivke svaj]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2017. No. 5. Pp. 51–56. (rus)

17. Brown M. Recommendations for Statnamic use and interpretation of piles installed in clay. Rapid Load Testing on Piles. CRC Press; 2008. Pp. 33–46.

18. Kocherzhenko V.V., Sokolov N.G. Driven reinforced concrete pile for chemical consolidation of loose sand and a method of consolidation of the

soil surrounding the body of the pile [Svaya zabivnaya zhelezobetonnyaya dlya himicheskogo zakrepleniya ryhlyh peskov i sposob zakrepleniya grunta, okruzhayushchego telo svai]. Patent RF, no. 2492293, 2013. (rus)

19. Efimov V.O. Experimental evaluation of pile distortion settlement of boring and driven piles. Bulletin of Civil Engineers. 2020. No. 17 (2). Pp. 95–99. doi:10.23968/1999-5571-2020-17-2-95-99

20. Leong W.K., Yusoff N.A., Abd Aziz A.N., Abu Talib Z. Theoretical and Actual Bearing Capacity of Driven Piles Using Model Piles in Sand. Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, Ltd.; 2015. Vol. 773–774. Pp. 1453–1459. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.773-774.1453

Information about the authors

Kocherzhenko, Vladimir V. PhD, Professor. E-mail: vvkpgs1946@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Suleymanova, Lyudmila A. DSc, Professor. E-mail: kafedrasigsh@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Received 28.11.2021

Для цитирования:

Кочерженко В.В., Сулейманова Л.А. Инновационные свайные технологии в современном фундаментастроении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 57–67. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-57-67

For citation:

Kocherzhenko V.V., Suleymanova L.A. Innovative pile technologies in modern foundation engineering. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 4. Pp. 57–67. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-57-67

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-68-74

*Обернихин Д.В., Никулин А.И.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: oberPGS@yandex.ru

ШИРИНА РАСКРЫТИЯ НОРМАЛЬНЫХ ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛКАХ ТРАПЕЦИЕВИДНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Аннотация. В статье рассмотрены экспериментальные исследования значений ширины раскрытия трещин на различных этапах нагружения исследуемых балок трапециевидного сечения. Для сравнения также рассмотрены эталонные образцы прямоугольного и таврового поперечных сечений с одинаковыми габаритными размерами. Применение трапециевидных балок в практике строительства позволяет существенно уменьшить расход бетона по сравнению с балками прямоугольного сечения. Следует отметить, что при устройстве балок трапециевидного сечения не требуется полная разборка опалубки по сравнению с балками таврового и прямоугольного профилей. В работе приведены сравнения величин нагрузок появления первых трещин в балках с различным поперечным очертанием. Определены значения нагрузок, соответствующих достижению нормативной предельной величины ширины раскрытия трещин. В ходе исследования обнаружено, что трещины в балках трапециевидного сечения достигают предельной ширины раскрытия при более высоком уровне нагружения, чем трещины в балках прямоугольного и таврового сечений вследствие большего количества трещин по длине элемента. Произведен анализ как абсолютных, так и относительных величин расхода бетона по сечению элементов. Выделены основные достоинства и недостатки изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного сечения по сравнению с эталонными образцами.

Ключевые слова: ширина раскрытия трещины, железобетон, изгибаемый железобетонный элемент, трапециевидное сечение, эксперимент.

Введение. Как показывает практика строительства, большинство железобетонных конструкций эксплуатируются в стадии, наступающей после образования трещин. Поэтому естественным является стремление изучить напряженно-деформированное состояние в окрестности трещины.

Вопросу изучения трещинообразования в железобетонных конструкциях посвящено немало научных работ отечественных и зарубежных ученых [1, 2, 5, 6, 10–20]. Авторами в предыдущих работах [7, 8, 16] были рассмотрены вопросы прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного и других сечений. В актуальных отечественных нормативных документах расчет ширины раскрытия трещин в изгибаемых железобетонных элементах может оказаться преобладающим даже при подборе рабочей продольной арматуры. Этот факт вызывает необходимость более глубокого исследования затронутого вопроса, в том числе и применительно к конструкциям различного поперечного сечения, например, трапециевидного. Такая форма сечения заметно сдерживает раскрытие трещин в железобетонных конструкциях.

Экспериментальные данные, представленные в данной статье, были приведены в диссертационной работе [9] без сопоставительного анализа. В связи с чем целью данного исследования явилось – проведение комплексного сопоставительного анализа абсолютных и относительных

значений ширины раскрытия трещин изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного и других сечений на различных этапах нагружения.

Материалы и методы. В качестве исследуемых образцов выступали 3 серии балок: прямоугольного (ОП), таврового (ОТ) и трапециевидного (ОТр) поперечного сечения. Пролет всех элементов составлял 1100 мм. В роли продольной рабочей арматуры использовались арматурные стержни диаметром 12 мм класса А500. Все образцы были выполнены из тяжелого бетона. Габаритные размеры всех балок одинаковы и составляют 120×140 мм. Геометрические размеры опытных образцов приведены на рисунке 1. В образцах ОТ также выполнялось конструктивное армирование полки арматурой Вр500 диаметром 5 мм (на рис. 1 условно не показано).

Испытание образцов проводилось на универсальной испытательной установке, приведенной на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, испытательная установка состоит из двух коробчатых опор, на которые установлено основание. Основание представляет собой два двутавра, соединенных между собой сваркой. На основании размещены две шарнирные опоры с расстоянием между центрами опор 1100 мм, на которые устанавливается испытываемая балка. Сверху на испытываемую балку устанавливается блок, состоящий из распределительных траверс и гидравлических цилиндров, которые передают усилие на балку через стальные катки. Гидравлические цилиндры

В пределах каждой серии, для определения физико-механических характеристик бетона, были изготовлены 4 стандартных образца размером $100 \times 100 \times 100$ мм и 3 образца $100 \times 100 \times 400$ мм. Количество вспомогательных образцов, а также методика их испытания принимались согласно [3]. Характеристики бетона и арматуры приведены в таблице 1.

Методика проведения экспериментального исследования описана в предыдущих работах [16, 7, 8]. Весь эксперимент был разбит на три этапа:

- исследование контрольных образцов;
- подготовка экспериментальных образцов к испытанию;
- испытание экспериментальных образцов.

Контрольные испытания прочности образцов бетона на сжатие и арматуры на растяжение проводились в соответствии с [3] и [4] при помощи гидравлического пресса марки WEW 600D. Результаты испытаний после статистической и аналитической обработки представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики бетона и арматуры

Характеристики бетона				
Характеристика образцов бетона		ОП	ОТ	ОТр
Средняя кубиковая прочность $\overline{R}$, МПа		27,67	25,92	28,17
Предельное сопротивление центральному сжатию R_b , МПа		20,35	19,12	20,70
Нормативный модуль упругости при сжатии E_{bn} , МПа		31500	30500	31500
Предельное сопротивление центральному растяжению R_{bt} , МПа		1,53	1,43	1,68
Предельная относительная деформация при центральном сжатии ε_{bR}		0,0019450	0,0019206	0,0019561
Предельная относительная деформация при центральном растяжении ε_{btR}		0,0000886	0,0000868	0,0000945
Характеристики арматуры				
Класс арматуры	σ_{el} , МПа	σ_y , МПа	σ_u , МПа	δ_{200} , %
A500с	575,86	591,75	668,56	13,87
A400	615,57	619,72	708,92	14,76

В рамках подготовки к испытанию проводился визуальный осмотр экспериментальных образцов на наличие дефектов, после чего определялись фактические размеры и реальный вес балки. Вес балок учитывался в дальнейшем при расчете нагрузки. На образцы устанавливались все необходимые приборы с последующей их выверкой, после чего на грани балки наносилась пометка.

Нагружение проводилось поэтапно с шагом нагрузки 5 % от предполагаемой разрушающей до появления первой трещины, и 10 % после. На каждом этапе нагрузка выдерживалась 15 минут, после чего увеличивалась. Ширина раскрытия трещин определялась на каждом этапе после появления первой трещины. Для этого использовался лабораторный микроскоп МПБ-100 с дополнительной видеофиксацией (рис. 3).

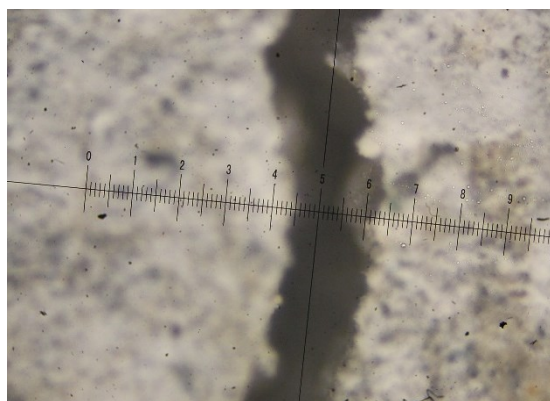
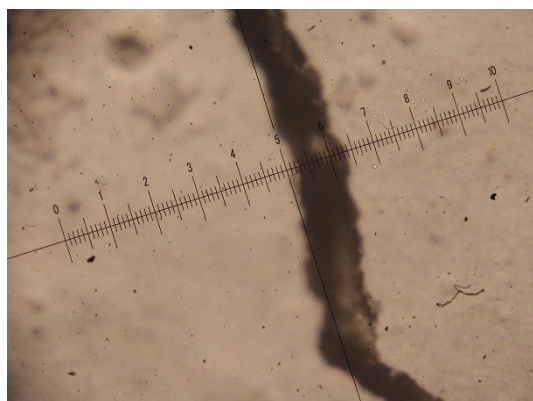


Рис. 3. Определение ширины раскрытия трещин

Основная часть. В ходе исследования было испытано 9 экспериментальных балок по три образца каждого вида (ОП, ОТ, ОТр). Результаты исследования приведены в табл. 2.

Следует уточнить, что методика проведения испытания позволяет получить достаточно точную величину нагрузки появления первой трещины посредством использования видеосъемки.

Появление трещин сопровождается резким скачком стрелки прогибомера во время увеличения нагрузки.

Таблица 2

Ширина раскрытия трещин [9]

Образец	Нагрузка трещинообразования P_{crc} , кН	Средняя нагрузка $P_{ср\ crc}$, кН	Ширина раскрытия трещины a_{crc} , при нагрузке P кт						
			12	16	20	24	28	32	36
ОП - 1	7,825	7,44	0,08	0,12	0,14	0,18	0,23	0,30	—
ОП - 2	7,415		0,11	0,14	0,18	0,21	0,25	0,31	—
ОП - 3	7,080		0,04	0,13	0,20	0,23	0,29	0,32	—
ОТ - 1	5,110	4,65	0,03	0,08	0,10	0,12	0,17	0,23	0,30
ОТ - 2	4,980		0,05	0,09	0,11	0,13	0,18	0,20	0,32
ОТ - 3	3,860		0,05	0,07	0,70	0,13	0,15	0,21	0,31
ОТр - 1	5,350	5,037	—	0,10	0,12	0,15	0,17	0,22	0,27
ОТр - 2	4,911		0,06	0,11	0,13	0,14	0,18	0,20	0,30
ОТр - 3	4,850		0,06	0,10	0,11	0,14	0,18	0,24	0,29

Как видно из полученных результатов, наиболее высокая нагрузка трещинообразования оказалась у балок прямоугольного поперечного сечения и составила в среднем 7,44 кН, а самая низкая нагрузка оказалась у балок таврового сечения 4,65 кН, что на 38 % ниже, чем у ОП. В трапециевидных балках средняя нагрузка трещинообразования составила 5,037 кН, что на 48 % ниже, чем у балок прямоугольного сечения и на 7,7 % выше тавровых.

При нагрузке 12 и 16 кН средняя ширина раскрытия трещин для балок таврового сечения (ОТ) составила, соответственно, 0,043 мм и 0,08 мм, в то время как в балках серии ОП и ОТр, соответственно, 0,077 мм, 0,13 мм и 0,06 мм, 0,103 мм. Следует отметить, что в образце ОТр-1 при нагрузке 12 кН трещины еще не появились.

Как известно из п. 8.2.6 СП 63.13330 [11] в конструкциях, где возможно образование трещин, ширина их раскрытия ограничивается в зависимости от длительности нагрузки и используемой арматуры. Так при продолжительном действии нагрузки и использовании арматуры класса А500 предельное значение ширины раскрытия составляет 0,3 мм.

Из таблицы 2 видно, что наименьшая нагрузка, при которой ширина раскрытия трещин составила 0,3 мм оказалось у образцов серии ОП и составила $P_{0,3} = 32$ кН. У балок серии ОТ $P_{0,3} =$

36 кН. В образцах серии ОТр эта нагрузка также находилась в районе 36 кН, однако в образцах ОТр-1 и ОТр-3 ширина раскрытия трещин составила 0,27 мм и 0,29 мм. Своего предельного значения она достигла только после превышения нагрузки 36 кН. Это объясняется тем, что в балках серии ОТр общее количество трещин по длине балки на поздних этапах было выше, чем в балках серий ОП и ОТ, а, следовательно, в то время как у балок серий ОП и ОТ с повышением нагрузки увеличивалась ширина раскрытия трещин, в балках ОТр процесс трещинообразования продолжался без существенного роста ширины раскрытия существующих трещин.

Для анализа экономии материала найдены относительные характеристики – относительная нагрузка трещинообразования и относительная нагрузка достижения предельного значения ширины раскрытия трещин таблица 3.

Из таблицы 3 видно, что самая высокая средняя относительная нагрузка трещинообразования у балок серии ОП. Она на 12,4 % и 9,3 % выше, чем у балок серии ОТ и ОТр, соответственно. В то же время самая высокая относительная нагрузка достижения предельной ширины раскрытия трещин 0,3 мм оказалась у балок серии ОТ – на 37 % и на 4,8 % выше, чем в образцах серии ОП и ОТр, соответственно.

Таблица 3

Относительные характеристики

Образец	Площадь сечения A , м ²	Средняя нагрузка трещинообразования $P_{ср\ crc}$, кН	Средняя нагрузка достижения $a_{crc}=0,3$ мм $P_{0,3}$, кН	Средняя относительная нагрузка трещинообразования $P_{ср\ crc} / A$	Относительная нагрузка достижения предельной ширины 0,3 мм $P_{0,3} / A$
ОП	0,0168	7,44	32	443	1905
ОТ	0,012	4,65	36	388	3000
ОТр	0,0126	5,07	36	402	2857

Выводы

1. Показано, что при одинаковых габаритных размерах, армировании и сопоставимой прочности бетона средняя нагрузка трещинообразования у образцов прямоугольного сечения оказалась на 32 % выше, чем у балок трапециевидного сечения, и на 38% больше, чем у таврового.

2. Установлено, что наименьшая нагрузка, при которой величина раскрытия трещин достигает предельного значения 0,3 мм, оказалась у балок серии ОП и составила порядка $R_{0,3}=32$ кН, в то время как для балок серии ОТ и ОТр нагрузка $R_{0,3}$ составила 36 кН и выше.

3. Показано влияние характера образования трещин и их количества на ширину раскрытия трещин на этапах, близких к предельному.

4. Определено, что балки серии ОТр занимают промежуточное положение по исследуемым параметрам между балками ОП и ОТ, показывая при этом более высокие нагрузки при достижении трещинами предельной ширины раскрытия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобров В.В. Оценка влияния формы и размеров железобетонных конструкций на уровень микротрещинообразования бетона // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 7. С. 26–29.

2. Голышев А.Б., Колучнов В.И. Соппротивление железобетона. Киев: Изд-во Основа, 2009. 432 с.

3. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М.: Стандартинформ, 2013. 30 с.

4. ГОСТ 12004-81 Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение. М.: Стандартинформ, 2009. 10 с

5. Залесов А.С. Расчет железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформативности. М.: Книга по требованию, 2012. 320 с.

6. Колчунов Вл.И., Яковенко И.А., Ключева Н.В. К построению расчетной модели ширины раскрытия наклонных трещин в составных железобетонных конструкциях // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. №1(252). С. 13–17.

7. Никулин А.И. Обернихин Д.В. Деформативность изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного сечения с трещинами в растянутой зоне // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 5. С. 88–93.

8. Никулин А.И. Обернихин Д.В. Экспериментальные исследования деформативности изгибаемых железобетонных элементов различных

поперечных сечений // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 4. С. 56–59.

9. Обернихин Д.В. Ширина раскрытия трещин и особенности сопротивления железобетонных конструкций трапециевидного поперечного сечения: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Белгород, 2019. 258 с.

10. Смоляго Г.А. Оценка уровня конструктивной безопасности железобетонных конструкций по трещиностойкости // Промышленное и гражданское строительство. 2003. № 4. С. 62–63.

11. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. М.: «Стандартинформ», 2019. 124 с.

12. Тамразян А.Г., Орлова М.А. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов с трещинами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 6 (53). С. 98–105.

13. Федоров В. С., Шавыкина Е.В., Колчунов Вл.И. Методика расчета ширины раскрытия трещин в железобетонных внецентренно сжатых конструкциях с учетом эффекта нарушения сплошности // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 1. С. 8–11.

14. Fantilli A.P., Ferretti D., Iori I., Vallini P. Flexural Deformability of Reinforced Concrete Beams // Journal of Structural Engineering. 1998. Vol. 124. Issue 9. Pp. 1041–1049. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:9(1041)

15. Lu W.Y., Hwang S.J., Lin I.J. Deflection prediction for reinforced concrete deep beams // Computers and concrete. 2010. Vol. 7(1). Pp. 1–16. doi:10.12989/cac.2010.7.1.001

16. Oberrnikhin D.V., Nikulin A.I. Experimental studies of deflections in bending reinforced concrete elements taking into account the influence of the shape of their cross-section // Buildintech BiT: International Scientific Conference on Innovations and Technologies in Construction. Vol. 151. 2021. Pp. 52–62. doi:10.1007/978-3-030-72910-3_9

17. Silva F.A.N., Horowitz B. Bending moments in beams of reinforced concrete buildings // Ibracon Structures and Materials Journal. 2008. Vol. 1. Pp. 193–211.

18. Zhou K.J.H., Ho J.C.M., Su R.K.L. Flexural Strength and Deformability Design of Reinforced Concrete Beams // Procedia Engineering. 2011. Vol. 14. Pp. 793–796. doi:10.1016/j.proeng.2011.07.176

19. Schulz M., Santisi d'Avila M.P. Analysis of reinforced concrete beams by the equivalent section method // Concrete engineering for Excellence and efficiency. 2011. Pp. 1–10. doi:10.1002/suco.201190012

20. Lu W.Y., Hwang S.J., LIN I.J. Deflection prediction for reinforced concrete deep beams //

Computers and concrete. 2010. Vol. 7(1). Pp. 1–16. doi:10.12989/cac.2010.7.1.001

Информация об авторах

Обернихин Дмитрий Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: oberPGS@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Никулин Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: nikulin137@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 04.11.2021 г.

© Обернихин Д.В., Никулин А.И., 2022

***Obernikhin D.V., Nikulin A.I.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: oberPGS@yandex.ru*

CRACKING WIDTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS TRAPEZOIDAL CROSS SECTION

Abstract. The article discusses experimental studies of the values of the crack opening width at various stages of loading the investigated trapezoidal beams. For comparison, reference samples of rectangular and tee cross-sections with the same overall dimensions are also considered. The use of trapezoidal beams in construction practice can significantly reduce the consumption of concrete in comparison with rectangular beams. It should be noted that when constructing trapezoidal beams, complete disassembly of the formwork is not required in comparison with beams of T-shaped and rectangular profiles. The paper compares the values of the loads of the appearance of the first cracks in beams with different transverse outlines. The values of the loads corresponding to the achievement of the normative limiting value of the crack opening width have been determined. In the course of the study, it was found that cracks in trapezoidal beams reach the maximum opening width at a higher loading level than cracks in rectangular and tee beams due to a greater number of cracks along the length of the element. An analysis of both absolute and relative characteristics was carried out, taking into account the consumption of concrete over the section of the elements. The main advantages and disadvantages of bending reinforced concrete elements of trapezoidal cross-section in comparison with reference samples are highlighted.

Keywords crack opening width, reinforced concrete, bending reinforced concrete element, trapezoidal section, experiment.

REFERENCES

1. Bobrov V.V. Assessment of the influence of the shape and size of reinforced concrete structures on the level of microcracking of concrete [Ocenka vliyaniya formy i razmerov zhelezobetonnykh konstrukcij na uroven' mikrotreshchinoobrazovaniya betona] Industrial and civil construction. 2014. No. 7. Pp. 26–29. (rus).
2. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. Reinforced concrete resistance [Soprotivlenie zhelezobetona]. Publishing House Osnova, 2009. 432 p. (rus)
3. GOST 10180-2012 Concrete. Methods for determining the strength of control samples [Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obrazcam]. Standartinform. 2013. 30 p. (rus)
4. GOST 12004-81 Reinforcing steel. Tensile test methods. M.: Standartinform, 2009. 10 p. (rus)
5. Zalesov A.S. Calculation of reinforced concrete structures for strength, crack resistance and deformability [Betony. Metody opredeleniya

prochnosti po kontrol'nym obrazcam]. Book on demand, 2012. 320 p. (rus)

6. Kolchunov V.I., Yakovenko I.A., Klyueva N.V. On the construction of a computational model of the width of the opening of inclined cracks in composite reinforced concrete structures [K postroeniyu raschetnoj modeli shiriny raskrytiya naklonnykh treshchin v sostavnykh zhelezobetonnykh konstrukciyah]. Structural mechanics and calculation of structures. 2014. No. 1 (252). Pp. 13–17. (rus)

7. Nikulin A.I., Obernikhin D.V. Deformability of bending reinforced concrete elements of a trapezoidal section with cracks in a stretched zone [Deformativnost' izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov trapecievidnogo secheniya s treshchinami v rastyanutoj zone]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 5. P. 88–93. (rus)

8. Nikulin A.I., Obernikhin D.V. Experimental studies of the deformability of bending reinforced concrete elements of various cross sections [Eksper-

imental'nye issledovaniya deformativnosti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov razlichnykh poperechnykh sechenij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 4. Pp. 56–59. (rus)

9. Obernikhin D.V. Crack opening width and resistance features of reinforced concrete structures of trapezoidal cross section [SHirina raskrytiya treshchin i osobennosti soprotivleniya zhelezobetonnykh konstrukcij trapecievidnogo poperechnogo secheniya]. Dissertation. Ph.D.: 05.23.01. Belgorod, 2019. 258 p. (rus)

10. Smolyago G.A. Assessment of the level of structural safety of reinforced concrete structures for crack resistance [Ocenka urovnya konstruktivnoj bezopasnosti zhelezobetonnykh konstrukcij po treshchinostojkosti]. Industrial and civil construction. 2003. No. 4. Pp. 62–63. (rus)

11. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions [Betonnnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozeniya.]. Standartinform. 2019. 124 p. (rus)

12. Tamrazyan A.G., Orlova M.A. Experimental studies of the stress-strain state of reinforced concrete bending elements with cracks [Eksperimental'nye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov s treshchinami]. Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2015. № 6 (53). Pp. 98–105. (rus)

13. Fedorov V.S., Shavykina E.V., Kolchunov V.I. Methodology for calculating the width of crack opening in reinforced concrete eccentrically compressed structures taking into account the effect of discontinuity [Metodika rascheta shiriny raskrytiya treshchin v zhelezobetonnykh vnecentrenno szhatykh

konstrukciyakh s uchedom effekta narusheniya sploshnosti]. Stroitel'naya mekhanika, design of structures. 2009. No. 1. Pp. 8–11. (rus).

21.14. Fantilli, A.P., Ferretti D., Iori I., Vallini P. Flexural Deformability of Reinforced Concrete Beams. Journal of Structural Engineering. 1998. Vol. 124. Issue 9. Pp. 1041–1049. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:9(1041)

15. Lu W.Y., Hwang J., Lin I.J. Deflection prediction for reinforced concrete deep beams. Computers and concrete. 2010. Vol. 7(1). Pp. 1–16. doi:10.12989/cac.2010.7.1.001

16. Obernikhin D.V., Nikulin A.I. Experimental studies of deflections in bending reinforced concrete elements taking into account the influence of the shape of their cross-section. Buildintech BiT: International Scientific Conference on Innovations and Technologies in Construction. Vol 151. 2021. Pp. 52–62. doi:10.1007/978-3-030-72910-3_9

17. Silva F.A.N., Horowitz B. Bending moments in beams of reinforced concrete buildings. Ibracon Structures and Materials Journal. 2008. Vol. 1. Pp. 193–211.

18. Zhou K.J.H., Ho J.C.M., Su R.K.L., Flexural Strength and Deformability Design of Reinforced Concrete Beams. Procedia Engineering. 2011. Vol. 14. Pp. 793–796. doi:10.1016/j.proeng.2011.07.176

19. Schulz M., Santisi d'Avila M.P. Analysis of reinforced concrete beams by the equivalent section method. Concrete engineering for Excellence and efficiency. 2011. Pp. 1–10. doi:10.1002/suco.201190012

20. Lu W.Y., Hwang S.J., Lin I.J. Deflection prediction for reinforced concrete deep beams. Computers and concrete. 2010. Vol. 7(1). Pp. 1–16. doi:10.12989/cac.2010.7.1.001

Information about the authors

Obernikhin, Dmitriy V. PhD. E-mail: oberPGS@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Nikulin, Alexandr I. PhD. E-mail: nikulin137@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 04.11.2021

Для цитирования:

Обернихин Д.В., Никулин А.И. Ширина раскрытия нормальных трещин в железобетонных балках трапециевидного поперечного сечения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 68–74. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-68-74

For citation:

Obernikhin D.V., Nikulin A.I. Cracking width of reinforced concrete beams trapezoidal cross section. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 4. Pp. 68–74. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-68-74

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-75-81

Солодов Н.В.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: kafedrasigsh@mail.ru

ДВУТАВРОВАЯ БАЛКА С ПОЯСАМИ ИЗ ЗГСП И ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ

Аннотация. Идея гофрирования стенки стальной балки с целью повышения ее местной устойчивости и снижения расхода стали за счет уменьшения толщины стенки была предложена в России достаточно давно – еще в первой половине прошлого века. Эта идея оказалась весьма продуктивной. Ее реализация имела место в самолётостроении, в судостроении, а не только в области строительных конструкций. За прошедшее без малого столетие в отечественном и зарубежном металлостроительстве было разработано большое количество вариантов конструктивных решений балок с гофрированной стенкой. Эти решения отличались: формой и ориентацией гофров по стенке; формой сечения поясов; особенностями примыкания стенки по длине балки, наличием в стенке технологических отверстий и т.п. Были исследованы различные аспекты действительной работы балок с гофрированными стенками и напряженно-деформированное состояние самих гофрированных стенок (в том числе, с учетом упругопластической стадии работы) применительно к разным вариантам конструктивных решений, отмеченных выше. В настоящей статье приводятся результаты численного моделирования работы и анализа несущей способности по критериям нескольких предельных состояний двух новых вариантов конструктивных решений балок с гофрированной стенкой, на которые получены патенты на полезную модель. Кроме того, выполнен сопоставительный анализ эффективности известных конструктивных решений балок с новыми решениями, предложенными автором. В статье показано, что в ряде случаев балки новых конструктивных решений по совокупности показателей эффективности для исследованных предельных состояний имеют большую эффективность, чем традиционные решения. Новизна конструктивных решений, приоритет по которым принадлежит авторам, заключается, в первом случае, в использовании в балке поясов из ЗГСП с сечением прямоугольной формы, больший размер стороны контура которых ориентирован из плоскости гофрированной стенки. Во втором случае, описанное выше конструктивное решение дополнено предварительно напряженной затяжкой, располагаемой в полости ЗГСП нижнего пояса.

Ключевые слова: стальная балка, гофрированная стенка, преднапряжённая затяжка, пояса из ЗГСП, напряженно-деформированное состояние, эффективность конструктивного решения.

Введение. В нашей стране о возможности гофрирования стенки и достоинствах такого решения впервые в 1937 г. была опубликована статья В.Н. Горнова [1]. Позднее, в 1964 г., вышла статья коллектива авторов (А.Л. Ваильев и др.) [2], в которой идею гофрирования было предложено использовать в обшивке переборок (перегородок) в судостроении. В Соединенных Штатах в 1956 г. балки с гофрированными стенками предложили использовать в самолётостроении (А.Ф. Фрейзер). В дальнейшем были выполнены многочисленные теоретические, экспериментальные и численные исследования конструктивных решений балок, в которых нашла применение идея гофрирования листа стенки. К числу отечественных исследователей следует отнести авторов: Г.А. Аржемачев [3], 1963 г.; В.Ф. Кириленко и Г.А. Окрайнец [4], 1969 г.; В.В. Долинский [5], 1985 г.; Я. И. Ольков, А.Н. Степаненко [6], 1972 г.; В.А. Кудрявцев [7], 1982 г.; В.Ф. Беляев [8], 1990 г.; И.С. Рыбкин [9], 2008 г.; А.С. Полторадин [10], 2013 г.; В.Ф. Егоров [11], 1990 г. и ряд других исследователей.

Среди зарубежных авторов нужно отметить работы по балкам с гофрированной стенкой: М.

Элгали, Р. Гамильтон, А. Сешадри [12], 1979 г.; С.Л. Чан, Я.А. Халид, Б.Б. Сахари, А. Хамауда [13], 2001 г.; Л. Хуанг, Х. Хикосака, К. Комине [14], 2004 г.; К.Р. Кучта [15], 2010 г. и другие.

Двутавовая балка с поясами из замкнутых гнуто-сварных профилей (ЗГСП) и гофрированной стенкой [16] имеет ряд особенностей, придающих ей существенные достоинства. Идея использовать в поясах ЗГСП вместо плоских листов имеет своим аналогом ферму с поясами из ЗГСП. Применительно к балкам, такие пояса, при равном расстоянии между центрами тяжести поясов у балок с поясами из листов, обеспечивают уменьшение высоты стенки на величину, равную сумме половин высот поясов из ЗГСП. Это уменьшает гибкость стенки из ее плоскости и, следовательно, позволяет принимать толщину стенки меньше. Гофрирование стенки также значительно увеличивает жесткость стенки из ее плоскости и повышает местную устойчивость. Сочетание в одном конструктивном решении балки поясов из ЗГСП и гофрирование стенки, таким образом, создает некий синергетический эффект, проявляющийся, в том числе, в увеличении жесткости стенки на сдвиг.

Известно, что гофрирование стенки приводит к увеличению жесткости двутавровой балки на кручение. Это важно, так как жесткость балки с двутавровым сечением с поясами и стенкой из плоских листов весьма невелика. Сочетание гофрированной стенки с поясами из ЗГСП, которые, как замкнутые профили, имеют значительную собственную жесткость на кручение, обеспечивает дополнительное увеличение сопротивления такого сечения балки в целом на действие крутящего момента. В результате существенно повышается общая (боковая) устойчивость балки с поясами из ЗГСП и гофрированной стенкой. Далее это будет показано по результатам численного моделирования.

При действии на пояс балки локальной нагрузки в ее стенке возникают локальные напряжения, которые, при определенных условиях, могут стать причиной наступления предельного состояния. Применение ЗГСП в качестве поясов балок способствует, по сравнению с поясами из плоских листов и при прочих равных условиях, снижению локальных напряжений в стенке в зоне примыкания ее к поясу. В особо тонких стенках, которые находят применение при их гофрировании, возможность снижения локальных напряжений становится весьма актуальной конструктивной особенностью описываемых балок [16].

Для оценки влияния предварительного напряжения на НДС балки конструкции [17] было выполнено ее численное моделирование. Его результаты, а также сопоставление параметров НДС с данными по аналогичной балке без преднапряженной затяжки, рассмотрены далее в статье.

Материалы и методы. В качестве объектов исследования в рамках настоящей статьи принято шесть вариантов конструктивных решений стальных балок без предварительного напряжения:

- образец № 1: балка со стенкой толщиной 4 мм и поясами из листовой стали;
- образец № 2: балка с поясами и ЗГСП и плоской стенкой из листов стали;
- образец № 3: балка с гофрированной стенкой толщиной 1 мм и поясами из ЗГСП;
- образец № 4: балка с гофрированной стенкой толщиной 1,5 мм и поясами из ЗГСП;
- образец № 5: балка с гофрированной стенкой толщиной 2 мм и поясами из ЗГСП;
- образец № 6: балка с поясами из листовой стали с гофрированной стенкой толщиной 2 мм.

Сечение поясов в образцах были приняты из ЗГСП 140×60×5 мм, а из пояса из листовой стали имели сечение 180×12 мм.

Кроме того, было выполнено численное моделирование образцов № 7–№ 9. Их сечение образовано: пояса – из ЗГСП 140×60×5; гофрированная стенка из листовой стали толщиной 1,0; 1,5 и 2,0 мм соответственно. В полости, по центру тяжести сечения, ЗГСП в образцах № 7–№ 9 располагалась затяжка из круглой стали класса А1000 Ø20 мм, усилие предварительного напряжения принималось равным 261,6 кН. Эта величина найдена из условия, чтобы максимальные напряжения в поясе балки не превышал $0,7R_{y\sigma}$.

Расстояние между центрами тяжести поясов в образцах № 1–№ 6 принято равным 428 мм, в остальных случаях – 440 мм.

Численное моделирование выполняли в программном комплексе ЛИРА с использованием конечных элементов в виде пластин. Свойства стали приняты следующие: плотность 7,85 т/м³, коэффициент Пуассона – 0,3; модуль упругости – $2 \cdot 10^5$ МПа; $R_y = 240$ МПа. Длина пролета балок принята равной 4,532 м, опирание шарнирное. Расчеты выполнены по упругой стадии работы стали. Параметры поперечных сечений образцов № 1–№ 6 показаны на рис. 1, общий вид образцов № 7–№ 9 на рис. 2.

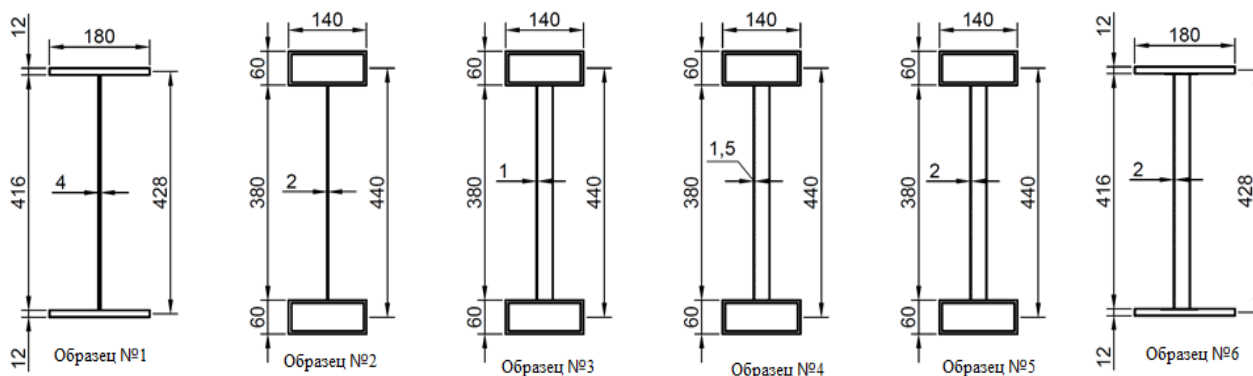


Рис. 1. Форма и размеры поперечных сечений опорных образцов

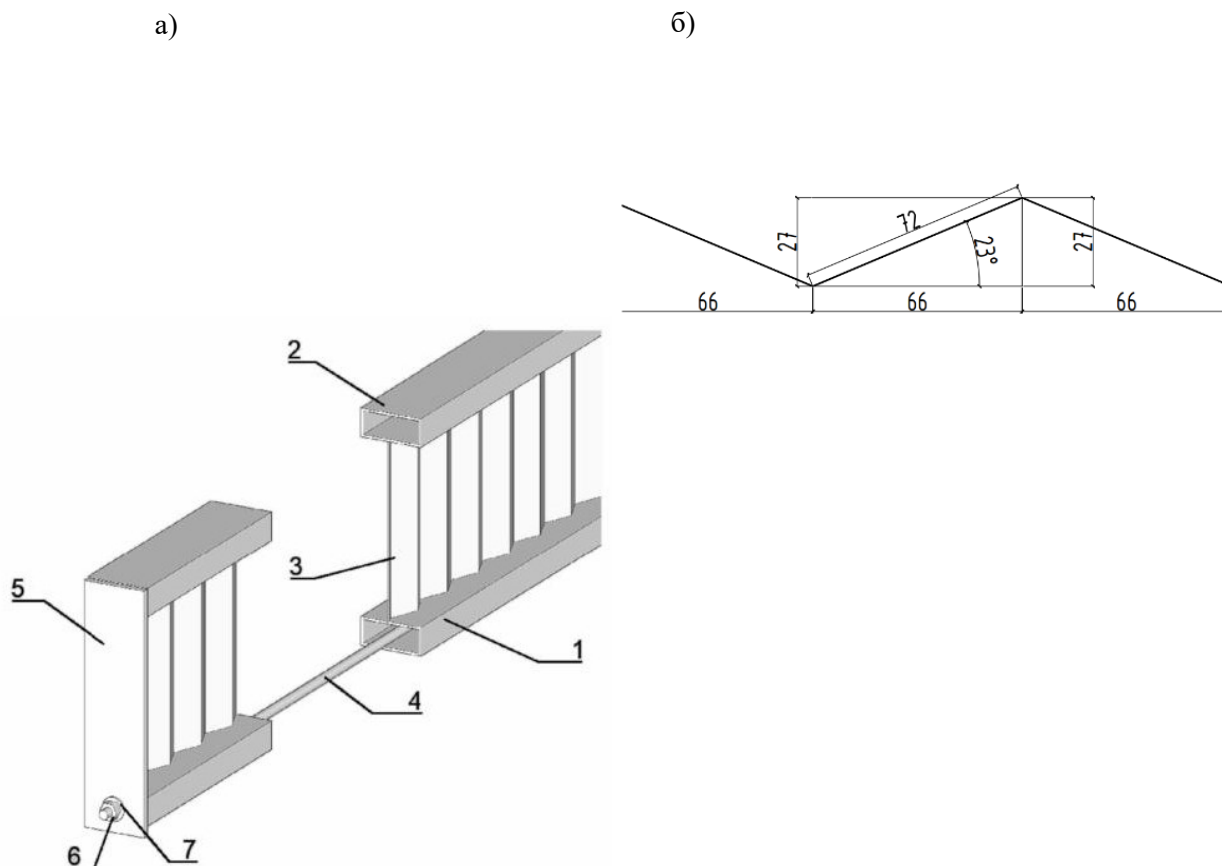


Рис. 2. Общий вид образцов № 7–№ 9: а) конструкция балки с затяжкой: 1 – растянутый пояс из ЗГСП; 2 – сжатый пояс из ЗГСП; 3 – гофрированная стенка; 4 – предварительно напряженная затяжка; 5 – опорное ребро балки; 6 – гайка; 7 – шайба; б) параметры гофрирования стенки

В опытных образцах при численном моделировании оценивали ресурсы их несущей способности по нескольким предельным состояниям:

- предельное состояние, определяемое деформативностью изгибаемого элемента;
- предельное состояние, определяемое прочностью при действии крутящего момента;
- предельное состояние, определяемое деформативностью стенки при сдвиге в ее плоскости;
- предельное состояние, определяемое прочностью стенки при действии на нее локальной нагрузки (шесть вариантов загрузки);
- предельное состояние, определяемое общей (боковой) устойчивостью изгибаемого элемента;
- предельное состояние, определяемое местной устойчивостью стенки.

Для каждого опытного образца в каждом из перечисленных выше предельных состояний на основе численного исследования получены значения характерного параметра: предельная нагрузка; предельное усилие в сечении; деформационный параметр – угол сдвига, прогиб, угол кручения (или соответствующие им жесткости на сдвиг, на кручение); локальное напряжение. Ве-

личины этих характерных параметров, соответствующие наступлению указанных предельных состояний, использованы при анализе для ранжирования опытных образцов по их эффективности.

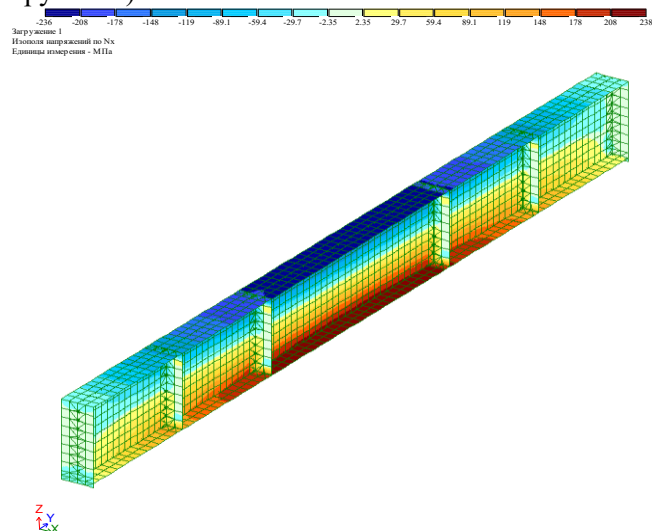
Основная часть. Исследование напряженно-деформированного состояния численных моделей от действия в их сечении изгибающих моментов позволяет оценить и сопоставить у разных образцов предельную нагрузку, когда их прочность в максимально нагруженном изгибающем моментом исчерпана на 100 %. Ранжирование образцов по величине предельной нагрузки дает представление об эффективности каждого конструктивного решения по данному критерию.

На рисунке 3 приведены, в качестве примера, результат численного моделирования в виде изополей нормальных напряжений от изгибающего момента в сечениях образцов № 1 и № 5. Аналогичные моменты в сечениях найдены для всех образцов по каждому из исследованных предельных состояний.

Тестовая нагрузка (100 кН/м), при учете упругой работы стали, принятая в численном моделировании, а также величина коэффициента использования прочности сечения, позволяют вычислить предельную погонную нагрузку для

каждого рассматриваемого предельного состояния. По этой нагрузке в дальнейшем и приводится ранжирование эффективности образцов.

В таблице 1 приведены параметры, характеризующие НДС в соответствующих предельных состояниях: предельная нагрузка; предельное усилие в сечении; предельный деформационный параметр – угол сдвига, прогиб, угол кручения (или соответствующие им жесткости на сдвиг, на кручение).



При анализе, в качестве условного интегрального показателя эффективности образцов балок разной конструкции, применим отношение несущей способности каждого образца к его массе. За несущую способность принимаем величину изгибающего момента, соответствующую нагрузке на каждый образец при коэффициенте запаса равном единице. Данные указаны в таблице 1.

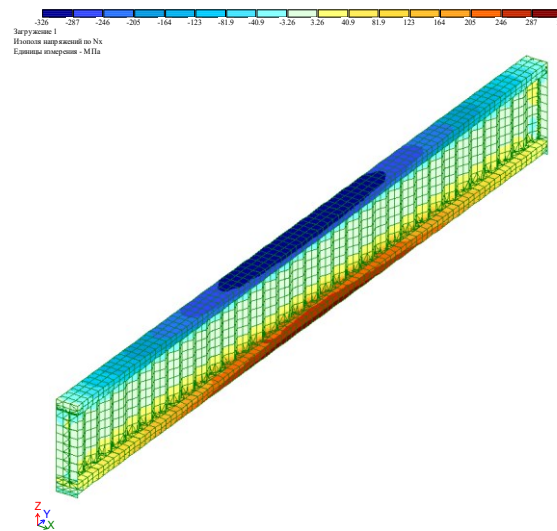


Рис. 3. Изополя нормальных напряжений в образцах № 1 и № 5

Таблица 1

Характеристики эффективности образцов

№ п/п	Номер образца	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4	Образец № 5	Образец № 6
	Наименование параметра НДС						
1	Величина нормальных напряжений в поясе от изгибающего момента, верхний/нижний, МПа	236/238	240/241	243/244	238/240	235/237	236/236
2	Величина прогиба, мм	14,1	13,7	17,5	15,2	14,1	16,3
3	Жесткость на кручение, тн·м ²	2,04	45,0	46,2	46,20	47,4	2,2
4	Жесткость образца на сдвиг, тн	20492	10869	5000	10000	10000	10100
5	Максимальные локальные напряжения в стенке, МПа	12,5	8,3	15,9	11,2	8,7	23,0
6	Предельная нагрузка по критерию общей устойчивости балки или местной устойчивости стенки (*), тн/м	8,83	2,16*	2,47*	8,12*	18,85*	10,93
7	Интегральный показатель эффективности конструктивного решения балки (возрастание показателя соответствует увеличению эффективности)	0,021	0,025	0,025	0,029	0,034	0,029
8	Масса образца, кг	249,0	176,0	162,0	168,0	175,0	197,0

Анализ параметров численного моделирования НДС балок, соответствующих образцам № 7–№ 9, показал, что для принятого при моделировании уровня предварительного напряжения, прогиб балок с преднапряжением на 30–34 % меньше, чем у аналогичных без преднапряжения. Применение гофрированных стенок приводит к тому, что их вклад (доля) в изгибной жесткости балки несколько снижается (на 2,3–3,7

% по данным моделирования). Однако преднапряжение позволяет компенсировать это снижение и даже увеличить изгибную жесткость образца. Для исследованных балок суммарный положительный эффект по этому параметру составил от 0,7 до 1,6 %. В случае оптимизации уровня преднапряжения может быть получен более значительный эффект.

Выводы. Выполненное численное моделирование стальных балок, отличающихся конструктивными решениями, но имеющими практически одинаковые значения несущей способности по изгибаемому моменту, подтвердило высокую эффективность предложенного в патенте на полезную модель образца с поясами из замкнутых гнутосварных профилей и гофрированной стенкой.

Показано существенное увеличение несущей способности (или предельной нагрузки) этого образца по критериям: жесткость на кручение; боковая (общая) устойчивость; величина локальных напряжений в стенке.

Применение в конструкции балки преднапряжения в виде стержневой затяжки, располагаемой в полости (по центру тяжести сечения) ЗГСП нижнего пояса, повышает эффективность работы изгибаемого элемента по критериям: жесткость при изгибе в вертикальной плоскости; предельный изгибающий момент в нормальном сечении.

Разработанные новые конструктивные решения балок позволяют уменьшать металлоемкость проектных решений в соответствующей области применения (прогоны, элементы балочных площадок и т.п.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горнов В.Н. Новые тонкостенные конструкции // Проект и стандарт. 1937. №4. С. 25–28.
2. Васильев А.Л., Глозман М.К., Павлинова Е.А., Филиппео М.В. Прочные судовые гофрированные переборки. Л.: Судостроение, 1964. 316 с.
3. Ажермачев Г.А. Балки с волнистыми стенками // Промышленное строительство. 1963. №4. С. 54–56.
4. Кириленко В.Ф., Окрайнец Г.А. К вопросу расчета балок с гофрированной стенкой // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. 1969. №4. С. 23–27.
5. Долинский В.В. Стальные двутавровые ригели с гофрированной стенкой в сейсмостойких многоэтажных рамных каркасах: Автореф. дис... канд. наук. Н., 1985. 22 с.
6. Ольков Я.И., Степаненко А.Н. О расчете металлических балок с тонкой гофрированной стенкой // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. 1972. №10. С. 12–15.
7. Кудрявцев В.А., Москалева В.Г. Экспериментальное исследование устойчивости пространственных коробчатых элементов с стенками при действии горизонтально-гофрированными преобладающего сдвига // В кн: Статика и динамика сложных строительных конструкций: Межвуз. темат. сб. тр. Л.: ЛИСИ, 1982. С. 92–94.
8. Беляев В.Ф., Михайлова Т.В. Об оптимальной ориентации закрытых гофров в стенке стальной двутавровой балки // Промышленное строительство. 1990. № 10. С. 20–21.
9. Рыбкин И.С. Совершенствование конструктивных решений, методов моделирования и расчета гофрированных элементов: Автореф. дис... канд. наук. М., 2008. 22 с.
10. Полторацнев А.С. Несущая способность и оптимизация стальных тонкостенных балок: дис... канд. наук. М., 2013. 216 с.
11. Егоров П.И. Дополнительные изгибно-крутящие усилия в двутавровом стержне с поперечным непрерывным трапецидальным профилем гофров в стенке // Промышленное и гражданское строительство. 2007. №10. С. 24–35.
12. Elgaaly M., Seshadri A., Hamilton R.W. Shears Strenght of Beams with Corrugated Webs // Journal of Structural Engineering. 1996. Vol. 122. Pp. 390–398.
13. Chan C.L., Khalid Y.A., Sahari B.B., Hamouda A.M.S. Finite element analysis of corrugated web beams under bending // Journal of constructional steel research. 2002. Vol. 58. Pp. 1391–1406.
14. Huang L., Hikosaka H., Komine K., Simulation of accordion effect in corrugated steel web with concrete flanges: Computers and structures. 2004. Vol. 82. Pp. 2061–2069.
15. Kuchta K.R. Wavy Corrugated Web Stiffness Influence on Plate Girders Flange Local Stability // Cracow University of Technology. Poland, 2010. Pp. 205–210.
16. Пат. 175354 U1, Российская Федерация, МПК E04C 3/07. Металлическая двутавровая балка с гофрированной стенкой / Н.В. Солодов, В.А. Ечин. № 2017125573; заявл. 17.07.2017; опубл. 01.12.2017.
17. Пат. 207598 U1, Российская Федерация, МПК E04C 3/10 (2006.01). Предварительно напряженная металлическая двутавровая балка / Н.В. Солодов, В.О. Демин. № 2021120142; заявл. 08.07.2021; опубл. 03.11.2021.

Информация об авторах

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

Поступила 17.02.2022 г.

© Солодов Н.В., 2022

Solodov N.V.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: kafedrasigsh@mail.ru

I-BEAM WITH ZGSP CHORNS AND A CORRUGATED WALL

Abstract. The idea of corrugating the wall of a steel beam in order to increase its local stability and reduce steel consumption by reducing the wall thickness was proposed in Russia quite a long time ago - back in the first half of the last century. This idea turned out to be quite productive. Its implementation took place in aircraft construction, in shipbuilding, and not only in the field of building structures. Over the past nearly a century, a large number of design solutions for beams with a corrugated wall have been developed in domestic and foreign metal building. These solutions differed in: the shape and orientation of the corrugations along the wall; the shape of the section of the belts; peculiarities of the adjoining of the wall along the length of the beam, the presence of technological holes in the wall, etc. Various aspects of the actual operation of beams with corrugated walls and the stress-strain state of the corrugated walls themselves (including taking into account the elastic-plastic stage of work) were studied in relation to various options for the design solutions noted above. This article presents the results of numerical simulation of the operation and analysis of the bearing capacity according to the criteria of several near-edge states of two new variants of structural solutions for beams with a corrugated wall, for which utility model patents have been obtained. In addition, a comparative analysis of the effectiveness of known structural solutions of beams with new solutions proposed by the author was carried out. The article shows that in a number of cases, beams of new design solutions, in terms of the totality of performance indicators for the studied limit states, are more efficient than traditional solutions. The novelty of the design solutions, the priority of which belongs to the authors, lies, in the first case, in the use in the beam of chords made of ZGSP with a rectangular section, the larger side of the contour of which is oriented from the plane of the corrugated wall. In the second case, the constructive solution described above is supplemented with a prestressed tightening located in the cavity of the lower chord SHG.

Keywords: steel beam, corrugated wall, prestressed tightening, ZGSP chords, stress-strain state, efficiency of constructive solution.

REFERENCES

1. Gornov V.N. New thin-walled structures [Novye tonkostennyye konstrukcii]. Proekt i standart. 1937. No. 4. Pp. 25–28. (rus)
2. Vasiliev A.L., Glozman M.K., Pavlinova E.A., Philippeo M.V. Strong ship corrugated bulkheads [Prochnyye sudovyye gofrirovannyye pereborki]. L.: Sudostroenie, 1964. 316 p. (rus)
3. Azhermachev G.A. Beams with wavy walls [Balki s volnistymi stenkami]. Promyshlennoe stroitel'stvo. 1963. No. 4. Pp 54–56. (rus)
4. Kirilenko V.F., Okraynets G.A. On the issue of calculating beams with a corrugated wall [K voprosu rascheta balok s gofrirovannoy stenкой]. Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo i arhitektura. 1969. No. 4. Pp. 23–27. (rus)
5. Dolinsky V.V. Steel I-beams with a corrugated wall in seismic-resistant multi-storey frame frames: [Stal'nye dvutavrovyye rigeli s gofrirovannoy stenкой v seismostojkikh mnogoetazhnykh ramnykh kar-kasah] Avtoref. dis... kand. nauk. N., 1985. 22 p. (rus)
6. Olkov Ya.I., Stepanenko A.N. On the calculation of metal beams with a thin corrugated wall [O raschete metallicheskih balok s tonкой gofrirovannoy stenкой]. Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo i arhitektura. 1972. No. 10. Pp. 12–15. (rus)
7. Kudryavtsev V.A., Moskaleva V.G. Experimental study of the stability of spatial box-shaped elements with walls under the action of horizontally corrugated prevailing shear [Eksperimental'noe issledovanie ustojchivosti prostranstvennykh korobchatykh elementov s stenkami pri dejstvii gorizonta-l'no-gofrirovannymi preobladayushchego sdviga]. V kn: Statika i dinamika slozhnykh stroitel'nykh konstrukcij: Mezhdvuz. temat. sb. tr.. L.: LISI, 1982. Pp. 92–94. (rus)
8. Belyaev V.F., Mikhailova T.V. Extensive orientation of closed corrugations in the web of a steel I-beam [Ob optimal'noj orientacii zakrytykh go-frov v stenke stal'noj dvutavrovoj balki]. Promyshlennoe stroitel'stvo. 1990. No. 10. Pp. 20–21. (rus)
9. Rybkin I.S. Improvement of design solutions, modeling methods and calculation of corrugated elements [Sovershenstvovanie konstruktivnykh reshenij, metodov modelirovaniya i rascheta gofrirovannykh elementov]: Avtoref. dis... kand. nauk. M., 2008. 22 p. (rus)
10. Poltoradnev A.S. Bearing capacity and optimization of steel thin-walled beams [Nesushchaya sposobnost' i optimizaciya stal'nykh tonkostennykh balok]. dis... kand. nauk. M., 2013. 216 p. (rus)
11. Egorov P.I. Additional bending-torsional forces in an I-beam rod with a transverse continuous

trapezoidal profile of corrugations in the wall [Dopolnitel'nye izgibno-krutyashchie usiliya v dvutavrovom sterzhne s poperechnym nepreryvnym trapeceidal'nym profilem gofrov v stenke]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2007. No. 10. Pp. 24–35. (rus)

12. Elgaaly M., Seshadri A., Hamilton R.W. Shears Strenght of Beams with Corrugated Webs: Journal of Structural Engineering. 1996. Vol. 122. Pp. 390–398.

13. Chan C.L., Khalid Y.A., Sahari B.B., Hamouda A.M.S. Finite element analysis of corrugated web beams under bending: Journal of constructional steel research. 2002. Vol. 58. Pp. 1391–1406.

14. Huang L., Hikosaka H., Komine K., Simulation of accordion effect in corrugated steel web with concrete flanges: Computers and structures. 2004. Vol. 82. Pp. 2061–2069.

15. Kuchta K.R. Wavy Corrugated Web Stiffness Influence on Plate Girders Flange Local Stability. Cracow University of Technology. Poland, 2010. Pp. 205–210.

16. Solodov N.V., Echin V.A. Metal I-beam with a corrugated wall. Patent RF, no 2017125573, 2017.

17. Solodov N.V., Demin V.O. Prestressed metal I-beam. Patent RF, no. 2021120142, 2021.

Information about the authors

Solodov, Nikolai V. Associate professor. E-mail: kafedrasigsh@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Received 17.02.2022

Для цитирования:

Солодов Н.В. Двутавровая балка с поясами из ЗГСП и гофрированной стенкой // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 75–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-75-81

For citation:

Solodov N.V. I-beam with ZGSP chorns and a corrugated wall. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 4. Pp. 75–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-75-81

10.34031/2071-7318-2021-7-4-82-91

Крючков А.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: krjuchkow@yandex.ru

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СПЛОШНОГО И СОСТАВНОГО СЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ УТОЧНЕННОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

Аннотация. Предложен расчетный аппарат, позволяющий с единых позиций рассматривать вопросы деформативности железобетонных элементов сплошного и составного (сборно-монолитного) сечения. В подходе использован итерационный подход для определения деформаций, основанный на деформационной модели квазиоднородного сплошного тела с использованием нелинейной диаграммы деформирования бетона и кусочно-линейной диаграммы деформирования арматуры, уравнений равновесия внешних сил и внутренних усилий. Подход возможен для определения параметров напряженно-деформированного состояния изгибаемых, внецентренно-сжатых элементов. Работа растянутого бетона до образования трещин описывается также нелинейной зависимостью, после – прямоугольная эпюра. Для сжатой части сечения – криволинейная эпюра. В методике расчета распределение жесткости по длине элемента имеет вид параболы (не в виде ломаной и не кусочно-линейный), что позволяет учесть прогиб от действия поперечной силы в коротких железобетонных элементах и может быть использован как внешний блок для системы автоматизированного проектирования. Выполнено сопоставление данных физического эксперимента, параметров, полученных по предложенной методике. Сделан вывод о коэффициенте корреляции данных физического эксперимента автора и результатами расчета по предлагаемой методике. Показаны перспективы развития подхода и возможные области его использования.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, изгибаемый элемент, нелинейный расчет, кривизна, квазиоднородное сплошное тело, запроектные воздействия

Введение. Совершенствование теоретических основ проектирования несущих конструкций зданий и сооружений, совершенствования новых схем зданий, отвечающих современным требованиям к конструктивному обеспечению среды жизнедеятельности, с учетом критериев их эксплуатации пригодности и безопасности (в том числе противодействие прогрессирующему обрушению), закрепленное для ряда зданий и сооружений законодательно, выявляют резервы для использования материалов. Наиболее простой, инженерный метод расчета, рекомендованный в действующих строительных нормах в качестве предварительного – метод предельного равновесия, позволяющий с достаточной точностью определять несущую способность элемента или конструкции в целом. Однако, при определенных сочетаниях прочностных параметрах более корректным является комплексный подход, позволяющий оценивать напряженно-деформированное состояние железобетонных изгибаемых, внецентренно сжатых, на всех стадиях эксплуатационной стадии работы конструкции широко рассмотрен как в нашей стране, так и за ее пределами. Существует большое количество различных подходов к оценке НДС сечений, при этом ни один из существующих не обладает всей полнотой получаемой в процессе расчета информацией. В предлагаемой методике для определе-

ния деформаций положена деформационная модель квазиоднородного сплошного тела [1, 11–13] с использованием уравнений равновесия внешних и внутренних усилий в нормальном сечении, условия деформирования в виде плоского поворота и плоского перемещения сечения (гипотеза Бернулли), реальной диаграммы бетона « $\sigma - \varepsilon$ », полученной в условиях жесткого статического нагружения (в качестве нагрузочного параметр при испытании призм – перемещение [2]) как для конструкционного бетона, так и для легких бетонов [3], со способом описания в виде степенного полинома (рис. 1), кусочно-линейной диаграммы работы арматурной стали « $\sigma_s - \varepsilon_s$ ».

Методика. Разработанная методика нелинейного расчета, базируясь на едином подходе оценки прочности, деформативности, в настоящее время уже позволила решить широкий спектр задач: 1) учет действия (влияния) поперечной силы для коротких элементов [3] и элементов из легкого бетона [4, 5] (в том числе с возможностью решения вопросов трещиностойкости [6]); 2) развитие методики позволило учесть коррозионные повреждения [7, 8] железобетонных элементов сплошного и составного (сборно-монолитного) сечения; 3) предложенная методика [3] с небольшими доработками математического аппарата позволила адекватно отслеживать все параметры напряженно-деформированного

состояния при кратковременном и длительном действии нагрузки, в том числе и для предварительно-напряженных элементов [9]; 4) учет переменной жесткости элементов также возможен, как это показано в работе [11].

Общеизвестно, что достоверную связь между жесткостными параметрами сечения и возникающими в нем усилиями можно получить на основе реальных диаграмм деформирования материала (рис. 1).

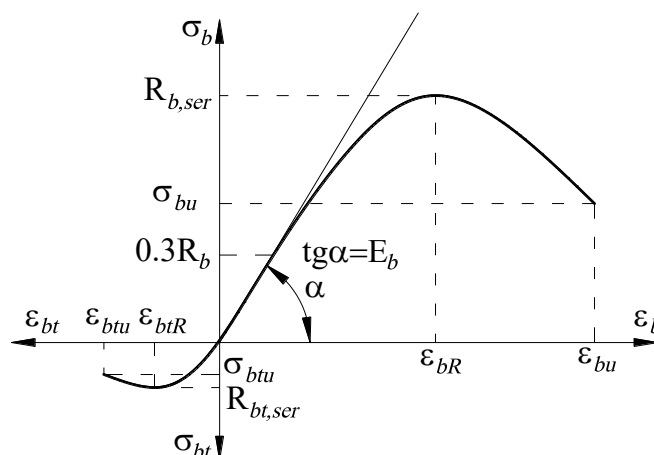


Рис. 1. Нелинейная диаграмма деформирования бетона, получаемая в условиях жесткого статического нагружения

В статически-неопределимых системах после появления «пластического шарнира» общая несущая способность системы не снижается, а происходит перераспределение усилий [10]. Это является свидетельством остаточного внутреннего момента и работой сечений на нисходящей ветви деформирования бетона. Учет данного момента позволяет более достоверно оценивать деформации системы в области запроектных (аварийных) воздействий, которая реализуется, например, при расчетном обосновании прогрессирующего разрушения.

В настоящей методике определения напряженно-деформированного состояния нормальных сечений изгибаемых стержневых элементов как без предварительного напряжения, так и предварительно напряженных используются следующие исходные предпосылки:

1. В качестве расчетного принято сечение, в котором напряженно-деформированное состояние соответствует усредненному состоянию блока между трещинами (если таковые имеются).

2. Для расчетного сечения является справедливым линейный закон распределения деформаций по высоте (гипотеза Бернулли).

3. На всем протяжении деформирования конструкции обеспечивается совместная работа сборного и монолитного бетонов. Это достигается за счет сцепления, механического зацепления и трения, а также работы поперечной арматуры на срез (для сборно-монолитных конструкций).

4. Связь между напряжениями и деформациями тяжелого конструкционного бетона представлено выражением ($k=5$)

$$\sigma_b = R_b \sum_{i=1}^n c_i \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bR}} \right)^k. \quad (1)$$

5. Часть бетона, где деформации сжатой зоны достигли предельную деформативность бетона, выключаются из работы.

6. Работа растянутого бетона до достижения деформаций, равных $\varepsilon_{btu} = 2R_{bt} / E_b$, описывается зависимостью 1, после прямоугольной эпюрой с ординатой $R_{bt}\psi_{bt}$.

7. Зависимость между напряжениями и деформациями арматурной стали принимается в виде кусочно-линейной диаграммы (рис. 2), параметры которой получены экспериментальным путем (испытанием стандартных образцов).

Уравнения связи между напряженно-деформированным состоянием составного сечения без трещин и внешними усилиями – рисунок 3 (а, б, в):

$$\int_A \sigma_b dA + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} A_{si} - N = 0; \quad (2)$$

$$\int_A \sigma_b y dA + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} y_{si} A_{si} - M = 0, \quad (3)$$

где σ_b – напряжения в элементарной площадке в «сборном» или «монолитном» бетоне площадью dA_b , расположенной на расстоянии, равном y от нижней грани сечения; σ_{si} ; A_{si} и y_{si} – напряжения в i -ом арматурном стержне, площадь его поперечного сечения и расстояние от

нижней грани сечения конструкции до центра тяжести указанной площади, N – внешнее силовое воздействие в виде продольной силы, M – внешний изгибающий момент.

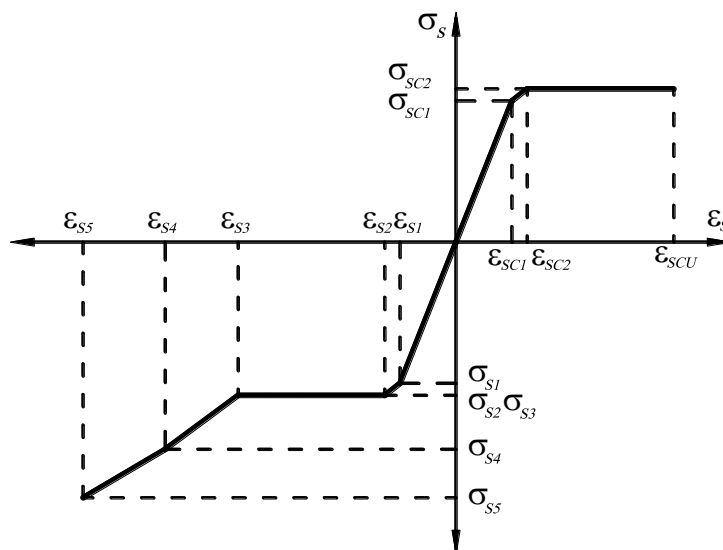


Рис. 2. Диаграмма растяжения арматурной стали

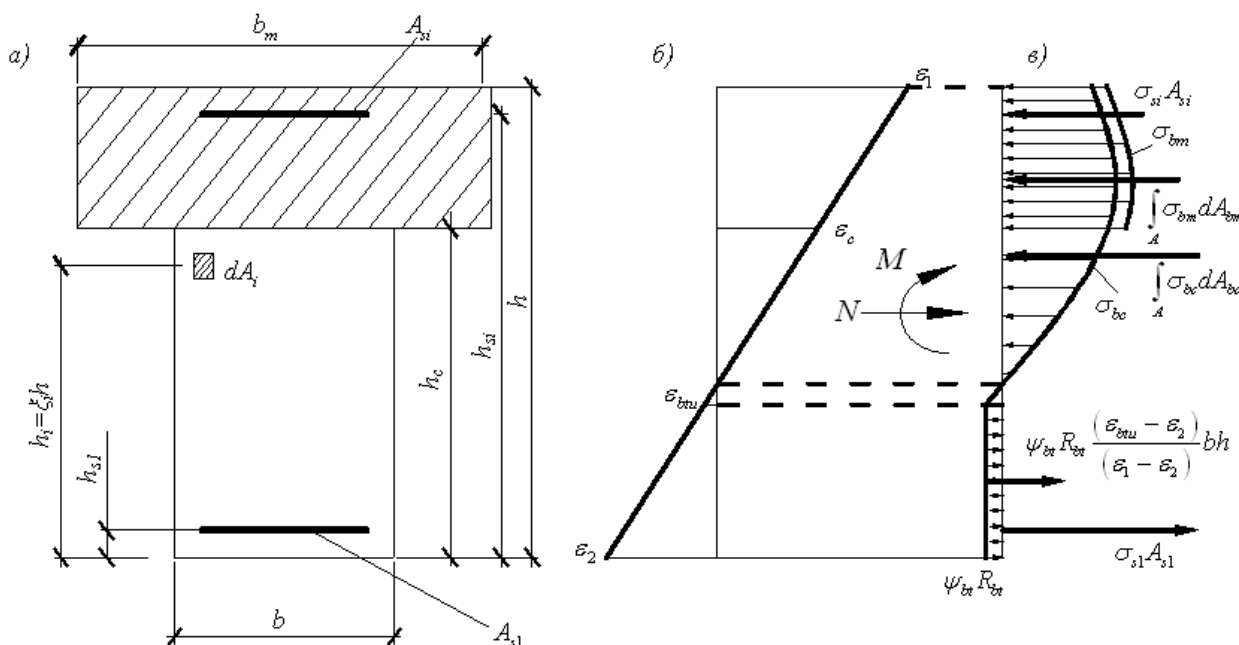


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние сборно-монолитного сечения:

а – поперечное сечение; б – эпюра деформаций; в – эпюра напряжений

Значение продольной силы N подразумевает как внешнюю сжимающую нагрузку при расчете сжатых и сжато-изогнутых стержней, так и величину предварительного напряжения [8], а при некоторой перестройке расчетного аппарата

позволяет учесть реологические свойства бетона (прежде всего усадку и ползучесть).

Система уравнений, описывающая работу сборно-монолитных железобетонных элементов без предварительного напряжения, в общем случае будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \left[R_{bc} \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_1^{k+1} - \chi_1^{k+1}}{\varepsilon_{bR}} \right) - R_{bc} \beta \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_1^{k+1} - \chi_2^{k+1}}{\varepsilon_{bR}} \right) + \right. \\ & \left. + R_{bm} \beta_m \sum_{k=1}^n \frac{b_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_1^{k+1} - \chi_3^{k+1}}{\varepsilon_{bR}} \right) + \psi_{bt} R_{bt} (\chi_4 - \varepsilon_2) \right] + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} \mu_{si} = 0; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2} \left\{ R_{bc} \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_1^{k+2} - \chi_1^{k+2}}{\varepsilon_{bR}} \right) - R_{bc} \varepsilon_2 \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_1^{k+1} - \chi_1^{k+1}}{\varepsilon_{bR}} \right) - \right. \\
& - R_{bc} \beta \left[\sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_1^{k+2} - \chi_2^{k+2}}{\varepsilon_{bR}} \right) - R_{bc} \varepsilon_2 \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_1^{k+1} - \chi_2^{k+1}}{\varepsilon_{bR}} \right) \right] + \\
& + R_{bm} \beta_m \left[\sum_{k=1}^n \frac{b_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_1^{k+2} - \chi_3^{k+2}}{\varepsilon_{bR}} \right) - \varepsilon_2 \sum_{k=1}^n \frac{b_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_1^{k+1} - \chi_3^{k+1}}{\varepsilon_{bR}} \right) \right] + \\
& \left. + \frac{\psi_{bt} R_{bt}}{2} (\chi_4 - \varepsilon_2)^2 \right\} + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} \mu_{si} \xi_{si} - m = 0.
\end{aligned} \quad (5)$$

Значения параметров χ_1 , χ_2 , χ_3 и χ_4 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения параметров						
Случай деформирования	Исходные условия	χ_1	χ_2	χ_3	χ_4	Примечания
1	$\varepsilon_2 \leq \varepsilon_{btu}$	ε_2	ε_c	ε_c	ε_c	трещин нет
2	$\varepsilon_2 > \varepsilon_{btu}$ $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{btu}$	ε_{btu}	ε_c	ε_c	ε_{btu}	трещины только в сборном бетоне
3	$\varepsilon_2 > \varepsilon_{btu}$ $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{btu}$	ε_{btu}	ε_{btu}	ε_{btu}	ε_{btu}	трещины в сборном и монолитном бетоне

В предлагаемой методике описание жесткости выполнено в виде параболы, что более полно отображает действительную работу конструкции.

С учетом граничных условий для однопролетной шарнирно опертой балки получаем выражение для определения перемещений сечений, а также углов поворота.

$$\begin{aligned}
y_i = y_1 + (i-1) \cdot \varphi_1 \Delta + \sum_{j=1}^{i-1} [2 \cdot (i-j) - 1] \cdot \frac{\aleph_j}{2} \cdot \Delta^2 + \\
+ \sum_{k=1}^{i-1} \frac{Q_k^R \cdot [8 \cdot (i-k) - 5]}{24 \cdot B_k} \cdot \Delta^3 + \sum_{l=2}^i \frac{Q_l^L \cdot [4 \cdot (i-l) + 1]}{24 \cdot B_l} \cdot \Delta^3,
\end{aligned} \quad (6)$$

$$\varphi_i = \varphi_1 + \sum_{j=1}^{i-1} \aleph_j \Delta + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{Q_k^R}{3B_k} \Delta^2 + \sum_{l=1}^i \frac{Q_l^L}{6B_l} \Delta^2 \quad (7)$$

Проведя необходимые преобразования, получаем выражение для силового воздействия

$$F = \frac{-n \cdot \varphi_1}{\sum_{j=2}^n [2(n-j) + 1] \cdot \frac{Fp_j \cdot \Delta}{2 \cdot B_j} + \sum_{k=1}^n \frac{MKR_k \cdot [8(n-k) + 3] \Delta^2}{24B_k} + \sum_{l=2}^{n+1} \frac{MKL_l \cdot [4(n-l) + 5] \Delta^2}{24 \cdot B_l}}, \quad (8)$$

где n – количество участков разбиения; φ_1 – угол поворота в сечении на опоре, являющийся «нагрузочным» параметром; Δ – длина участка разбиения; Fp – параметр описания эпюры моментов; MKL, MKR – параметры описания эпюры поперечных сил.

В связи со сложностью выполнения расчетов инженерными методами рекомендуется выполнять расчетную программу на компьютере. В то же время для решения любой задачи необходимы

два алгоритма: один позволяет установить связь между жесткостью элемента и внутренними силовыми факторами в нем, а также блока оценки напряженно-деформированного состояния балки в целом.

На основе разработанной методики расчета разработаны компьютерный алгоритм и расчетная программа для монолитных и сборно-монолитных железобетонных элементов поперечного сечения.

В результате проведенных расчетов распределение жесткости по длине элемента имеет параболический вид, что позволяет учитывать прогиб железобетонных элементов и может быть использовано в качестве компонента системы автоматизированного проектирования (САПР).

Сравнение экспериментальных данных [14] и результатов сравнения теоретических данных, полученных на основе разработанной методики, показывает достаточно хорошее совпадение (коэффициент корреляции составляет 0,65), что также позволяет проводить численный эксперимент на основе данного метода, тем самым значительно расширяя сферу изучаемых факторов.

Основная часть. Для изучения влияния на силовые и деформативные свойства сборно-монолитных балок, соотношения прочности сборного и монолитного бетона, содержание продоль-

ной арматуры, их свойства и относительный пролет среза было выполнено математическое моделирование (эксперимент).

Часть математического эксперимента направлена на определение рабочих характеристик сборно-монолитных балок при различных величинах продольного армирования.

Основные геометрические размеры балок принимались одинаковыми как в физическом эксперименте, так и первой части математического эксперимента (свободно опертая балка, с двумя сосредоточенными силами в пролете). Балки приняты из бетона В25/В45, и коэффициенты полинома, соответствующие свойствам этих бетонов, назначены в соответствии с табл. 2, прочностные и деформационные характеристики бетона – табл. 3, а арматура – табл. 4. Внешний вид исходных диаграмм показан на рис. 4, арматуры рис. 5.

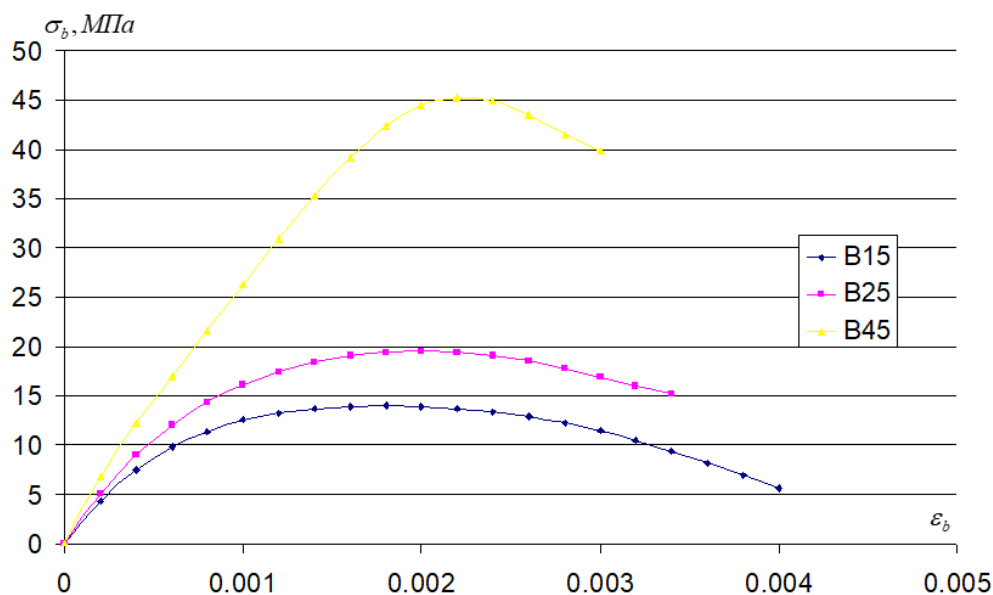


Рис. 4. Теоретические зависимости « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » для бетонов различных классов

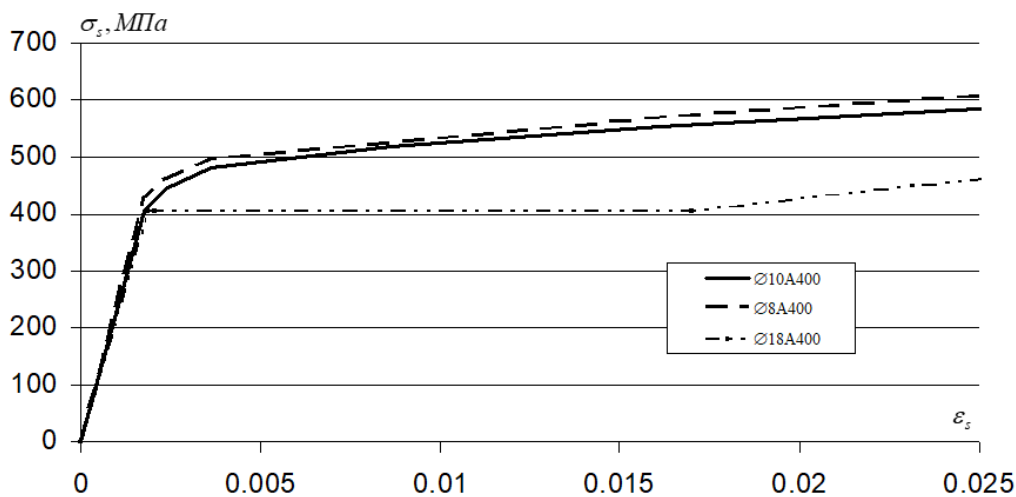


Рис. 5. Теоретические зависимости « $\sigma_s - \varepsilon_s$ » для арматуры различных классов

Таблица 2

Значения коэффициентов полинома a_k бетонов опытных составов

Класс бетона	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
B15	0,1472	-1,0246	2,7836	-4,0931	3,1870
B25	0,2201	-1,2344	2,8892	-4,1939	3,7053
B45	2,1988	-9,0839	12,2948	-7,4587	5,0724

Таблица 3

Прочностные и деформативные характеристики бетонов опытных составов

Класс бетона	R_b , МПа	E_b , МПа	$\varepsilon_{bu} \times 10^5$	$\varepsilon_{bR} \times 10^5$	β_u
B15	14	21529	400	180	0,58
B25	23	25486	366	205	0,61
B45	44	32100	270	200	0,84

Таблица 4

Численные значения напряжений и деформаций в точках перелома кусочно-линейных диаграмм « $\sigma - \varepsilon$ » для стержней диаметром, мм

№ точки	18		10		8	
	σ_s , МПа	$\varepsilon_s \times 10^5$	σ_s , МПа	$\varepsilon_s \times 10^5$	σ_s , МПа	$\varepsilon_s \times 10^5$
1	0	0	0	0	0	0
2	406	188	332	165	407	186
3	420	204	373	205	444	235
4	420	1701	415	279	481	364
5	488	2316	456	440	518	864
6	528	3128	497	899	555	1614
7	550	3562	538	1964	591	2674

Площадь поперечного сечения арматуры варьировалась в диапазоне от 0,85 см² (3Ø6, $\mu=0,53\%$) до 7,6 см² (2Ø22, $\mu=4,75\%$). Нагрузка прикладывается в виде двух сосредоточенных сил, расположенных на равных расстояниях от опоры.

Был разработан математический план эксперимента с учетом принятой комбинации переменных факторов. В результате расчетов, выполненных на основе предложенной методики описания криволинейной оси с использованием полинома четвертой степени, были получены данные о напряженно-деформированном состоянии

нормальных сечений и величины несущей способности балок. В качестве критериев оценки несущей способности принимаются следующие критерии: достижение предельных значений при деформации сжатого бетона и растянутой продольной арматуре.

Кроме того, расчеты проводились по специально составленной программе, но с интерпретацией изогнутой оси уравнениями третьей степени. Затем были сопоставлены результаты расчетов, полученных с использованием полиномов третьей степени. По результатам сравнения была создана диаграмма (рис. 6).

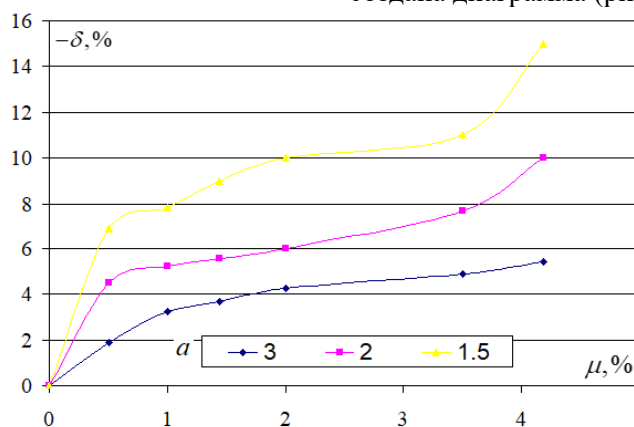


Рис. 6. Зависимость неточности определения прогиба ($-\delta$) от процента продольного армирования (μ) и различного пролета среза (сравнение предлагаемой методики и методики, основанной на полиноме третьей степени)

Согласно результатам математического эксперимента, процент содержания продольной арматуры оказывает существенное влияние не только на распределение прогибов по оси балки, но и на напряженно-деформированное состояние всего элемента. Например, по данным математического эксперимента наблюдается занижение величины прогибов при использовании полинома третьей степени в расчетах до 10–11 % по сравнению с уточненным методом предлагаемым автором.

Выводы. Проведенный математический эксперимент, направленный на уточнение методики расчета, при варьировании таких факторов, как вид бетона, величина прочности сборного и монолитного бетона, процент продольного армирования и относительный пролет среза, позволил сформулировать следующие результаты исследований:

1. Сравнение экспериментальных и теоретических данных показывает, что они в достаточной степени достоверны (коэффициент корреляции 0,86).

2. При оценке деформаций железобетонных балок по разработанной методике можно ограничиться разделением элемента на четыре части (участка).

3. Увеличение коэффициента продольного армирования приводит к недооценке значения прогиба во всех существующих методиках (включая методику действующих норм).

4. Сокращение пролета среза приводит к значительной недооценке величины прогиба элементов.

5. С помощью математического эксперимента удалось определить область, где поперечная сила оказывает особенно большое влияние на прогиб балки:

- недооценка величины прогиба, без учета поперечной силы в железобетонном элементе, увеличивается по мере увеличения процента продольного армирования и уменьшения расстояния от опоры до места приложения силы (пролета среза).

6. Согласно данным математического эксперимента, итерационный процесс, основанный на разработанной методике расчета, обладает достаточной сходимостью для расчета стержневых железобетонных элементов во всем диапазоне его работы, в том числе на нисходящей ветви диаграммы "момент-кривизна", что особенно важно для расчета статических неопределимых конструкций и каркасных систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голышев А.Б., Бачинский В.Я. К разработке прикладной теории расчёта железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. 2011. №6. С. 16–18.

2. Методические рекомендации по определению параметров диаграммы « $\sigma - \epsilon$ » бетона при кратковременном сжатии. Киев: НИИСК Госстроя СССР, 1985. 16 с.

3. Крючков А.А. Деформативность сборно-монолитных стержневых конструкций : дисс. ... кандидата технических наук. Белгород, 2006. 210 с.

4. Смоляго Г.А., Крючков А.А., Дронова А.В., Дрокин С.В. К расчету изгибаемых элементов составного сечения из легких бетонов на пористых заполнителях // Строительство и реконструкция. 2012. № 2(40). С. 38–43.

5. Дронова А.В., Смоляго Г.А. Каркасные конструктивные системы малоэтажных жилых домов из монолитного керамзитобетона. Белгород, 2016. 158 с.

6. Крючков А.А., Смоляго Е.Г. Экспериментальные исследования трещиностойкости сборно-монолитных изгибаемых железобетонных элементов // Строительство и реконструкция. 2010. № 1(27). С. 47–54.

7. Дронов А.В. Прочность и деформативность железобетонных изгибаемых элементов с коррозионными повреждениями.: дисс. ... канд.техн. наук. Белгород, 2017. 143 с.

8. Фролов Н.В., Смоляго Г.А. Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями бетона сжатой зоны // Безопасный и комфортный город: Сборник научных трудов по материалам III Всероссийской научно-практической конференции. Орёл, 2019. С. 121–127.

9. Смоляго Е.Г., Луценко А.Н. Экспериментальные исследования трещиностойкости предварительно напряженных сборно-монолитных изгибаемых железобетонных элементов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. № 1. С. 68–72.

10. Бачинский В.Я., Бамбура А.Н., Голоднов А.И., Жданов А.Е. Несущая способность железобетонных балок при силовых и деформационных воздействиях / НИИСК Госстроя СССР. Киев, 1986. 9 с. Деп. во ВНИИИС Госстроя СССР, №6807, вып. 6.

11. Смоляго Г.А., Жданов А.Е., Ищук Я.Л., Фролов Н.В. Расчет деформативности изгибаемых железобетонных элементов переменной жесткости // "Лейбовские чтения-150". Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям: Сборник докладов Международной

научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения профессора, автора методики расчета железобетонных конструкций по стадии разрушения, основоположника советской научной школы теории железобетона, основателя и первого заведующего кафедрой железобетонных конструкций Московского инженерно-строительного института (МИСИ) А.Ф. Лолейта, Москва, 2018. С. 385–390.

12. Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Shcherban E.M., Nazhnev M.P. Setting a diagram approach to calculating vibrated, centrifuged and vibrocentrifuged reinforced concrete columns with a variotropic structure // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2021. No 1(49). P. 30–44. doi:10.36622/VSTU.2021.49.1.003

13. Харламов А.В. Расчет статически неопределимых железобетонных конструкций с

использованием шагово-итерационных методов // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 32. С. 1465–1469.

14. Маляян Л.Р., Стельмах С.А., Щербань Е.М. Расчет и проектирование строительных конструкций с учетом вариативности структуры, сечений и дифференциации конструктивных характеристик материалов // Научный журнал строительства и архитектуры. 2021. № 2(62). С. 27–48.

15. Крючков А.А. Теоретическое и экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных стержневых элементов на основе уточненной методики // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. Приложение №11. Новочеркасск, 2006. С. 70–73.

Информация об авторах

Крючков Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: krjuchkov@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 27.01.2022 г.

© Крючков А.А., 2022

Krjuchkov A.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

E-mail: krjuchkov@yandex.ru

STRESS-STRAIN STATE OF BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS OF CONTINUOUS AND COMPOSITE CROSS-SECTION BASED ON A REFINED NONLINEAR CALCULATION METHOD

Abstract. A calculation apparatus is proposed that allows considering the issues of deformability of reinforced concrete elements of solid and composite (prefabricated-monolithic) sections from a single position. The approach uses an iterative approach to determine deformations based on a deformation model of a quasi-homogeneous solid body using a nonlinear concrete deformation diagram and a piecewise linear reinforcement deformation diagram, equations of equilibrium of external forces and internal forces. The approach is possible to determine the parameters of the stress-strain state not only of the bent, but also for non-centrally compressed elements. The work of stretched concrete before the formation of cracks is also described by a nonlinear dependence, after that - a rectangular plot. For the compressed part of the section - when deformations are achieved. In the calculation method, the stiffness distribution along the length of the element has a parabolic appearance (not piecewise linear and not in the form of a polyline), which allows for additional deflection from the action of transverse force in short reinforced concrete elements and can be used as an external unit for a computer-aided design system. The comparison of the data of the physical experiment, the parameters obtained by the proposed method is carried out. The conclusion is made about the correlation coefficient of the author's physical experiment data and the calculation results according to the proposed methodology. The prospects for the development of the approach and possible areas of its use are shown.

Keywords: reinforced concrete structures, bendable element, nonlinear calculation, curvature, quasi-homogeneous solid body, out-of-design impacts.

REFERENCES

1. Golyshev A.B., Bachinsky V.Ya. To the development of the applied theory of calculation of reinforced concrete structures [K razrabotke prikladnoj

teorii raschyota zhelezobetonnyh konstrukcij]. Concrete and reinforced concrete. 2011. No. 6. Pp. 16–18. (rus)

2. Methodological recommendations for determining the parameters of the diagram « $\sigma - \varepsilon$ » of concrete under short-term compression

[Metodicheskie rekomendacii po opredeleniyu parametrov diagrammy « σ – ε » betona pri kratkovremennom szhatii]. Kiev: NIISK Gosstroy of the USSR, 1985. 16 p. (rus)

3. Kryuchkov A.A. Deformability of prefabricated monolithic rod structures : diss. ... candidate of technical sciences [Deformativnost' sborno-monolitnykh sterzhnevnykh konstrukcij : diss. ... kandidata tekhnicheskikh nauk]. Belgorod, 2006. 210 p. (rus)

4. Smolyago G.A., Kryuchkov A.A., Dronova A.V., Drokin S.V. To the calculation of bendable elements of composite cross-section of light concrete on porous aggregates [K raschetu izgibaemykh elementov sostavnogo secheniya iz legkikh betonov na poristyyh zapolnitelyah]. Construction and reconstruction. 2012. No. 2(40). Pp. 38–43. (rus)

5. Dronova A.V., Smolyago G.A. Frame structural systems of low-rise residential buildings made of monolithic expanded clay concrete [Karkasnye konstruktivnye sistemy maloetazhnykh zhilykh domov iz monolitnogo keramzitobetona]. Belgorod, 2016. 158 p. (rus)

6. Kryuchkov A.A., Smolyago E.G. Experimental studies of crack resistance of prefabricated monolithic bent reinforced concrete elements [Eksperimental'nye issledovaniya treshchinostojkosti sborno-monolitnykh izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov]. Construction and reconstruction. 2010. No. 1(27). Pp. 47–54. (rus)

7. Dronov A.V. Strength and deformability of reinforced concrete bendable elements with corrosion damage.: Dis. ... candidate of Technical Sciences [Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov s korrozionnymi povrezhdeniyami.: Dis. ... kand.tekhn. nauk]. Belgorod, 2017. 143 p. (rus)

8. Frolov N.V., Smolyago G.A. Calculation of the strength of normal sections of bent reinforced concrete elements with corrosion damage to concrete of the compressed zone [Raschet prochnosti normal'nykh sechenij izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov s korrozionnymi povrezhdeniyami betona szhatoy zony]. Safe and comfortable city: Collection of scientific papers based on the materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference. Orel, 2019. Pp. 121–127. (rus)

9. Smolyago E.G., Lutsenko A.N. Experimental studies of crack resistance of prestressed prefabricated monolithic bent reinforced concrete elements [Eksperimental'nye issledovaniya treshchinostojkosti predvaritel'no napryazhennykh sborno-monolitnykh izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. Belgorod. 2010. No. 1. Pp. 68–72. (rus)

10. Bachinsky V.Ya., Bambura A.N., Golodnov A.I., Zhdanov A.E. Bearing capacity of reinforced

concrete beams under force and deformation effects [Nesushchaya sposobnost' zhelezobetonnykh balok pri silovykh i deformatsionnykh vozdeystviyakh]. NIISK Gosstroy of the USSR. Kiev, 1986. 9 p. Dep. VNIIS Gosstroy of the USSR, No. 6807, issue 6.

11. Smolyago G.A., Zhdanov A.E., Ishchuk Ya.L., Frolov N.V. Calculation of deformability of bent reinforced concrete elements of variable stiffness [Raschet deformativnosti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov peremennoj zhestkosti]. "Loleitovskie readings-150". Modern methods of calculation of reinforced concrete and stone structures by limiting conditions: A collection of reports of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 150th anniversary of the birth of Professor, author of the methodology for calculating reinforced concrete structures by the stage of destruction, founder of the Soviet scientific school of reinforced concrete theory, founder and first head of the Department of Reinforced Concrete Structures of the Moscow Institute of Civil Engineering (MISI) A.F. Loleita, M., 2018. Pp. 385–390. (rus)

12. Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Shcherban E.M., Nazhnev M.P. Setting a diagram approach to calculating vibrated, centrifuged and vibrocentrifuged reinforced concrete columns with a variatropic structure. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2021. No. 1(49). Pp. 30–44. doi:10.36622/VSTU.2021.49.1.003

13. Kharlamov A.V. Calculation of statically indeterminate reinforced concrete structures using step-iterative methods [Raschet staticheskii neopredelimykh zhelezobetonnykh konstrukcij s ispol'zovaniem shagovo-iteracionnykh metodov]. Innovations. The science. Education. 2021. No. 32. Pp. 1465–1469. (rus)

14. Mailyan L.R., Stelmakh S.A., Shcherban E.M. Calculation and design of building structures taking into account the variatropy of structure, cross sections and differentiation of structural characteristics of materials [Raschet i proektirovanie stroitel'nykh konstrukcij s uchetom variatropii struktury, sechenij i differenciacii konstruktivnykh harakteristik materialov]. Scientific Journal of Construction and Architecture. 2021. No. 2(62). Pp. 27–48. (rus)

15. Kryuchkov A.A. Theoretical and experimental study of the stress-strain state of reinforced concrete core elements based on a refined methodology [Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnykh sterzhnevnykh elementov na osnove utochnennoj metodiki]. Izvestiya VUZov. The North Caucasus region. Technical sciences. Appendix No. 11. Novocherkassk. 2006. Pp. 70–73. (rus)

Information about the authors

Krjuchkov, Andrey A. PhD, Assistant professor. E-mail: krjuchkov@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 27.01.2022

Для цитирования:

Крючков А.А. Напряженно-деформированное состояние изгибаемых железобетонных элементов сплошного и составного сечения на основе уточненной нелинейной методики расчета // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 82–91. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-82-91

For citation:

Krjuchkov A.A. Stress-strain state of bent reinforced concrete elements of continuous and composite cross-section based on a refined nonlinear calculation method. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 4. Pp. 82–91. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-82-91

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-92-100

^{1,*}Перистый В.А., ²Чуев В.П., ²Бузов А.А., ¹Перистая Л.Ф.¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет²Акционерное общество «Опытно-экспериментальный завод «ВладМиВа»

(АО «ОЭЗ «ВладМиВа»)

*E-mail: peristy@bsu.edu.ru

РАЗРАБОТКА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОЧИСТОЙ ГЕЛЕОБРАЗНОЙ ВОДНОЙ ПОЛИАКРИЛОВОЙ КИСЛОТЫ (ПАК)

Аннотация. Руководствуясь теоретическими представлениями о закономерностях радикальных цепных полимеризационных процессов, на базе Акционерного общества «Опытно-экспериментальный завод «ВладМиВа» были проведены работы по изучению влияния параметров и условий водной полимеризации акриловой кислоты на пригодность для терапевтической стоматологии ее полимера. Данные исследования послужили основой при разработке и патентовании отечественной технологии производства ~ 40 %-ного водного гелеобразного раствора ПАК, широко применяемого как в России, так и за рубежом при изготовлении пломбировочных стоматологических композитов, и таким образом успешно решить вопрос импортозамещения и избежать различных манипуляционных санкций.

Запатентованная отечественная технология производства 40 %-ного гелеобразного препарата полиакриловой кислоты состоит из 3-х стадий.

1. Растворение 1,5 кг малеинового ангидрида и 0,6 кг инициатора α, α' -азоизобутиронитрила в 32,5 кг свежеперегнанной акриловой кислоты.

2. Приливная полимеризация приготовленной смеси в 120 л воды-растворителя при температуре 93-98 °С в течение 4,5 – 5 часов.

3. Концентрирование полученного ~20 %-ного раствора ПАК под вакуумом (остаточное давление 0,8 – 0,015 МПа), температуре 65-90 °С с получением кондиционного 40 %-ного товарного препарата полиакриловой кислоты.

Ключевые слова: полиакриловая кислота, инициаторы полимеризации, регуляторы полимеризации, параметры (условия) полимеризации, поликарбоксилатные и пломбировочные цементы, терапевтическая стоматология.

Введение. Из многих наиболее распространенных высокомолекулярных соединений (ВМС) [1–4], широко применяемым в качестве пломбировочного связующего биосовместимого ВМС (цемента) в терапевтической стоматологии является биосовместимый и биоразлагаемый полимер полиакриловая кислота (ПАК) [5], линейные полимерные цепи которой при смешении с оксидами поливалентных металлов в течение манипуляционного времени t_m «сшиваются» в сетчатую структуру, в результате чего возрастает механическая прочность, и водорастворимая ПАК цементируется в высокопрочную и абсолютно нерастворимую пломбу – искусственный камень – цемент, обладающий высокой адгезионной прочностью при контакте с тканями человека и животных [6]. Сообщается также о способности ПАК повышать эффективность лекарственных систем [7]. Исторически полиакриловая кислота (ПАК), в зависимости от её молекулярной массы, находила применение в качестве секвестрантов (небольшая молекулярная масса), в красках (средне-низкая молекулярная масса), текстиль-

ной и бумажной промышленности (средне-высокая молекулярная масса), как флокулянт и абсорбент (высокая молекулярная масса) [8]. Но начиная с 80-ых годов применение ПАК всё шире начало внедряться в терапевтическую стоматологию [9, 10].

Однако, как в России, так и за рубежом, выпускаемая ПАК не в полной степени удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ней врачами-стоматологами (манипуляционное время t_m , стабильность при хранении, примеси, прочность, затемненная белизна и др.). Поэтому в начале 2000-х годов на Белгородском Опытно-экспериментальном заводе (ОЭЗ) «ВладМиВа» и кафедре общей химии Белгородского государственного национального исследовательского университета (НИУ «БелГУ») была разработана и запатентована отечественная технология производства товарной высокочистой, стабильной при хранении, обладающей оптимальным t_m , высокопрочной и белой ПАК [11]. Однако данная запатентованная технология заключалась в проведении процесса производства ПАК в растворителе-толуоле, то

есть с применением пожароопасного растворителя, отгонка которого, на завершающей стадии производства, была сопряжена с технологическими трудностями (4-х стадийный процесс глубоковакуумной отгонки с последующей десорбцией остаточных следов толуола) [11].

Постановка задачи. Поэтому дальнейшее усовершенствование отечественной технологии заключалось в разработке способа получения ПАК в виде её ~ 40 %-ного водного гелеобразного препарата, т.е. при проведении процесса полимеризации акриловой кислоты (АК) не в растворителе-толуоле, а в воде. Кроме того, импортные поставки водной гелеобразной ПАК (например, немецкого «Соколана») не всегда удовлетворяли требованиям наших врачей-стоматологов: t_m , чистота, содержание основного вещества и др. А главное в последнее время импортные поставки осуществлялись с перебоями при санкционном манипулировании. Поэтому, с учетом складывающейся конъюнктуры, разработка отечественной технологии производства высококачественной гелеобразной водной ПАК явилась насущной задачей.

Более конкретно разрабатываемая отечественная технология должна обеспечить получение такой товарной ПАК, которая удовлетворяла бы следующим стоматологическим требованиям:

- светлый гелеобразный препарат;
- отсутствие посторонних запахов и примесей;
- соответствие прочностным показателям, согласно международному стандарту ИСО №4104;
- манипуляционное время при пломбировании и затвердевании – 6–8 минут.

Основная часть. Известен способ полимеризации акриловой кислоты [12] в присутствии инициатора трис-ацетил и бис-(ацетилацетоната) карбоксилата $Mn(III)$ с получением ПАК, применяемой в текстильной и бумажной промышленности, а также в качестве коагулянта сточных вод. Однако, загрязнённость следами инициатора и большая молекулярная масса (следовательно, малое t_m) не позволяют такую ПАК успешно применять в стоматологии. Согласно другому источнику [13], полимеризация в присутствии окислительно-восстановительной системы Co^{3+} - глицин также приводит к получению ПАК с большой молекулярной массой.

Получение ПАК в виде 36,8 %-ного геля может быть осуществлено при полимеризации акриловой кислоты в присутствии инициатора пероксида водорода и регуляторов степени полимеризации гидрохинона и тиогликолевокислого натрия [14]. Несмотря на то, что такая ПАК всё же может быть пригодна как пломбировочный

материал, однако, её загрязнение гидрохиноном и тиогликолевокислым натрием, не говоря об отсутствии приемлемой белой цветности, (гидрохинон окисляется в хиноидные структуры и вызывает потемнение препарата) не позволяют данный метод считать перспективным. Поэтому при планировании и разработке отечественной технологии прежде всего руководствовались теорией ВМС, а также учитывались как вышеприведенные стоматологические требования к качеству ПАК, так и литературные сведения по вопросам ПАК. Исходя из этого, в качестве инициатора полимеризации был выбран α, α' -азобисизобутиронитрил (α, α' -аз.), который не содержал в своей структуре нежелательных бензольных колец, по сравнению с такими инициаторами как гидроперекись изопропилбензола или перекись бензоила и другие. А с другой стороны, при практическом опробывании применения многих регуляторов степени полимеризации, была показана либо их неэффективность (меркаптаны, персульфат калия и другие), либо они приносили затемненность препарата (резорцин, гидрохинон), либо вызывали появление нежелательных запахов (фурфурол и другие). Учитывая это и во избежание внесения нежелательных и посторонних реагентов в состав стоматологической ПАК, при разработке отечественной технологии никакие регуляторы не применялись вовсе, а их функции осуществлялись путем варьирования технологическими приёмами и научно обоснованными параметрами процесса получения стоматологической ПАК. Поэтому, с целью выяснения влияния параметров процесса на качество ПАК, были проведены предварительные лабораторные опыты в стекле, результаты которых приведены ниже в таблице 1.

В таблице 1 величина молекулярной массы ПАК интерпретирована через вязкость её 20 %-ного водного раствора, т.к. практически предварительно было установлено, что при $\mu=28-32$ сСт. наблюдается соответствие оптимальному манипуляционному времени затвердевания пломбы – 6–8 минут, т.е. данная вязкость соответствует оптимальной молекулярной массе ПАК. (Ведь широко принято по вязкости определять молекулярную массу полимеров [1, 2]).

Как указывалось, выше в литературных источниках [12, 13], водная полимеризация АК приводит к получению полимера ПАК с высокой молекулярной массой. Однако анализируя данные таблицы 1, можно наметить пути, обеспечивающие получение ПАК с более низкой и приемлемой для стоматологов молекулярной массой. Так из данных таблицы 1 следует, что при повышении объемного соотношения вода:АК и при повышении содержания инициатора α, α' -аз., а

также при повышении температуры и продолжительности процесса полимеризации, образуется полимер с более низкой молекулярной массой. Учитывая эти экспериментальные данные, можно предположить, что возможно одностадийное получение гелеобразной ПАК 40 %-ной концентрации (с приемлемой молекулярной массой) при проведении полимеризации при повышении содержания α, α' -аз. и увеличении продолжительности процесса. Причём, эти два параметра

можно снизить, компенсировав повышение молекулярной массы при их снижении, путем повышения температуры полимеризации выше 100 °С, то есть проводить процесс при повышенном давлении (автоклавирование). Однако автоклавирование сопряжено со значительным техническим усложнением (котлонадзорность, трудности равномерного дозирования АК при проведении приливного способа полимеризации).

Таблица 1

Влияние параметров процесса полимеризации АК на показатели качества ПАК

n/p	Параметры процесса полимеризации АК				Показатели качества ПАК			Примечание
	Объем. со- гн. вода:А	Содерж. α, α' -аз. по отнош. к АК, %	Темп. полимериз., °С	Продолжит. полимериз., час	Внешний вид и цвет	Содерж. осн. в-ва, %	Динам. вязкость, (μ), 20% р-ра ПАК, ссм	
1	2:1	1,8	96–98	5,05	легкая опалесценция	32,5	46,8	Затрудн. перемеш. при полимеризации
2	3:1	1,8	97–98	4,95	—	24,3	41,2	—
3	4:1	1,8	97–99	5,10	—	19,3	30,1	Подвижная масса при полимеризации
4	5:1	1,8	96–97	4,90	—	15,2	27,3	—
5	6:1	1,8	97–98	5,00	—	14,1	23,1	—
6	4:1	1,0	96–99	4,85	светлый	19,7	40,2	—
7	4:1	1,3	96–99	5,20	светлый	19,8	37,0	—
8	4:1	1,8	96–99	4,90	светлый	20,1	29,6	—
9	4:1	2,2	96–99	5,30	светлый	18,9	27,1	—
10	4:1	2,9	96–99	5,10	светлый	20,5	24,2	—
11	4:1	1,8	60,62	5,20	-	-	-	Полимеризация не протекает
12	4:1	1,8	75–80	4,90	легкая опалесценция	19,8	61,2	Затрудн. перемеш. при полимеризации
13	4:1	1,8	89–90	5,25	светлый	20,3	42,3	Подвижная масса при полимеризации
14	4:1	1,8	92–93	4,95	светлый	21,5	33,1	—
15	4:1	1,8	97–98	5,00	светлый	19,4	30,1	—
16	4:1	1,8	97–99	0,5	светлый	17,8	42,1	—
17	4:1	1,8	97–99	1,0	светлый	19,3	37,2	—
18	4:1	1,8	97–99	2,0	светлый	18,7	33,4	—
19	4:1	1,8	97–99	5,0	светлый	20,6	29,2	—
20	4:1	1,8	97–99	7,1	светлый	19,8	26,1	—

Поэтому практически остановились на реализации более технологичного двухстадийного процесса, путём приливной полимеризации при атмосферном давлении и температуре 94–98 °С при равномерной подаче в течение 4,5–5,0 часов полимеризационной смеси (АК, в которой растворено 1,5–2,1 % α, α' -аз.) в воду – растворитель

(4-х кратный объем воды по отношению к полимерсмеси). По окончании подачи и получасовой выдержки, полученный 19–21 %-ный раствор ПАК концентрируется до 39–41 %-ного содержания путем упаривания под вакуумом. Хотя упаривание и привносит дополнительную вторую стадию в данную технологию, но с другой стороны, при упаривании увлекаются парами воды

следы остаточного мономера, что повышает качество кондиционной ПАК. Эти данные послужили отправной точкой при их использовании и при руководстве ими, при уточнении и отработке технологии на пилотной установке, на которой уже применялось малогабаритное химическое оборудование.

Однако, при дальнейшей реализации начатых лабораторных исследований и при переходе к промышленному масштабу, то есть при переходе от лабораторных опытов «в стекле» к реализации промышленной технологии «в металле», необходимо было, прежде всего, исследовать коррозионную устойчивость конструкционных материалов с целью грамотного и обоснованного их выбора при дальнейшем решении вопроса относительно аппаратного оформления будущего производства водного гелеобразного стоматологического препарата полиакриловой кислоты (ПАК).

Данные работы проводились на пилотной установке для двух основных стадий разрабатываемой технологии: первой стадии, процесса водной полимеризации акриловой кислоты и второй стадии концентрирования, полученного на первой стадии ~ 20 %-ного водного раствора полиакриловой кислоты путем ее упаривания и отгонки воды с получением ~ 40 %-ного кондиционного гелеобразного полиакрилового препарата. Причем, при оценке пригодности конструкционных материалов для их успешного применения, необходимо было учитывать не только их коррозионную устойчивость, но и при этом предусмотреть, чтобы конструкционные материалы не привносили загрязнение стоматологической полиакриловой кислоты ионами металлов и посторонней органикой, а также не влияли на нарушение белизны товарного кондиционного препарата. Поэтому коррозионные испытания проводились в условиях полностью идентичных к реальным технологическим процессам, то есть испытания проводились, совмещая как проведения полимеризации, так и последующее концентрирование полученного при полимеризации ~ 20 %-ного раствора полиакриловой кислоты до ~ 40 %-ного кондиционного препарата, с одновременными коррозионными испытаниями при этом. Но в отличие от часто проводимых многими исследователями коррозионных испытаний в статических условиях, нами учитывалось и влияние реальной гидродинамики технологического процесса, так как известно, что при эффективном перемешивании реакционной массы может снижаться коррозионная устойчивость материалов.

Для этого испытуемые образцы взвешивались и помещались в пилотный реактор-полимеризатор, включалось перемешивание, обогрев и

при достижении температуры воды-растворителя порядка 92 °С начиналась подача акриловой кислоты и начинался процесс полимеризации, который протекал в течение ~ 5 часов при температуре 92–97 °С. Испытания заканчивались при проведении 3-х процессов полимеризации в идентичных условиях. Далее образцы промывались мембранной (обессоленной) водой, сушились и взвешивались. По потере массы рассчитывалась скорость коррозии по общепринятой формуле:

$$П = \frac{K \cdot 8,765}{\rho \cdot 1000}, \text{ мм/год}$$

где К – потеря массы образца, г/м²·ч; ρ – плотность материала образца, г/см³; 8,765 – число часов в году.

Результаты проведенных опытов и вычислений приведены в таблице 2.

Исходя из экспериментальных данных таблицы 2 и учитывая сравнительно высокую температуру коррозионных испытаний, можно в принципе рекомендовать в качестве основного конструкционного материала для реактора-полимеризатора 4-е материала: эмаль кислотоупорную, сталь нержавеющую 1Х18Н10Т, бронзу ОЦН-3-7-5-1, а также свинец. Если учитывать только показатель коррозионной устойчивости, то свинец и бронза ОЦН-3-7-5-1 могут, в принципе, быть рекомендованы в качестве конструкционных материалов аппаратуры производства ПАК. Но принимая во внимание, что попадание хоть малой толики ионов металлов в стоматологическую полиакриловую кислоту недопустимо, это является препятствием для их практического применения. Поэтому из всех приведенных в таблице 2 материалов можно твердо рекомендовать к применению только эмаль кислотоупорную и фторопласт, а также нержавеющую сталь. Конечно, более практичным и более широко применяемым является эмалированный реактор-полимеризатор. А в качестве прокладочного материала наиболее оптимальный вариант, конечно, фторопласт, так как паронит УВ-10 и резина техническая листовая являются источниками ухудшения цветности, а факт потемнения кондиционного полимера вызывает у стоматологов категорическое неприятие. В этой связи для герметизации вала мешалки и сальниковую набивку также следует выполнять из фторопласта (в виде стружек).

Дальнейшие коррозионные испытания были проведены применительно к процессу упаривания ~ 20 %-ного раствора полиакриловой кислоты с целью повышения ее концентрации до ~ 40 %-ной.

Таблица 2

Скорость коррозии в процессе водной полимеризации акриловой кислоты при температуре 92–97 °С. (Суммарное экспозиционное время 15 часов)

№ п/п	Наименование материалов	Скорость коррозии, мм/год (в скобках коррозионная устойчивость, баллы)	Примечания
1.	Сталь малоуглеродистая, Ст.-5	0,9 (7)	Понижено стойкая
2.	Свинец	0,4 (6)	—
3.	Бронза, Бр.ОЦН-3-7-5-1	0,4 (6)	—
4.	Сталь нержавеющая 1X18H10T	0,01 (2)	Весьма стойкая
5.	Паронит УВ-10	>20 (10)	Нестойкий, крошится
6.	Эмаль кислотоупорная	<0,01 (1)	Весьма стойкая
7.	Резина техническая листовая	0,4 (6)	Понижено стойкая, привносит потемнение
8.	Фторопласт-4	<0,01 (1)	Весьма стойкий

Для этого в процессе выполнения технологических исследовательских опытов образцы материалов взвешивались и помещались в выпарной аппарат объемом 40 литров, то есть коррозионные испытания совмещались с проведением технологии упаривания. При этом температура процесса вакуумной выпарки составляла 65-97 °С и

процесс протекал в течение ~ 2 часов. Испытания заканчивались на 5-ой выпарной операции и суммарное время процессов упаривания составляло ~ 10 часов. Ниже приведены в таблице 3 результаты данных экспериментов.

Таблица 3

Скорость коррозии конструкционных материалов в процессе концентрирования полиакриловой кислоты при ее вакуумном упаривании от 20-ти до 40 %-ной концентрации и температуре 65–97 °С. (Суммарное экспозиционное время ~ 10 часов)

№ п/п	Наименование материалов	Скорость коррозии, мм/год (в скобках коррозионная устойчивость, баллы)	Примечания
1.	Сталь малоуглеродистая, Ст.-5	0,4 (6)	Понижено стойкая
2.	Свинец	0,2 (4)	Стойкая
3.	Бронза, Бр.ОЦН-3-7-5-1	0,2 (4)	Стойкая
4.	Сталь нержавеющая 1X18H10T	0,01 (2)	Весьма стойкая
5.	Паронит УВ-10	>20 (10)	Нестойкий, крошится
6.	Эмаль кислотоупорная	<0,01 (1)	—
7.	Резина техническая листовая	0,4 (6)	Понижено стойкая, привносит потемнение
8.	Фторопласт-4	<0,01 (1)	Весьма стойкий

Как и следовало ожидать, упаривание по сравнению с полимеризацией оказалось практически не агрессивным процессом в отношении испытуемых конструкционных материалов (кроме незначительной коррозии для малоуглеродистой стали Ст.-5). Однако резина и паронит все же вызывают мизерное потемнение. Одним словом, при упаривании возможно применение и эмалированной аппаратуры и нержавеющей, а в качестве прокладочного материала все же следует применять фторопласт-4.

На основании лабораторных данных процесса получения ~ 40 %-ной полиакриловой кислоты (ПАК) и результатов проведенных испытаний конструкционных материалов, намечаемых к применению при дальнейшем аппаратном оформлении промышленной технологии, была

предварительно смонтирована, а в дальнейшем модернизирована, пилотная установка производительностью ~ 15 кг ~ 40 %-ной гелеобразной полиакриловой кислоты за рабочую смену, то есть на одну загрузочную операцию. Это, в принципе, соответствовало годовой производительности при 3-х сменной работе:

$$15 \cdot 3 \cdot 300 = 13,500 \text{ кг/год,}$$

где 300 – принятое количество рабочих дней в году.

Отработка технологии на данной пилотной установке практически в основном подтвердила результаты лабораторных исследований, которые, конечно, были уточнены, скорректированы и, таким образом, детально уточненные технологические параметры были учтены при создании и

монтаже промышленной установки, которая после проведения пуско-наладочных работ и опытного пробега начала регулярный выпуск продукции.

В настоящее время производство ~ 40 %-ного препарата полиакриловой кислоты (ПАК) осуществляется по одноаппаратной схеме, то есть и процесс собственно полимеризации и процесс концентрирования упариванием ~ 20 %-ного раствора полиакриловой кислоты протекают в одном аппарате, который представляет собой 250-ти литровый нержавеющей реактор, снабженный 4-х лопастной мешалкой (с регулируемым числом оборотов); обратным водяным кожухотрубчатый холодильник-конденсатором; водяной рубашкой, предназначенной как для нагревания при помощи вмонтированных в рубашку теплоэлектронагревателей (ТЭНов) суммарной мощностью 8 кВт, так и для охлаждения путем подачи в рубашку охлаждающей водопроводной воды; на крышке реактора предусмотрены смотровые окна для оперативного наблюдения за режимом протекания процесса (вспенивание, цветность, окончание индукционного периода и начало полимеризации, возможное образование сгустка полимера на кромке подводящего патрубка приливной исходной полимеризационной смеси и другое). Промышленный процесс производства ~ 40 %-ной препарата полиакриловой кислоты состоит из 3-х стадий:

1. Приготовление исходной полимеризационной смеси.

В гомогенизатор, снабженный Z-образной мешалкой, заливается 32,5 кг акриловой кислоты, предварительно перегнанной под вакуумом с гидрохиноном, который предотвращает спонтанную самопроизвольную полимеризацию акриловой кислоты при ее перегонке.

Перегнанная акриловая кислота уже не содержит стабилизаторов, препятствующих началу полимеризации и увеличивающих продолжительность индукционного периода. Стабилизаторы (хиноны) вводят при производстве акриловой кислоты для того, чтобы обезопасить как условия хранения кислоты, так и обеспечить стабильность ее качества, предотвратив, таким образом, самопроизвольную медленно протекающую полимеризацию в отсутствие стабилизаторов.

При включенной мешалке в гомогенизатор подается 1,5 кг малеинового ангидрида (сополимеризатор). В течение ~ 30 минут происходит полное растворение твердых линзочек малеинового ангидрида, а вводить в полученный раствор 0,6 кг инициатора α, α' -азоизобутиронитрила заблаговременно не следует, так как он вводится за

15–20 минут перед началом процесса полимеризации, то есть тогда, когда температура воды в реакторе-полимеризаторе достигнет 93–95 °С.

2. Проведение процесса полимеризации.

В реактор-полимеризатор заливается 120 л мембранной обессоленной воды; рубашка реактора полностью заполняется также мембранной водой и только тогда включаются для обогрева ТЭНы. Включается мешалка с установкой 100 об/мин. При достижении температуры воды в реакторе 93–95 °С следует снизить нагрев ТЭНов и подать в гомогенизатор 0,6 кг α, α' -азоизобутиронитрила при включенном перемешивании. И как только инициатор весь растворится, только тогда прилить к образовавшейся прозрачной полимеризационной смеси 5 л мембранной воды при продолжающемся перемешивании. Добавление воды необходимо для предотвращения в дальнейшем при подаче полимеризационной смеси ее самопроизвольной полимеризации на нижней сливной кромке оконечности подающей трубки, расположенной внутри реактора в верхней его части, которая может нагреться за счет горячих паров воды ввиду экзотермического тепловыделения при процессе полимеризации, протекающем при температуре 98 °С. И если вдруг на выходе из трубки успеют зародиться радикалы, то в отсутствие отвода экзотермического тепловыделения, будет стремительно ускоряться цепной процесс полимеризации, приводящий за какие-то доли секунды к образованию твердой полиакриловой кислоты, в виде «пробки», что чревато аварийной ситуацией. А добавление 5 л воды в полимеризационную смесь повышает ее теплоемкость, увеличивая пластичность и текучесть смеси даже при возможном начальном зарождении «пробки», например, образующейся при значительном снижении скорости подачи полимеризационной смеси на полимеризацию. При температуре мембранной воды в реакторе-полимеризаторе в интервале 93–95 °С начинается подача при помощи дозирующего перестальтического насоса приготовленной полимеризационной смеси из гомогенизатора в реактор со скоростью порядка 126 см³/мин, при увеличении при этом числа оборотов мешалки со 100 до 200 об/мин и при регулировании ТЭНами температуры процесса в пределах 93–95 °С.

По окончании индукционного периода, протекающего в течение ~ 15 минут, начинается цепной радикальный экзотермический процесс и температура реакционной массы постепенно начинает повышаться. Поэтому обогрев ТЭНами отключается вовсе, и с целью поддержания температуры процесса полимеризации на уровне 94–97 °С в рубашку реактора для снятия экзотермии

тепловыделения начинают осторожно и постепенно подавать на охлаждение водопроводную воду, так как интенсивная в начале ее подача может резко снизить температуру и заморозить протекание цепной реакции полимеризации, что может привести к браку получаемого полимера.

По окончании подачи полимеризационной смеси (обычно это занимает порядка 4-х часов) в гомогенизатор заливается ~ 5 л мембранной воды для вытеснения из подводящих патрубков остатков полимеризационной смеси в реактор для полного завершения процесса. После этого прекращается подача охлаждающей воды в рубашку реактора и включаются ТЭНы с целью повышения температуры полимерной массы до 96–98 °С и производится при этой температуре ~ 35-ти минутная выдержка для окончательного завершения процесса полимеризации и получения при этом промежуточного продукта ~ 20 %-ного раствора ПАК.

3. Концентрирование путем вакуумного упаривания ~ 20 %-ного раствора полиакриловой кислоты с целью получения ~ 40 %-ного гелеобразного препарата.

Обратный холодильник на реакторе-полимеризаторе перемонтируется на прямой и собирается система: реактор – емкость (приемник) для отогнанного конденсата – вакуумный водокольцевой насос, который включается и при достижении остаточного давления в системе порядка 0,08 мПа (0,8 атм), начинается интенсивная отгонка воды и температура полимерного раствора при этом снижается. Поэтому включается на полную мощность ТЭНы и для лучшего диспергирования, тепло- и массообмена увеличивают число оборотов мешалки с 200 до 400 об/мин. При этом достигается увлечение с парами воды остатков непрореагировавшего исходного мономера – акриловой кислоты. Процесс упаривания заканчивается в течение ~ 2-х часов при температуре в конце упаривания ~ 0,65 °С и остаточном давлении при этом ~ 0,015 мПа (0,15 атм). В результате достигается отгонка ~ 85 л выпаренной воды и в кубе концентрация ПАК повышается до ~ 40 %.

Выводы.

1. Поликарбоксилатные стоматологические пломбировочные цементы, приготовленные на основе ПАК, производимой согласно разработанной технологии, были одобрены клиницистами при практическом применении данных цементов.

2. При этом показатели данных цементов удовлетворяли требованиям международного стандарта ИСО №4104 и составляли:

- прочность на растяжение – 62 МН/м²;
- прочность на сжатие – 61 МН/м²;
- адгезионная прочность – 8 МН/м²;

- время затвердевания t_m – 7 минут;
- водопоглощение – 0,07 мас. %.

3. Разработанная отечественная технология производства светлой, при отсутствии запахов, ~ 40 %-ной водной гелеобразной полиакриловой кислоты запатентована в РФ [15], внедрена на Опытном-экспериментальном заводе (ОЭЗ) «ВладМиВа» (г. Белгород) и препараты на основе ПАК, такие как «Цемилайт», «Цемилайн», «Цемион-ART» и другие, широко применяются не только в России, но даже экспортируются более чем в 40 стран ближнего и дальнего зарубежья.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коршак В.В. Химия высокомолекулярных соединений. М.: Изд-во АН СССР, 1950. 596 с.
2. Стрелихеев А.А., Деревницкая В.А. Основы химии высокомолекулярных соединений. М.: Изд-во Химия, 1976. 440 с.
3. Herman F. Mark, Norman G. Gaylord, Norbert M. Bikales Encyclopedia of Polymer Science and Technology. V.1-16. N.Y., 1964. P. 72.
4. Шур А.М. Высокомолекулярные соединения. М.: Изд-во Высш. шк., 1981. 656 с.
5. Changer M., Koul V., Krishna B., Diuda A.K., Choudhary V. Studies on biodegradation and release of gentamicin sulphate from interpenetrating network hydrogels based on poly(acrylic acid) and gelatin: in vitro and in vivo // Biomaterials. 2004. Vol.25 (I). Pp.139-146. DOI: 10.1016/s0142-9612(03)00466-6
6. Khanlari S., Dube M.A. Bioadhesives: A Review // Macromolecular Reaction Engineering. 2013. Vol.7 (11). Pp. 573–587. <https://doi.org/10.1002/mren.201300114>
7. Dai Y., Zhang C., Cheng Z., Ma P., Li.C., Kang X., Yang D., Lin. J. pH-responsive drug delivery system based on luminescent CaF₂:Ce³⁺/Tb³⁺-poly(acrylic acid) hybrid microspheres// Biomaterials. 2012. Vol.33 (8). P.2583-2592. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2011.12.014
8. Herth G., Schornick G., Buchholz E.L. Polyacrylamides and Poly (Acrylic Acids) // Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, American Chemical Society:Atlanta, GA, USA. 2015. Pp.1-16. DOI:10.1002/14356007.A21_143.PUB2
9. Гернер М.М., Аронов Е.А., Рофе А.Э. Материаловедение по стоматологии. М.: Медгиз, 1962. 256 с.
10. Лукьяненко В.И., Макаров К.А., Шнейгард М.З., Алексеева А.С. Композиционные пломбировочные материалы. Л: Медицина, 1988. 157 с.
11. Пат. 2266918, Российская Федерация, МПК C08F 120/06. Способ получения полиакри-

ловой кислоты / В.А. Перистый; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Белгородский государственный университет; заявл. 2004.06.30; опубл. 2005.12.27, Бюл. № 36. 6с.

12. Авт.свид. 833.991, СССР, СО8F120/06. Способ получения высокомолекулярной полиакриловой кислоты / А.Ф. Николаев; заявитель Ленинградский ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени технологический институт им. Ленсовета; заявл. 1979.07.20; опубл. 1981.05.30, Бюл. №20. 2 с.

13. Пат. 2.024.550, Российская Федерация, МПК СО8F 120/06. Полиакриловая кислота в качестве высокомолекулярного полимерного фло-

кулянта / В.А. Молотков; заявитель и патентообладатель Институт высокомолекулярных соединений РАН; заявл. 1991.01.22; опубл. 1994.12.15. 7с.

14. Пат.1.557.982, Российская Федерация, А1 СО8F 120/06. Способ получения водных растворов полиакриловой кислоты / Е.М. Лукина; заявл. 1987.12.11; опубл. 1995.07.25. 6 с.

15. Пат. 2.751.515, Российская Федерация, МПК СО8F-120106. Способ получения 40%-ного водного раствора полиакриловой кислоты для стоматологии / В.А. Перистый; заявитель и патентообладатель ООО "Химико-фармацевтические технологии"; заявл. 2020.11.25; опубл. 2021.07.14, Бюл. №20. 8 с.

Информация об авторах

Перистый Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры общей химии. E-mail: peristy@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85.

Чуев Владимир Петрович, доктор технических наук, генеральный директор. E-mail: chuev@vladmiva.ru. Акционерное общество «Опытно-экспериментальный завод «ВладМиВа». Россия, 308023, г. Белгород, ул. Студенческая, д.52.

Бузов Андрей Анатольевич, технический директор, кандидат технических наук. E-mail: buzov@vladmiva.ru. Акционерное общество «Опытно-экспериментальный завод «ВладМиВа». Россия, 308023, г. Белгород, ул. Студенческая, д.52.

Перистая Лидия Федотовна, доцент кафедры общей химии. E-mail: Peristaya@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85.

Поступила в 13.12.2021 г.

© Перистый В.А., Чуев В.П., Бузов А.А., Перистая Л.Ф., 2022

^{1,*}Peristy V.A., ²Chuev V.P., ²Buzov A.A., ¹Peristaya L.F.

¹Belgorod State National Research University

²«VladMiVa Experimental Plant» JSC

*E-mail: peristy@bsu.edu.ru

DEVELOPMENT OF THE RUSSIAN PRODUCTION TECHNOLOGY OF HIGH CLEAR- ANCE GEL-LIKE AQUATIC POLYACRYLIC ACID (PAA)

Abstract. Guided by theoretical ideas about the laws of radical chain polymerization processes, work was carried out to study the influence of the parameters and conditions of aquatic polymerization of acrylic acid on the suitability of its polymer for therapeutic dentistry. These studies served as the basis for the development and patenting of the domestic technology for the production of a ~ 40 % aquatic gel-like solution of PAA, which is widely used both in Russia and abroad for the production of dental filling composites, and thus successfully solved the issue of import substitution and avoided various manipulation sanctions.

The patented domestic technology for the production of a 40 % gel-like preparation of polyacrylic acid consists of 3 stages.

1. Dissolving 1.5 kg of maleic anhydride and 0.6 kg of initiator α,α' -azoisobutyronitrile in 32.5 kg of freshly distilled acrylic acid.

2. Tide polymerization of the prepared mixture in 120 liters of solvent water at a temperature of 93–98 °C for 4.5–5 hours.

3. Concentration of the resulting ~20 % PAA solution under vacuum (residual pressure 0.8–0.015 MPa), at a temperature 65–90 °C to obtain a standard 40 % commercial preparation of polyacrylic acid.

Keywords: *polyacrylic acid, polymerization initiation, polymerization regulator, polymerization condition, polycarboxylate and filling cements, therapeutic dentistry.*

REFERENCES

1. Korshak V.V. Chemistry of macromolecular compounds [Chimiya visokomolekulyarnih soedinenii]. SA USSR, 1950. 596 p. (rus).
2. Strepichev A.A., Derevitskaya V.A. The basics of chemistry of macromolecular compound [Osnovi khimii visokomolekulyarnih soedinenii]. Chemistry, 1976. 440 p. (rus).
3. Herman F. Mark, Norman G. Gaylord, Norbert M. Bikales Encyclopedia of polymer science and technology. V.1-16. N.Y., 1964. 72 p.
4. Shur A.M. Macromolecular compounds [Visokomolekulyarnie soedineniya]. Grad. school., 1981. 656 p. (rus)
5. Changer.M., Koul.V., Krishna B., Diuda.A.K., Choudhary.V. Studies on biodegradation and release of gentamicin sulphate from interpenetrating network hydrogels based on poly(acrylic acid) and gelatin: in vitro and in vivo. Biomaterials. 2004. Vol. 25 (I). Pp. 139–146. doi: 10.1016/s0142-9612(03)00466-6
6. Khanlari S., Dube M.A. Bioadhesives: A Review. Macromolecular Reaction Engineering. 2013. Vol.7 (11). Pp. 573–587. doi:10.1002/mren.201300114
7. Dai Y., Zhang C., Cheng Z., Ma P., Li C., Kang X., Yang D., Lin J. pH-responsive drug delivery system based on luminescent $\text{CaF}_2\text{:Ce}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ -poly(acrylic acid) hybrid microspheres. Biomaterials. 2012. Vol.33 (8). Pp. 2583–2592. doi: 10.1016/j.biomaterials.2011.12.014
8. Herth G., Schornick G., Buchholz E.L. Polyacrylamides and Poly (Acrylic Acids). Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, American Cancez Society:Atlanta, GA, USA. 2015. Pp. 1–16. doi: 10.1002/14356007.A21_143.PUB2
9. Gerner M.M., Aronov E.A., Rofo A.E. Materials science in dentistry [Materialovedenie po stomatologii]. Medgiz, 1962. 256 p. (rus).
10. Lukyanenko V.I., Makarov K.A., Shneygard M.Z., Alekseeva A.S. Composite filling materials [Kompozicionnie plombirovochnie materialy]. Medicine, 1988. 157 p (rus).
11. Peristy V.A. Method of production of polyacrylic acid. Patent RF, no. 2266918, 2005.
12. Nikolaev A.F. Method of production of macromolecular polyacrylic acid. Certificate of authorship USSR, no. 833.991, 1979.
13. Molotkov V.A. Polyacrylic acid as macromolecular polymer flocculant. Patent RF, no. 2.024.550, 1994.
14. Lukina E.M. Method of production of aquatic solutions of polyacrylic. Patent RF, no. 1.557.982, 1995.
15. Peristy V.A. Method of production of 40 % aquatic solution of polyacrylic acid for dentistry. Patent RF, no. 2.751.515, 2021.

Information about the authors

Peristy, Vladimir A. Candidate of technical science, docent of general chemistry faculty. E-mail: peristy@bsu.edu.ru. Belgorod State National Research University. Russia, 308015, Belgorod, Pobeda st., 85.

Chuev, Vladimir P. Doctor of technical science, CEO. E-mail: chuev@vladmiva.ru. JSC «Experimental factory «VladMiVa». Russia, 308023, Belgorod, Studencheskaja st., 52.

Buzov, Andrey A. Technical director, candidate of technical science. E-mail: buzov@vladmiva.ru. JSC «Experimental factory «VladMiVa». Russia, 308023, Belgorod, Studencheskaja st., 52.

Peristaya, Lidiya F. Docent of general chemistry faculty. E-mail: Peristaya@bsu.edu.ru. Belgorod State National Research University. Russia, 308015, Belgorod, Pobeda st., 85.

Received 13.12.2021

Для цитирования:

Перистый В.А., Чуев В.П., Бузов А.А., Перистая Л.Ф. Разработка отечественной технологии производства высокочистой гелеобразной водной полиакриловой кислоты (ПАК) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 92–100. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-92-100

For citation:

Peristy V.A., Chuev V.P., Buzov A.A., Peristaya L.F. Development of the russian production technology of high clearance gel-like aquatic polyacrylic acid (PAA). Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 4. Pp. 92–100. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-92-100

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-101-115

*Хуртасенко А.В., Чуев К.В., *Волошкин А.А., Чередников И.И., Гаврилов Д.В.**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: rl_bgtu@intbel.ru*

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РОБОТОМОБИЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ И РЕАЛИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ

Аннотация. В статье рассмотрены и проанализированы различные варианты конструктивного исполнения роботизированных платформ подвижности (РПП), которые могут быть использованы в составе законченных испытательных стендов и симуляторов для обучения операторов специальной техники. На основе параметризованной имитационной модели (MSC Adams) проведены исследования на предмет оптимального расположения точек крепления шарнирных соединений в верхней подвижной платформе. При этом в качестве критерия оптимизации выбрана минимизация силовых параметров в реакциях соответствующих опор. При исследовании отрабатывались несколько возможных траектории движения, исследованы различные варианты относительного положения шарниров основания и верхней подвижной платформы РПП, выполнено определение возможностей применения конкретного типоразмера платформы в соответствии с граничными значениями параметров её приводных звеньев для отработки условленных геометрических параметрах траектории. Входными параметрами для тестирования системы управления установлены законы движения приводных звеньев, электроцилиндров. Для рассматриваемых траекторий выполнено исследование и анализ силовых параметров, возникающих в шарнирных опорах при разных базовых диаметрах расположения шарниров основания и верхней подвижной платформы. В качестве исходной оптимальной конфигурации принят вариант с классическим расположением шарниров. Моделирование и поиск наиболее оптимальных вариантов исполнений выполнено на основе разработанной имитационных цифровых модели РПП в системе MSC Adams. Представлены результаты математического и имитационного моделирования.

Ключевые слова: платформа, роботизация, траектория, конфигурация, гексапод, тренажер, моделирование, цифровизация, проектирование.

Введение. В современных отраслях производства: строительстве, машиностроении, авиации все чаще рассматривается применение механизмов, использующих параллельную кинематику [1–5]. В первую очередь это роботы с кинематическими цепями по параллельной схеме. Такие механизмы могут иметь ряд преимуществ: высокие скорость и ускорения, жесткость, полезная нагрузка [6–8].

Подобные механизмы находят широкое применение для решения важных практических задач:

- в качестве испытательной платформы для высокотехнологичного оборудования и компонентов;

- в качестве подвижного основания в тренажерах (симуляторах) обучения управления дорожно-строительной техникой; автомобили, самолёты, корабли, специализированная и военная техника.

- в качестве специализированных платформ удержания положения при движении, для оптических, лазерных, радиолокационных, медицинских, боевых и прочих систем.

Важными и актуальными вопросами являются исследования, связанные с кинематическим

анализом роботизированных платформ подвижности (РПП), которые рассмотрены в работах [9–11].

Цели и задачи исследования. Для обеспечения требуемых траекторий перемещения выходного звена (исполнительного устройства или перемещаемого объекта) необходимо протестировать систему управления РПП, проанализировать возможные конструктивные исполнения. Ещё одной задачей является определение законов управления перемещениями в приводных звеньях (в нашем случае ЭЦ) в соответствии с заданной траекторией перемещения конечного звена (обратная задача кинематики). Анализ вариантов конструктивных исполнений РПП целесообразно проводить по приведенным ниже направлениям с учетом требований топологии общего вида и геометрических размеров:

- наиболее эффективное расположение точек крепления шарнирных опор на верхней подвижной платформе и основании;

- наиболее эффективное относительное (взаимное) расположение шарниров верхней подвижной платформы и шарниров основания.

Таблица 2

Исследуемые характеристики РПП

Наименование	Обозначение	Значение
Условный диаметр расположения опор основания (мм)	D_d	1800
Условный диаметр расположения опор подвижной платформы (мм)	D_u	1800
Высота платформы (мм)	H	1200
Расстояние между шарнирами, на которых закреплены ЭЦ на основании (мм)	L_d	100
Расстояние между шарнирами, на которых закреплены ЭЦ на подвижной платформе (по вариантам исполнений) (мм)	L_u1	900
	L_u2	450
	L_u3	100

Для идентификации динамических параметров полученных в ходе исследований с помощью

имитационного моделирования введены номерные обозначения шарниров платформы, представленные на рисунке 2.

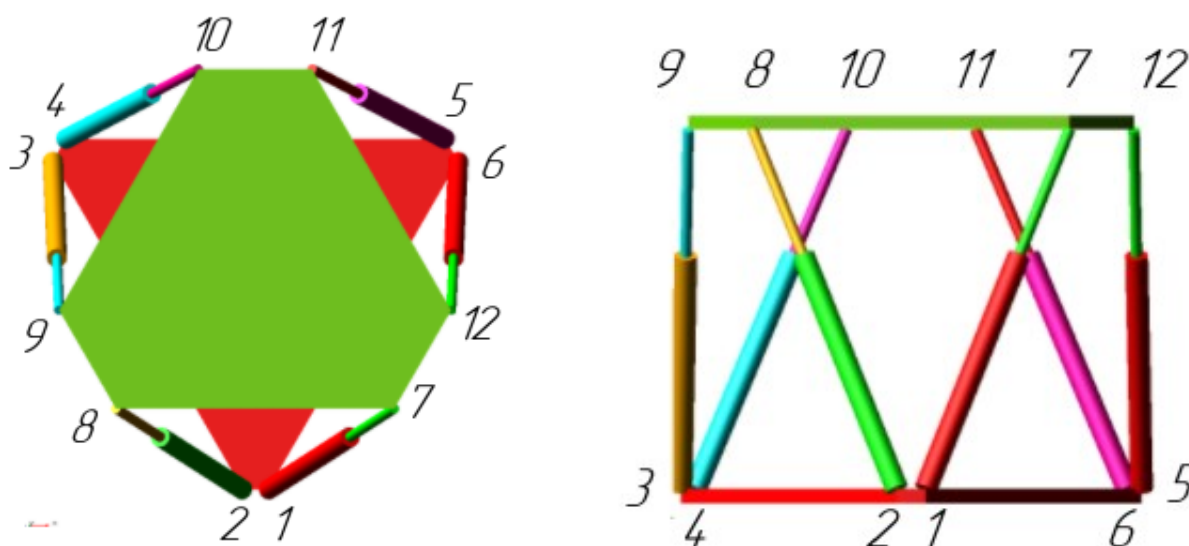


Рис. 2. Принятые обозначения шарниров в структурной схеме РПП:
1,2,3,4,5 и 6 – номера шарниров основания; 7,8,9,10,11, и 12 – номера шарниров верхней подвижной платформы

Предварительные исследования проведены на основе численного моделирования с использованием динамической имитационной модели РПП выполненной в системе MSC Adams.

Полученные результаты силовых характеристик при отработке принятых к исследованию траекторий для всех трех вариантов конструктивных исполнений приведены в таблицах 4 и 5. Графики показывают изменения силовых реакций в шарнирах в течении времени выполнения траектории [20]. Обозначения графиков H2i1, H2i2, H2i3 – соответствуют трем рассмотренным

вариантам конструктивных исполнений верхней подвижной платформы. Кривые FM_M1, FM_M2, FM_M3, FM_M4, FM_M5 и FM_M6 (таблица 4) показывают изменения величины силовых реакций в шарнирах, обозначенных на рис. 1 номерами 1,2,3,4,5 и 6 – соответственно. Кривые FM_M7, FM_M8, FM_M9, FM_M10, FM_M11 и FM_M12 (таблица 5) показывают изменения величины силовых реакций в шарнирах, обозначенных на рисунке 2 номерами 7,8,9,10,11 и 12 – соответственно

Таблица 3

Виды движений в траектории верхней платформы

Обозначение вида движения	Графическая интерпретация	
T0		
T1		
T2		
T3		
T4		
T5		

Таблица 4

Изменения величин силовых реакций в точках крепления шарниров ЭЦ к основанию при 3х конструкциях РПП

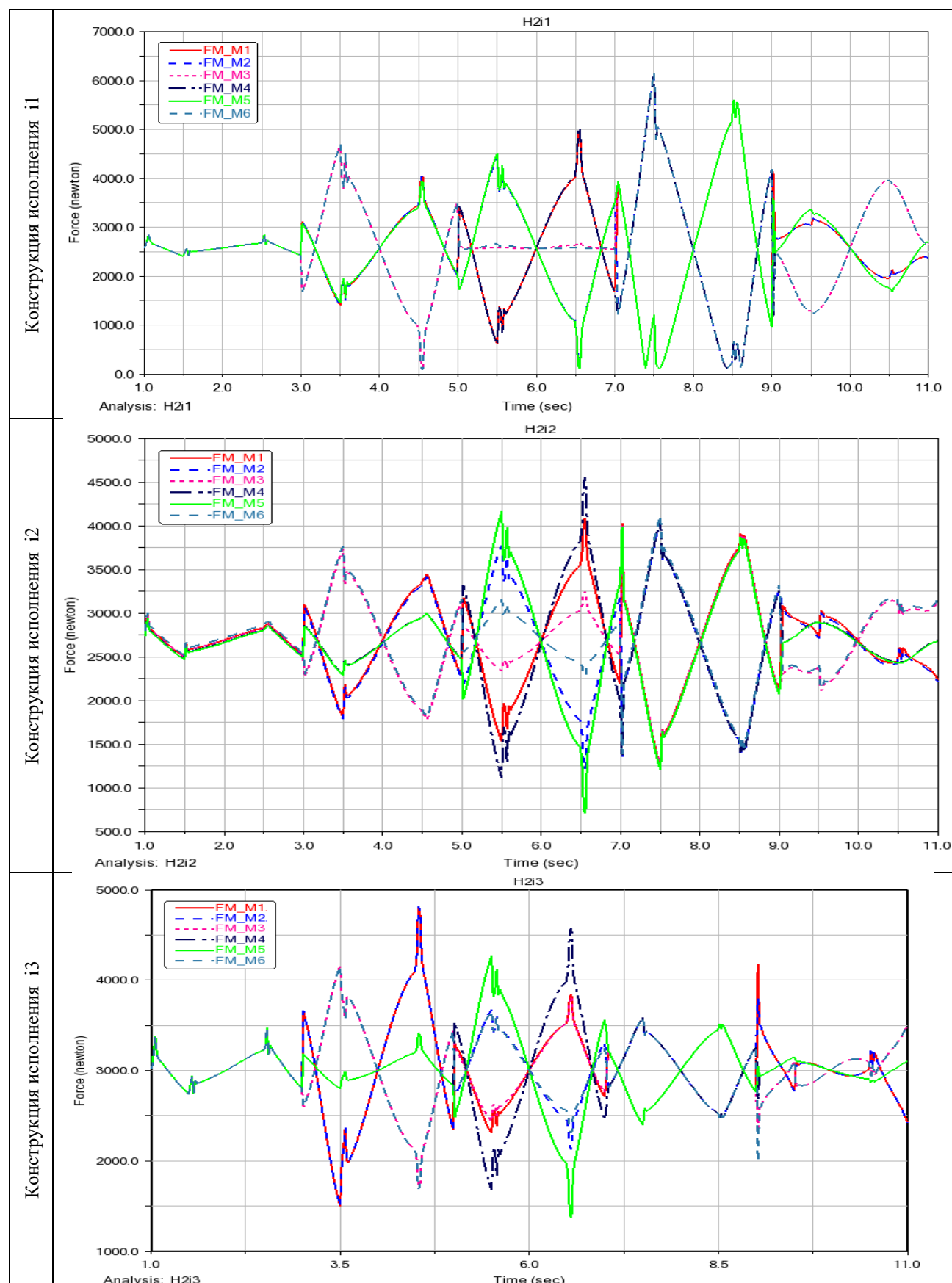


Таблица 5

Реакции в точках крепления шарниров ЭЦ к подвижной платформе при 3х конструкциях РПП

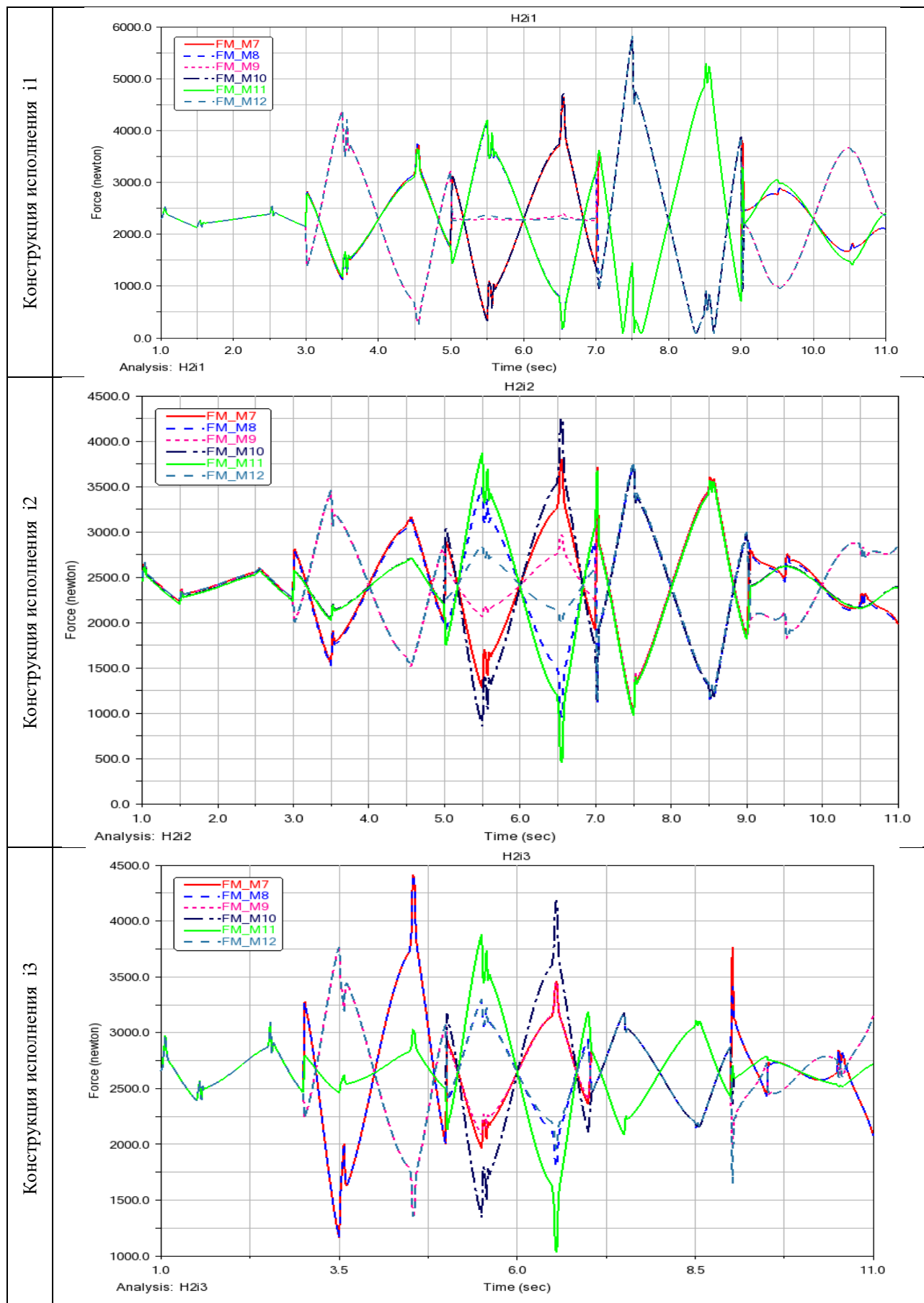


Таблица 6

Пиковые значения суммы сил в шарнирах, Н

Конструктивное исполнение	Обозначение шарнира					
	Нижнее основание					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
i1	5609	6142	5609	6142	5609	6142
i2	4087	4048	3998	4550	4160	4116
i3	4813	4813	4153	4575	4268	4153
	Верхняя подвижная платформа					
	M7	M8	M9	M10	M11	M12
i1	5297	5826	5297	5826	5297	5826
i2	3799	3743	3693	4261	3875	3779
i3	4418	4418	3770	4185	3884	3770

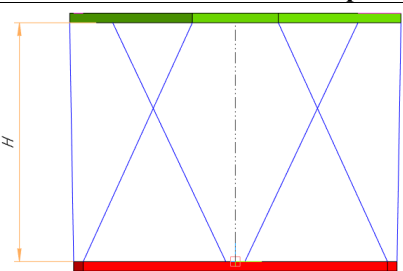
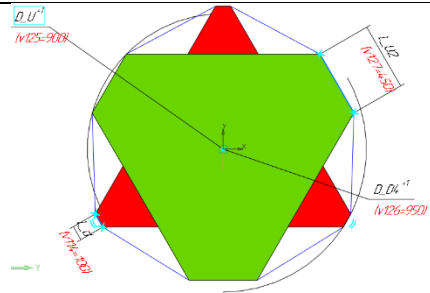
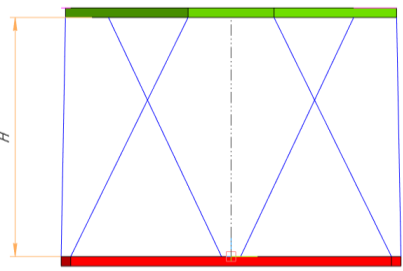
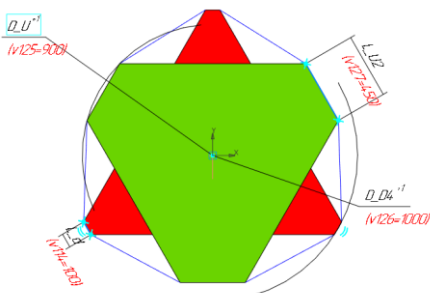
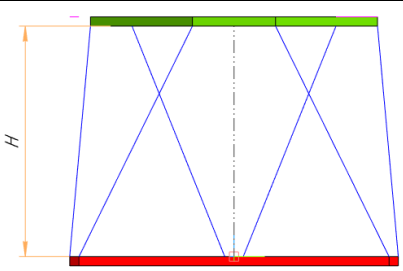
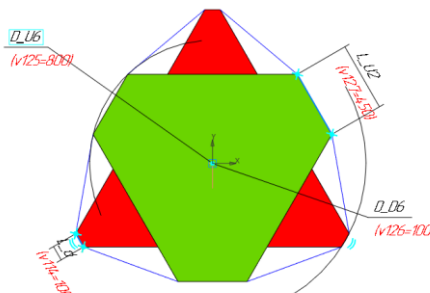
На основе параметризованной имитационной модели (MSC Adams) проведены исследования на предмет оптимального расположения точек крепления шарнирных соединений на подвижной платформе [15–20].

Исследования вариантов относительного положения шарниров основания и верхней подвижной платформы РПП.

Рассмотрим дополнительно 3 исполнения конструкции РПП, конструктивные исполнения и характеристики каждого из вариантов для исследования по второму направлению представлены таблицами 7 и 8.

Таблица 7

Конструктивные исполнения по взаимному расположению верхних и нижних опор РПП

Об-е	Варианты конструктивных исполнений	
H2i4		
H2i5		
H2i6		

В таблице 8 приведен параметры элементов конструкции РПП которые использовались при нахождении наиболее оптимальных вариантов

исполнений. Имитационно моделирование цифровой модели выполнялось в программной среде MSC Adams.

Таблица 8

Характеристики исполнений РПП

Схема конструкция РПП	Наименование	Обозначение	Значение
	Диаметр основания по вариантам исполнений (мм)	D_d4	1900
		D_d5	2000
		D_d6	2000
	Диаметр подвижной платформы (мм)	D_u4, D_u5	1800
		D_u6	1600
	Высота подвижной платформы в среднем положении (мм)	H	1200
	Расстояние между шарнирами, на которых закреплены ЭЦ на основании (мм)	L_d	100
	Расстояние между шарнирами, на которых закреплены ЭЦ на подвижной платформе (мм)	L_u2	450

Полученные результаты силовых характеристик при обработке траекторий для принятых к исследованию конструктивных исполнений приведены в таблицах 9 и 10.

Графики показывают изменения силовых реакций в шарнирах в течении времени. Обозначения графиков Н2i4, Н2i5, Н2i6 соответствуют рассмотренным вариантам конструктивных исполнений для различных диаметральных положений шарнирных опор верхней подвижной платформы и основания. Кривые FM_M1, FM_M2, FM_M3, FM_M4, FM_M5 и FM_M6 (таблица 9) показывают изменения величины силовых реакций в шарнирах, обозначенных на рисунке 1.1 номерами 1,2,3,4,5 и 6 – соответственно. Кривые FM_M7, FM_M8, FM_M9, FM_M10, FM_M11 и FM_M12 (таблица 10) показывают изменения величины силовых реакций в

шарнирах, обозначенных на рисунке 1.1 номерами 7,8,9,10,11 и 12 – соответственно.

При моделировании выполнялся анализ величин перемещений в ЭЦ требуемых для реализации размерных параметров обрабатываемых траекторий. Интерпретация данных о перемещениях в ЭЦ для исполнения Н2i4 представлена графиками на рисунке 3. Обозначения MM17, MM28, MM39, MM40, MM51, MM52 соответствуют отдельным ЭЦ соединяющим опорные точки на верхней подвижной платформе и основании. Анализ графиков показывает, что величины перемещений в штоках ЭЦ соответствуют заданным пределам и адекватно согласуются при обработке всех участков заданной в исследованиях траектории. Графики перемещений для исполнений Н2i5, Н2i6 имеют такой же характер.

Таблица 9

**Изменения силовых реакций в точках крепления шарниров ЭЦ к основанию
для рассматриваемых исполнений конструкций РПП**

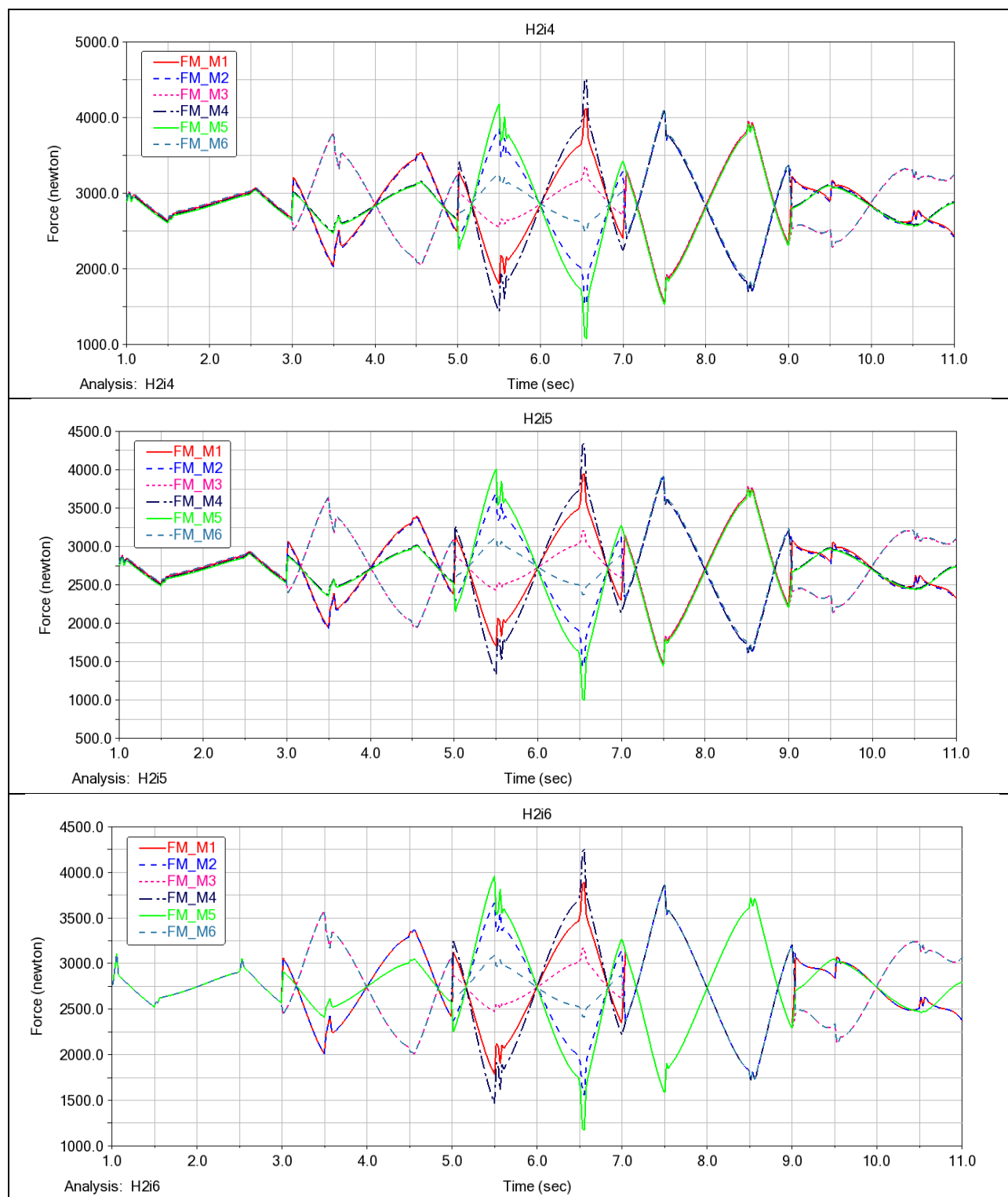
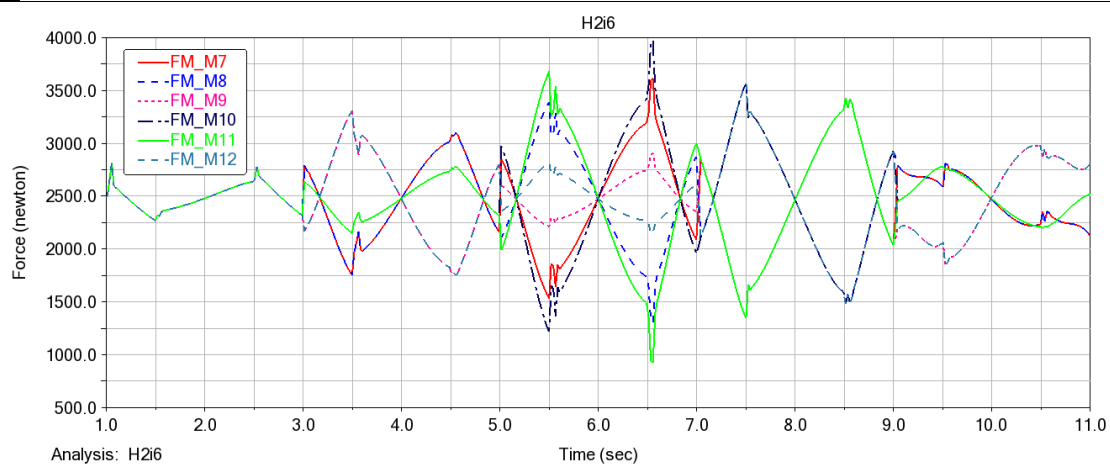
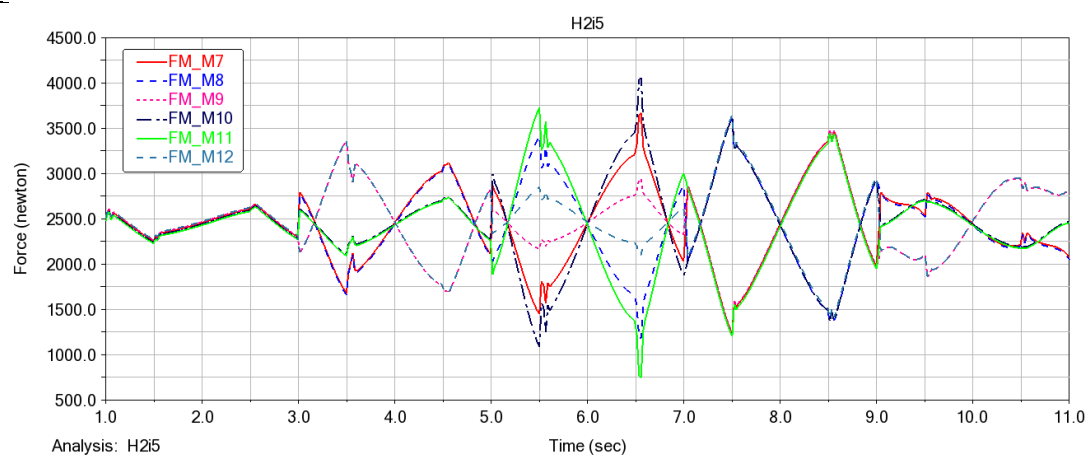
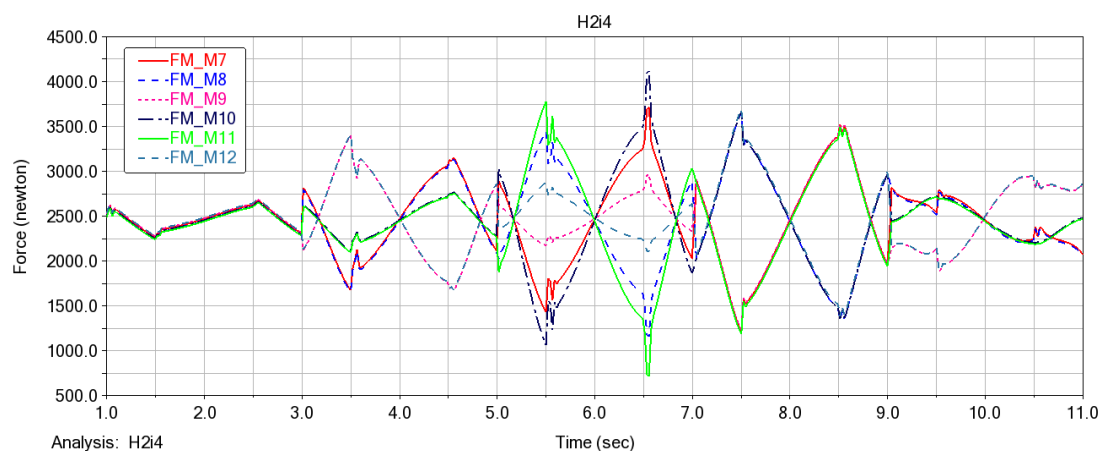


Таблица 10

Изменения силовых реакций в точках крепления шарниров ЭЦ к подвижной платформе для рассматриваемых исполнений конструкций РПП

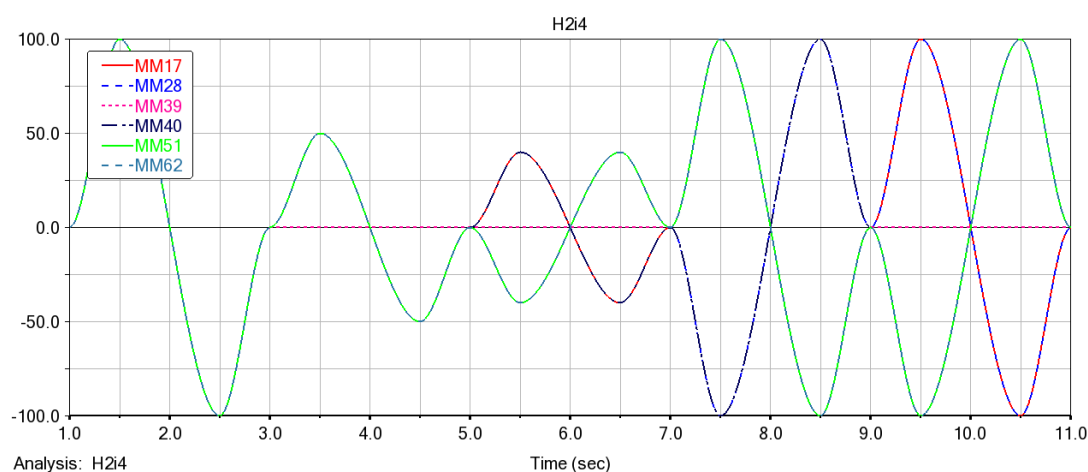


Рис. 3. Величины перемещений штоков ЭЦ для исполнения H2i5 конструкций РПП.

Таким образом, в ходе исследований были рассмотрены все варианты предложенных исполнений, которые обоснованы с точки зрения необ-

ходимых геометрических параметров, кинематических возможностей и динамических характеристик РПП. Варианты рассмотренных конструктивных исполнений приведены в табл. 11.

Таблица 11

Параметры вариантов конструктивных исполнений РПП

Основные параметры конструкции	Обозначение исполнений					
	H2i1	H2i2	H2i3	H2i4	H2i5	H2i6
D _d , мм	1800	1800	1800	1900	2000	2000
D _u , мм	1800	1800	1800	1800	1800	1600
H, мм	1200	1200	1200	1200	1200	1200
L _d , мм	100	100	100	100	100	100
L _u , мм	900	450	100	450	450	450

Обозначения параметров: D_d – диаметр основания; D_u – диаметр подвижной платформы; H – высота подвижной платформы; L_d – расстояние между шарнирами, на которых закреплены ЭЦ на основании; L_u – расстояние между шарнирами, на которых закреплены ЭЦ на подвижной платформе.

Заключение. В результате исследований определена оптимальная конфигурация платформы РПП, когда опоры располагаются регулярно по окружности с округленными значениями шагов между смежными теоретическими точками шарниров равными 450 и 1284 мм. Данным параметрам соответствует 2 вариант исполнения конструкции (исполнение i2). Такая конструкция обеспечивает наименьшие значения силовых реакций во всех шарнирах, как на неподвижной, так и на подвижной платформе (табл. 6). Округления величин шагов до целых значений практически не влияет на силовые характеристики в опорах для рекомендованного варианта конструкции.

Результаты исследования выявили наиболее рациональную конфигурацию платформы. Параметры данной конфигурации: диаметр неподвижной платформы, на которой расположены шарниры равен 2000мм, диаметр подвижной плат-

формы при расположении «спаренных» шарниров на расстояниях 1600 до 1800 составляет 450 мм, что составляет 8–9 % от длины окружности расположения (для расчетов при проектировании конструкций целесообразно использовать соотношение $L/D_u = 1/3,5 \dots 4$, где L – расстояние между опорными точками «спаренных» шарниров, D_u – диаметр окружности расположения опорных точек верхней подвижной платформы).

Наиболее рациональным соотношением между величинами базовых диаметров расположения шарнирных опор на нижнем основании (D_d) и верхней подвижной опоре (D_u) при фиксированной высоте платформы 1200 мм является соотношение, равное 1,25. Для реализации конструкций с различным исполнением шарнирных соединений могут потребоваться уточнения размерных параметров и конструктивных особенностей.

Исходя из того, что на всех участках траекторий, рассмотренных в исследовании наблюдаются перемещения в ЭЦ (работоспособность ЭЦ), т.е. при перемещении центра масс в любую точку рабочего пространства в каждый момент времени все ЭЦ обеспечивают достаточное количество степеней свободы, можно сделать вывод о работоспособности всех рассматриваемых конфигураций.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-11-2021-060 от 24.06.2021 г. «Создание высокотехнологичного производства роботизированных 6DOF платформ подвижности для тренажеров и симуляторов для авиационной и ракетно-космической отрасли» (уникальный номер 000000S407521QLB0002).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kong H., Gosselin C.M. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. Berlin: Springer. 2007. 276 p. doi:10.1007/978-3-540-71990-8
2. Merlet J.-P. Parallel Robots. Berlin: Springer. 2007. 402 p.
3. Rybak L., Khalapyan S., Gaponenko E. Issues of planning trajectory of parallel robots taking into account zones of singularity // IOP Conference Series-Materials Science and Engineering. 2018. No. 327. 042092. doi:10.1088/1757-899X/327/4/042092
4. Чурин В.В. Использование компьютерных тренажеров для подготовки рабочих дорожно-строительных профессий // Молодой ученый. 2011. Т.3. № 4. С. 28–29.
5. Rybak L., Malyshev D., Gaponenko E. Optimization algorithm for approximating the solutions set of nonlinear inequalities systems in the problem of determining the robot workspace // Advances in Optimization and Applications. OPTIMA 2020. Communications in Computer and Information Science, volume 1340, Springer, Cham, 2020, pp. 27–37. doi:10.1007/978-3-030-65739-0_3.
6. Parikh P.J., Lam S.S. Solving the forward kinematics problem in parallel manipulators using an iterative artificial neural network strategy // Int J Adv Manuf Technol. 2009. Vol. 40. Pp. 595–606. doi:10.1007/s00170-007-1360-x
7. Parikh P.J., Lam S.S. A hybrid strategy to solve the forward kinematics problem in parallel manipulators // IEEE Trans Rob. 2005. Vol. 21. Iss. 1. Pp. 18–25. doi:10.1109/TRO.2004.833801
8. He J., Gu H., Wang Z. Solving the forward kinematics problem of six-DOF Stewart platform using multi-task Gaussian process // Journal of Mechanical Engineering Science. 2013. Vol. 227. Iss. 1. Pp. 161–169. doi:10.1177/0954406212444508
9. Liu S., Li W., Du Y. Forward kinematics of the Stewart platform using hybrid immune genetic algorithm // IEEE international conference on mechatronics and automation, (June 25–28, 2006, Luoyang, China). 2006. Pp. 2330–2335. doi:10.1109/ICMA.2006.257695
10. Wang Y.F. A direct numerical solution to forward kinematics of general Stewart-Gough platforms // Robotica. 2007. Vol. 25. Pp. 121–128. doi:10.1017/S0263574706003080
11. Cruz P., Ferreira R., Sequeira S.J. Kinematic modeling of Stewart-Gough platforms // CINCO 2005 - Robotics and automation (September 14–17, 2005, Barcelona, Spain). 2005. Pp. 93–99.
12. Liu X.-J., Wang J., Oh K.-K., Kim J. A New Approach to the Design of a DELTA Robot with a Desired Workspace // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2004. Vol. 39. Iss. 2. Pp. 209–225. doi:10.1023/B:JINT.0000015403.67717.68
13. Rashoyan G.V., Lastochkin A.B., Glazunov V.A. Kinematic Analysis of a Spatial Parallel Structure Mechanism with a Circular Guide // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44. Iss. 7. Pp. 626–632. doi:10.3103/S1052618815070122
14. Белякова А.В., Савельев Б.В. Анализ информационных моделей тренажеров для обучения водителей транспортных средств (обзор) // Вестник СибАДИ. 2019. № 16(5). С. 558–571.
15. Воронин А.В., Шпьякин И.К. Моделирование кинематической модели гексапода в программных комплексах MATLAB SIMULINK и CATIA // X Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и современные информационные технологии» (13–14 ноября, 2012, г. Томск, Россия). 2012. С. 261–263.
16. Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Мороз А.В. Имитационная модель цифровой системы управления гексаподом с линейными приводами на базе шаговых двигателей // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 35–41.
17. Сапунов Е.А., Прошин И.А. Моделирование привода динамического стенда авиационного тренажера // Авиационно-космическое машиностроение. 2011. С. 337–340.
18. Zabalza I., Ros J., Gil J., Pintor J.M., Jimenez J.M. TRI-SCOTT. A New Kinematic Structure for a 6-DOF Decoupled Parallel Manipulator // Proceedings of Workshop on 96 Fundamental Issues and Future Directions for Parallel Mechanics and Manipulators (October 3–4, 2002, Quebec City, Quebec, Canada) 2002. Pp. 12–15.
19. Brinker J., Schmitz M., Takeda Y., Corves B. Dynamic Modeling of Functionally Extended Delta-Like Parallel Robots with Virtual Tree Structures // ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics

and Control. Springer, Cham, 2018. Pp. 171–179. doi:10.1007/978-3-319-78963-7_23

20. Коротков Е.Б., Матвеев С.А., Яковенко Н.Г. Пути повышения качественных показателей системы управления механизмом с параллельной

структурой (гексапод, трипод) на базе российских и мировых доступных электронных компонентов // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 8. С. 85–91.

Информация об авторах

Хуртасенко Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технология машиностроения. E-mail: hurtintbel@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чуев Кирилл Витальевич, зав. лаб. кафедры технология машиностроения. E-mail: kirill.chuev@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Волошкин Артем Александрович, инженер-исследователь, аспирант, кафедры технология машиностроения. E-mail: rl_bqtu@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чередников Игорь Иванович, инженер-исследователь, аспирант, кафедры технология машиностроения. E-mail: rl_bqtu@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Гаврилов Дмитрий Владимирович, инженер-исследователь, аспирант, кафедры технология машиностроения. E-mail: rl_bqtu@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 13.12.2021 г.

© Хуртасенко А.В., Чуев К.В., Волошкин А.А., Чередников И.И., Гаврилов Д.В., 2022

Hurtasenko A.V., Chuev K.V., *Voloshkin A.A., Cherednikov I.I., Gavrilov D.V.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

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

OPTIMIZATION OF DESIGN PARAMETERS OF ROBOTIC PLATFORMS AND IMPLEMENTATION OF THE TRAJECTORY OF MOTION

Abstract. The article discusses and analyzes various options for the design of robotic mobility platforms (RMP), which can be used as part of complete test benches and simulators for training operators of various equipment. Various trajectories of movement of the mobile platform of the RMP are considered. Investigations have been carried out based on a parameterized simulation model (MSC Adams) to determine the optimal location of the attachment points of the joints in the upper movable platform. Minimization of the force parameters in the reactions of the corresponding supports was chosen as an optimization criterion in this case. All the accepted trajectories were worked out during the investigation. Various options of the relative position of the joints of the base and the upper movable platform of the RMP have been investigated. Similarly, for the selected trajectories, an investigation and analysis of the force parameters arising in the joints at different main diameters of the location of the base and upper movable platform joints were carried out. As the initial optimal configuration, a variant with the location of hinged supports was adopted. Modeling and search for the most optimal execution options are carried out based on the developed digital simulation model of the RMP in the MSC Adams system. The results of mathematical and simulation modeling are presented.

Keywords: platform, robotization, trajectory, configuration, hexapod, simulator, modeling, digitalization, design.

REFERENCES

1. Kong H., Gosselin C.M. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. H. Kong, C.M. Gosselin. Berlin: Springer. 2007. 276 p. doi:10.1007/978-3-540-71990-8

2. Merlet J.-P. Parallel Robots, 2nd ed. J.-P. Merlet. Berlin: Springer. 2007. 402 p.

3. Rybak L., Khalapyan S., Gaponenko E. Issues of planning trajectory of parallel robots taking into account zones of singularity. IOP Conference

Series-Materials Science and Engineering. 2018. No. 327: 042092. doi:10.1088/1757-899X/327/4/042092

4. Churin V.V. The use of computer simulators for training workers in road-building professions [Ispol'zovaniye komp'yuternykh trenazherov dlya podgotovki rabochikh dorozhno-stroitel'nykh professiy]. Young Scientist. 2011. Vol. 3. Iss. 4. Pp. 28–29. (rus)

5. Rybak L., Malyshev D., Gaponenko E. Optimization algorithm for approximating the solutions set of nonlinear inequalities systems in the problem of determining the robot workspace. Advances in Optimization and Applications. OPTIMA 2020. Communications in Computer and Information Science, volume 1340, Springer, Cham, 2020. Pp. 27–37. doi:10.1007/978-3-030-65739-0_3.

6. Liu X.-J., Wang J., Oh K.-K., Kim J. A New Approach to the Design of a DELTA Robot with a Desired Workspace. Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2004. Vol. 39. Iss. 2. P. 209–225. doi:10.1007/s00170-007-1360-x

7. Rashoyan G.V., Lastochkin A.B., Glazunov V.A. Kinematic Analysis of a Spatial Parallel Structure Mechanism with a Circular Guide. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44. Iss. 7. P. 626–632. doi:10.1109/TRO.2004.833801

8. Belyakova A.V., Savelyev B.V. Analysis of information models of simulators for training drivers of vehicles (review) [Analiz informatsionnykh modeley trenazherov dlya obucheniya voditeley transportnykh sredstv (obzor)]. Bulletin of SibADI. 2019. No. 16 (5). Pp. 558–571. doi:10.1177/0954406212444508 (rus)

9. Voronin A.V., Shpyakin I.K. Modeling the kinematic model of a hexapod in the MATLAB SIMULINK and CATIA software complexes [Modelirovaniye kinematicheskoy modeli geksapoda v programmnykh kompleksakh MATLAB SIMULINK i CATIA]. X International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Youth and Modern Information Technologies" (November 13–14, 2012, Tomsk, Russia). 2012. Pp. 261–263. doi:10.1109/ICMA.2006.257695 (rus)

10. Zhukov Yu.A., Korotkov E.B., Moroz A.V. A simulation model of a digital control system for a hexapod with linear drives based on stepper motors [Imitatsionnaya model' tsifrovoy sistemy upravleniya geksapodom s lineynymi privodami na baze shagovykh dvigateley]. Radio electronics issues. 2017. No. 7. Pp. 35–41. doi:10.1017/S0263574706003080 (rus)

11. Sapunov E.A., Proshin I.A. Simulation of the drive of the dynamic stand of the aviation simulator [Modelirovaniye privoda dinamicheskogo stenda aviatsionnogo trenazhera]. Aviation-Space Engineering. 2011. Pp. 337–340. (rus)

12. Zabalza I., Ros J., Gil J., Pintor J.M., Jimenez J.M. TRI-SCOTT. A New Kinematic Structure for a 6-DOF Decoupled Parallel Manipulator. Proceedings of Workshop on 96 Fundamental Issues and Future Directions for Parallel Mechanics and Manipulators (October 3–4, 2002, Quebec City, Quebec, Canada) 2002. Pp. 12–15. doi:10.1023/B:JINT.0000015403.67717.68

13. Brinker J., Schmitz M., Takeda Y., Corves B. Dynamic Modeling of Functionally Extended Delta-Like Parallel Robots with Virtual Tree Structures. ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics and Control. Springer, Cham, 2018. Pp. 171–179.

14. Korotkov E.B., Matveev S.A., Yakovenko N.G. Ways to improve the quality indicators of the control system for a mechanism with a parallel structure (hexapod, tripod) based on Russian and world accessible electronic components [Puti povysheniya kachestvennykh pokazateley sistemy upravleniya mekhanizmom s parallel'noy strukturoy (geksapod, tripod) na baze rossiyskikh i mirovykh dostupnykh elektronnykh komponentov]. Questions of radio electronics. 2016. No. 8. Pp. 85–91. (rus)

15. Parikh P.J., Lam S.S. Solving the forward kinematics problem in parallel manipulators using an iterative artificial neural network strategy. Int J Adv Manuf Technol. 2009. Vol. 40. Pp. 595–606.

16. Parikh P.J., Lam S.S. A hybrid strategy to solve the forward kinematics problem in parallel manipulators. IEEE Trans Rob. 2005. Vol. 21. Iss. 1. Pp. 18–25.

17. Liu S., Li W., Du Y. Forward kinematics of the Stewart platform using hybrid immune genetic algorithm. IEEE international conference on mechatronics and automation, (June 25–28, 2006, Luoyang, China). 2006. Pp. 2330–2335.

18. He J., Gu H., Wang Z. Solving the forward kinematics problem of six-DOF Stewart platform using multi-task Gaussian process. Journal of Mechanical Engineering Science. 2013. Vol. 227. Iss. 1. Pp. 161–169.

19. Wang Y.F. A direct numerical solution to forward kinematics of general Stewart-Gough platforms. Robotica. 2007. Vol. 25. Pp. 121–128. doi: 10.1007/978-3-319-78963-7_23

20. Cruz P., Ferreira R., Sequeira S.J. Kinematic modeling of Stewart-Gough platforms. CINCO 2005 - Robotics and automation (September 14–17, 2005, Barcelona, Spain). 2005. Pp. 93–99.

Information about the authors

Khurtasenko, Andrey V. PhD, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology. E-mail: hurtintbel@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukov, 46.

Chuev, Kirill V. Head. lab. Department of Mechanical Engineering Technology. E-mail: kirill.chuev@qmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukov, 46.

Voloshkin, Artem A. Research Engineer, Postgraduate Student, Department of Mechanical Engineering Technology. E-mail: rl_bqtu@intbel.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukov, 46.

Cherednikov, Igor I. Research Engineer, Postgraduate Student, Department of Mechanical Engineering Technology. E-mail: rl_bqtu@intbel.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukov, 46.

Gavrilov, Dmitry V. Research Engineer, Postgraduate Student, Department of Mechanical Engineering Technology. E-mail: rl_bqtu@intbel.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukov, 46.

Received 13.12.2021

Для цитирования:

Хуртасенко А.В., Чуев К.В., Волошкин А.А., Чередников И.И., Гаврилов Д.В. Оптимизация конструктивных параметров роботомобильных платформ и реализация траектории движения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 101–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-101-115

For citation:

Hurtasenko A.V., Chuev K.V., Voloshkin A.A., Cherednikov I.I., Gavrilov D.V. Optimization of design parameters of robotic platforms and implementation of the trajectory of motion. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 4. Pp. 101–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-101-115

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-116-123

Романович А.А., *Духанин С.А., Романович М.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: duhanin777@yandex.ru

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ РОТОРНО-ВИХРЕВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Аннотация. Статья направлена на повышение долговечности рабочих органов роторно-вихревых мельниц, получивших широкое применение в производстве сухих строительных смесей. Приведено описание устройства роторно-вихревой мельницы.

В статье предложен разработанный учеными БГТУ им. В.Г. Шухова новый метод повышения долговечности рабочих органов (бил) мельницы, путем нанесения на их поверхности ячеек с размерами, позволяющими запрессоваться в них частиц измельчаемого материала, и тем самым защитить поверхность от быстрого износа.

В результате аналитического исследования, силового взаимодействия измельчаемого материала с поверхностью ячейки била, получено уравнение для определения геометрических размеров ячейки, позволяющих за счет сил трения удерживать объем частиц запрессованного материала от выпадения из неё.

Установлено, что размеры ячейки взаимосвязаны между собой и определяются таким образом, чтобы результирующая выталкивающая сила была равной или меньше удерживающей (силы трения). Доказано, что запрессовка частиц измельчаемого материала, в прямоугольных ячейках наплавленной сетки на рабочей поверхности бил, во многом определяется геометрическими размерами ячейки, а также зависит от физико-механических характеристик дробимых материалов. Предложена конструкция била, которая позволяет повысить его долговечность, за счет уменьшения площади контакта измельчаемого материала с рабочей поверхностью била.

Ключевые слова: рабочие органы (била), износостойкость, роторно-вихревая мельница, износ, наплавка.

Введение. В странах западного мира, начиная с 1960-х гг., в отрасли строительства нашли широкое применение сухие строительные смеси. В России производство этих смесей начато с 90-х годов.

Среднедушевой расход строительных смесей в Российской Федерации составляет около 2–3 кг за год, тогда как в зарубежных развитых странах, например, в Германии он составляет около 30 кг, в Финляндии, Польше, Франции около 20 кг (рис. 1) [1–4].

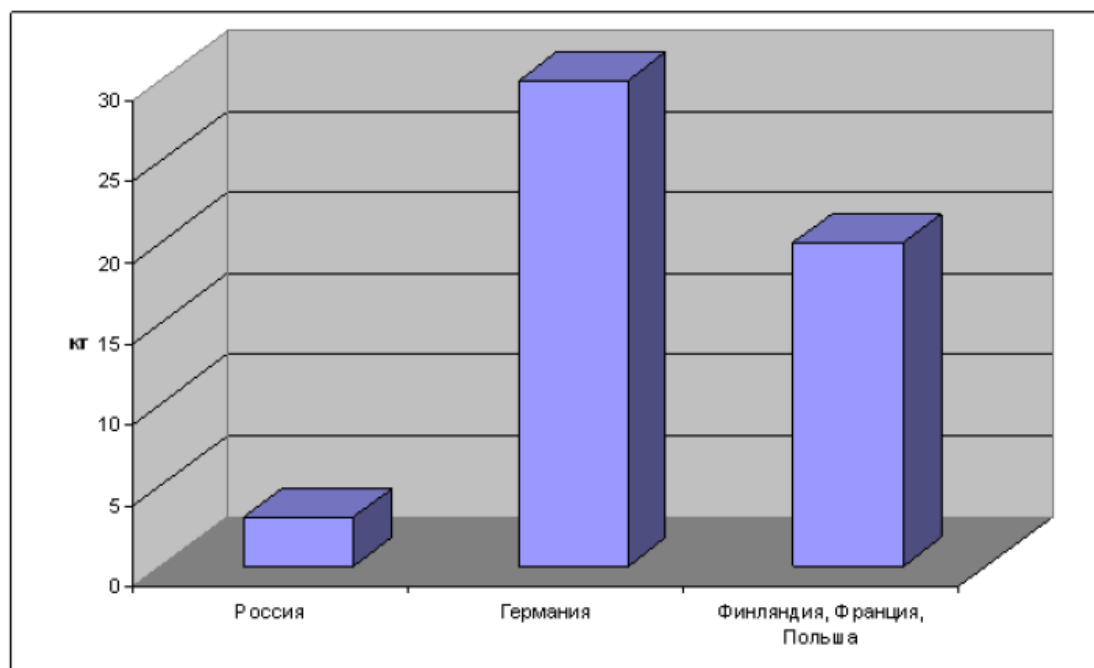


Рис. 1. Среднедушевой расход сухих строительных смесей за год

Главные покупатели сухих строительных смесей компании, которые занимаются строительством и ремонтом. Их доля составляет около 75 % от общего количества продаж смесей. В настоящее время на внутреннем рынке нашей страны прослеживается ежегодное увеличение производства сухих смесей в среднем на 15–20 %.

Поэтому в последние десятилетия большое внимание уделяется учеными и специалистами стройиндустрии вопросам создания новых технологий и повышения эффективности применяемого оборудования. Как показывает практика, их прикладные работы позволяют снизить энергозатраты процесса и повысить надежность агрегатов, в том числе и долговечность их рабочих органов [1–5].

Одними из наиболее распространенных помольных агрегатов, получивших широкое распространение в технологии производства сухих строительных смесей, являются роторно-вихревые мельницы (РВМ). Они предназначены для тонкого измельчения и смешивания готовой продукции с механохимической активацией их частиц.

Представителем этого класса агрегатов является роторно-вихревая мельница РВМ-3000-01, которая имеет следующие технические характеристики: производительность, в зависимости от перерабатываемого материала, 3–5 тонн в час, размер частиц исходного материала составляет не более 5 мм, при этом готового продукта достигает 100 мкм, скорость вращения ротора - 3000 мин⁻¹, а потребляемая мощность 90 кВт. Сравнительно небольшие размеры роторно-вихревых мельниц позволяют устанавливать их в ограниченных пространствах [5, 6].

Одним из узких мест при работе данных агрегатов является быстрый износ их рабочих органов – бил, который в зависимости от технологии производства на сегодня составляет 150–200 часов.

Поэтому многие крупные компании, такие как «KRUPP Polysius AG», «KHD Humboldt Wedag AG» и «Koppers», эффективно работают над созданием надежных конструкций рабочих органов – бил.

Вышеуказанные компании предлагают конструкции бил, которые выполнены из износостойкого металла, но используются при небольших скоростях вращения роторов и невысоких температурах, так как они обладают повышенной хрупкостью, а также имеют высокую стоимость. Эти рабочие элементы в зависимости от абразивности материала работают в диапазоне от 200 до 400 часов [7].

Материалы и методы. Практическое использование мельниц роторно-вихревого действия показывает, что условия их эксплуатации оказывают существенное влияние на работоспособность бил и величину их износа. Например, высокая температура исходного материала может представлять серьезную опасность для бил со сплошной наплавленной рабочей поверхностью, причем использование такого приема приводит к повышенному расходу дорогостоящих материалов.

Учеными БГТУ им. В.Г. Шухова разработан новый метод повышения долговечности бил за счет нанесения специальной сетки на их рабочую поверхность, что способствует запрессовке в них частиц измельчаемого материала и тем самым осуществить защиту от износа. Применение наплавки в виде сетки с ячейками по сравнению со сплошной наплавкой позволяет снизить расход дорогостоящего материала. Однако для удержания от выпадения из ячейки частиц измельчаемого материала её геометрические размеры имеют существенное значение.

Отсутствие научно-обоснованных рекомендаций по величине и форме ячеек наносимых на рабочую поверхность бил тормозит внедрение данного метода в промышленность.

Основная часть. Техническое решение ученых БГТУ им. В.Г. Шухова [8] использовано в конструкции роторно-вихревой мельницы, рабочие органы которой закреплены в перпендикулярной плоскости к валу ротора в его корпусе путем вкручивания и выполнены цилиндрической формы (рис. 2.)

Схема наплавки ячеек на рабочей поверхности била представлена на рисунке 3, согласно которой, они имеют прямоугольную форму, с соответствующими размерами сторон m , n и c , а в углах ячейки в результате наплавки образуются закругления радиусом r (рис. 4) [8–10].

Размеры ячейки необходимо подбирать таким образом, чтобы результирующая выталкивающая сила, действующая в ней, была равной или меньше удерживающей, но при этом её размеры оставались достаточными для реализации способа наплавки износостойкого материала на рабочую поверхность била.

Из вышесказанного следует, что условия запрессовки во многом зависят от величины размеров самой ячейки, и физико-механических свойств измельчаемого материала.

Установлено, что в момент соударения об била, измельчаемый материал запрессовывается в ячейку под усилием удара, в момент уравнивания скоростей в ячейке возникает упругое расширение, которое направленно на выталкива-

ние запрессованных частиц из ячейки. Если суммарные выталкивающие силы будут меньше или равны силам трения частиц о поверхность ячейки била, следовательно, произойдет удержание частиц измельченного материала внутри ячейки [11–19].

Делаем предположения о том, что усилие F упругого расширения равномерно по всей ее боковой поверхности $S_{бок}$.

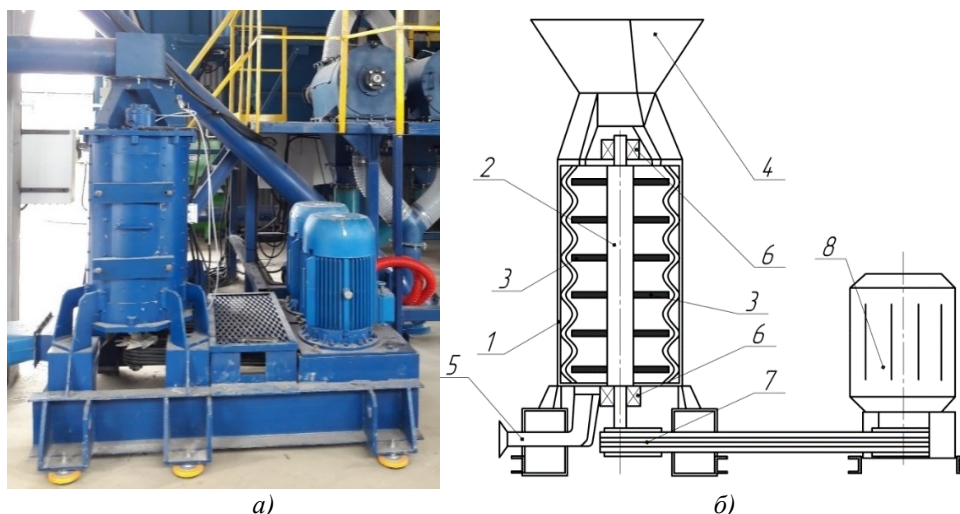


Рис. 2. Роторно-вихревая мельница: а – вид на действующий агрегат; б – конструктивная схема: 1 – цилиндрический корпус со съемной футеровкой волнистого типа; 2 – корпус ротора; 3 – била; 4 – загрузочное отверстие; 5 – разгрузочное отверстие; 6 – подшипниковые опоры; 7 – редуктор, 8 – электродвигатель

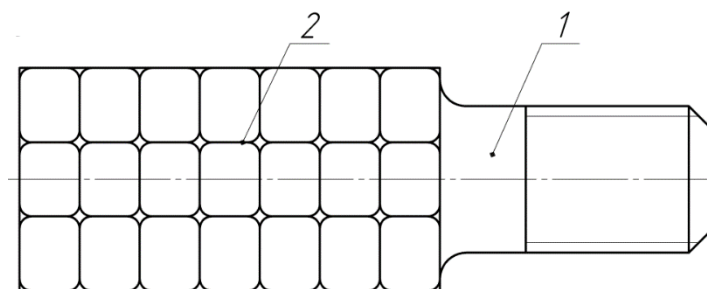


Рис. 3. Схема наплавки на рабочей поверхности била: 1 – било, 2 – сетка прямоугольной формы

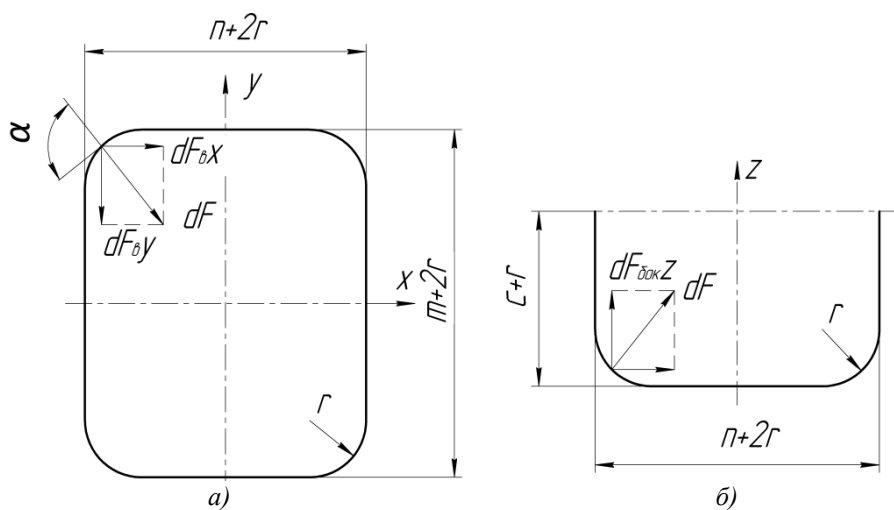


Рис. 4. Форма ячейки футерующей сеткой:

а – вид в профиль, б – поперечный вид:

dF – величина усилия, действующего на элементарную площадку боковой поверхности ячейки била;
 $dF_{бок}(z)$, $dF_{бок}(x)$ и $dF_{бок}(y)$ – силы упругого расширения, действующие на боковую поверхность на соответствующей оси координат

Тогда величина усилия, действующего на элементарную площадку боковой поверхности ячейки била может быть представлена выражением:

$$dF = FdS_{бок} = Fr \cdot d\alpha \cdot l_6, \quad (1)$$

где l_6 – длина периметра ячейки; r – радиус скругления в углах ячейки; $d\alpha$ – средний угол направления результирующей выталкивающей силы; $S_{бок}$ – площадь боковой поверхности; F – усилие упругого расширения.

Уравнение для определения усилия упругого расширения от всей боковой поверхности примет вид:

$$\sum F_{бок,z} = \int dF_{бок}(z) \cdot \cos \alpha = 2r^2 d\alpha (n + m) F \cdot \int \cos \alpha \cdot d\alpha. \quad (3)$$

После интегрирования уравнение (3) преобразуется в следующее выражение:

$$\sum F_{бок,z} = 2r^2 (n + m) F_z \cdot \sin \alpha. \quad (4)$$

Таким же образом получим уравнение для расчета усилия выталкивания, действующего от всей сферической поверхности ячейки:

$$\sum F_{сф,z} = r^2 F \int_0^{2\pi} dS_{бок} \int_0^{\pi/2} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha. \quad (5)$$

После интегрирования уравнение (5) преобразуется в следующее выражение:

$$\sum F_{сф,z} = \pi r^2 F. \quad (6)$$

$$F_{тр,б} = \int f dF_{бок} \cdot \sin \alpha = -f \cdot 2r^2 (n + m) \cdot F \cdot \cos \alpha, \quad (9)$$

где f – коэффициент внешнего трения, зависящий от свойств материала и поверхности бил;

- по боковой поверхности ячейки высотой «с»:

$$F_{тр,б} = \int f dF_{бок} = -frc(n + m) \cdot F; \quad (10)$$

$$2r^2 (n + m) \cdot F \cdot \sin \alpha + F \cdot n \cdot m \cdot r^2 + \pi \cdot r^2 \cdot F \leq f \cdot 2r^2 (n + m) \cdot F \cdot \cos \alpha + f \cdot \pi \cdot r^2 \cdot F + f \cdot r \cdot c(n + m) \cdot F. \quad (12)$$

Из уравнения (12) можно определить требуемую высоту ячейки:

$$c \geq \frac{2r \cdot (\sin \alpha (n + m) + 0,5 \cdot n \cdot m - f \cdot \cos \alpha (n + m))}{f \cdot (n + m)}. \quad (13)$$

Полученное выражение (13) позволяет рассчитывать геометрические размеры ячейки, наплавленной на рабочей поверхности бил сетки, при которых выталкивающие силы, действующие на объем запрессованного материала будут меньше или равными силам трения. Предложенный метод нанесения на рабочую поверхность позволяет уменьшить проскальзывание частиц измельчаемого материала относительно не наплавленной части била, что позволяет повысить его долговечность [20].

$$dF_{бок} = cr \cdot d\alpha \cdot (2nr + 2mr) \cdot F d\alpha, \quad (2)$$

где n , m и c – целые числа, кратные радиусу закругления r .

Спроецировав силы, действующие на боковую поверхность $dF_{бок}$ на оси координат: $dF_{бок}(z)$, $dF_{бок}(x)$ и $dF_{бок}(y)$ с учетом, что в ячейке силы упругого расширения $dF_{бок}(x)$ и $dF_{бок}(y)$ взаимно компенсируются (рис. 4). Тогда величину бокового суммарного выталкивающего усилия $\sum F_{бок,z}$, можно описать уравнением:

Выталкивающее усилие F_n , действующее от нижней поверхности ячейки с площадью, S_n , можно определить по следующему уравнению:

$$F_n = S_n \cdot F. \quad (7)$$

Тогда величину результирующего усилия, способствующего выталкиванию объема частиц их ячейки можно найти из выражения:

$$\sum \bar{F} = \sum F_{бок,z} + \sum F_{сф,z} + F_n. \quad (8)$$

По аналогии получаем уравнения для расчета сил трения удерживающих спрессованный объем частиц в ячейке:

- по поверхности радиусов закругления:

- по сферической поверхности в углах ячейки:

$$F_{тр,сф} = f dF_{сф,z} \cdot \sin \alpha = f \pi r^2 \cdot F. \quad (11)$$

Исходя из условия обеспечивающего удержания объема частиц в ячейке $\sum F_{тр} \geq \sum F$ имеем:

Выводы

1. Таким образом, предложенный учеными БГТУ им. В.Г. Шухова метод наплавки рабочей поверхности бил в виде сетки с ячейками определенного размера позволяет повысить долговечность бил.

2. В результате проведенного анализа силового взаимодействия в ячейке, нанесенной на рабочей поверхности била, было получено уравнение для определения ее геометрических размеров, позволяющих осуществлять в ней запрессовку измельчаемого материала.

3. Установлено, что условия запрессовки во многом зависят от величины размеров самой ячейки и физико-механических свойств измельчаемого материала, при этом размеры ячейки

необходимо подбирать таким образом, чтобы результирующая выталкивающая сила, действующая в ней, была равной или меньше удерживающей силы, но при этом её размеры, позволяли осуществить наплавку на рабочую поверхность била.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Духанин С.А., Романович А.А. Анализ работы и пути повышения долговечности бил мельницы РВМ-3000-01 // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: материалы международной научно-практической конференции. Белгород: Изд-во БГТУ, 2019. С. 51–55.
2. Якушев А.А., Духанин С.А. Повышение износостойкости рабочих органов роторно-вихревой мельницы // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: материалы международной научно - практической конференции. Белгород: Изд-во БГТУ, 2020. С. 444–447.
3. Демушкин Н. П., Краснов В.В., Орехова Т.Н. Модернизация роторно-вихревой мельницы // IX Международный молодежный форум "Образование. Наука. Производство". Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2017. С. 946–950.
4. Yinwei Y., Kai F., Jing X. A novel control method for roll gap of roller crusher based on Fuzzy-PID with decision factor self-correction // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. №892. Pp. 12–19.
5. Xuemin L., Man Z., Nan H. Calculation model of coal comminution energy consumption // Minerals Engineering. 2016. № 92. Pp. 21–27.
6. Romanovich A.A., Glagolev S.N., Babaevskiy A.N. Methods to improve efficiency of production technology of the innovative composite cementing materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. Issue 3. 032009.
7. Костылев А.А. Исследование процесса измельчения в роторно-вихревой мельнице тонкого помола // Вестник КрасГАУ. 2014. № 8(95). С. 245–250.
8. Патент на полезную модель № 208012 U1 Российская Федерация, МПК В02С 13/06. Роторная дробилка : № 2021120119: заявл. 17.08.2021 : опубл. 29.11.2021 / С. А. Духанин, А. А. Романович, М. А. Романович; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (БГТУ им. В.Г. Шухова).
9. Romanovich A.A., Dukhanin S.A., Romanovich M.A., Amirhadi Zakeri. Improving the Wear Resistance of Rotary-Vortex Mill Hammers // Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future. 2021. №1. С. 277–284.
10. Духанин С.А., Романович М.А., Романович А.А. Пути повышения надежности в работе измельчителей ударного действия // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: материалы международной научно-практической конференции. Белгород: Изд-во БГТУ, 2021. С. 99–103.
11. Егоров С. Н., Сиротин П. В., Тамадаев В. Г. Анализ поверхностного слоя помольного элемента роторно-вихревой мельницы // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2020. № 1(205). С. 81–85. DOI 10.17213/1560-3644-2020-1-81-85.
12. Духанин С.А., Романович М.А., Романович А.А. Повышение долговечности роторно-вихревой мельницы // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: материалы международной научно - практической конференции. Белгород: Изд-во БГТУ, 2021. С. 93–99.
13. Кардаш С. Н., Гречнева М.В. Сравнительный анализ наплавочных материалов по сопротивляемости абразивному износу // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы докладов V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2015. С. 198–203.
14. Коротков В.А., Гречнева М.В., Болорсук Б. Абразивное изнашивание и износостойкие материалы // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. С. 232–236.
15. Агафонов Д.С., Киселева В.А., Чеховской Е.И. Анализ конструкции роторной дробилки с целью повышения её производительности // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. С. 1609–1613.
16. Чеховской Е.И., Бутов А.П., Киселева В.А., Агафонов Д.С. Анализ конструкции валковой дробилки с целью повышения её надежности // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. С. 1771–1775.
17. Прокопенко В.С., Шарапов Р.Р., Агарков А.М., Шарапов Р.Р. Оптимизация работы оборуду-

дования для получения тонкодисперсных порошков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №1. С. 80–83.

18. Матвеев А.И., Винокуров В.Р. Разработка центробежных мельниц многократного ударного действия с разной конструкцией рабочих органов // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXII Международной научно-технической конференции. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2017. С. 96–100.

19. Гарабажиу А.А., Клоков Д.В., Шостак В.Г., Лешкевич А.Ю. Новая конструкция энерго-сберегающего роторно-центробежного смесителя для перемешивания сухих сыпучих матери-

алов // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы международной научно-практической конференции. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2018. С. 48–53.

20. Герасимов М.Д., Локтионов И.О. Результаты сверхтонкого измельчения материалов в реакторе роторно-вихревого типа // Энерго-, ресурсосберегающие машины, оборудование и экологически чистые технологии в дорожной и строительной отраслях: Материалы Международной научно-практической конференции. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. С. 60–67.

Информация об авторах

Романович Алексей Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: alexejrom@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Духанин Сергей Александрович, старший преподаватель кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: duhanin777@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Романович Марина Алексеевна, кандидат экономических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: bel31rm@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 11.10.2021 г.

© Романович А.А., Духанин С.А., Романович М.А., 2022

Romanovich A.A., *Dukhanin S.A., Romanovich M.A.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
*E-mail: duhanin777@yandex.ru

METHODS OF INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF THE WORKING BODIES OF A ROTARY-VORTEX MILL

Abstract. The article is aimed at increasing the durability of the working bodies of rotary-vortex mills, which are widely used in the production of dry building mixes. The description of the device of a rotary-vortex mill is given.

The article proposes a new method developed by scientists of the V.G. Shukhov BSTU to increase the durability of the mill's working bodies by applying cells with dimensions on their surfaces that allow particles of the crushed material to be pressed into them, and thereby protect the surface from rapid wear.

As a result of an analytical study of the force interaction of the crushed material with the surface of the beale cell, an equation was obtained to determine the geometric dimensions of the cell, allowing due to friction forces to keep the volume of particles of the pressed material from falling out of it.

It is established that the dimensions of the cell are interconnected and are determined in such a way that the resulting pushing force is equal to or less than the holding force (friction force). It is proved that the pressing of particles of the crushed material, in rectangular cells of the deposited mesh on the working surface of the bat, is largely determined by the geometric dimensions of the cell, and also depends on the physical and mechanical characteristics of the crushed materials. The design of the bill is proposed, which allows to increase its durability by reducing the contact area of the crushed material with the working surface of the bill.

Keywords: working bodies (bila), wear resistance, rotary-vortex mill, wear, surfacing.

REFERENCES

1. Duhanin S.A., Romanovich A.A. Analysis of the work and ways to increase the durability of the RVM-3000-01 mill bits [Analiz raboty i puti povysheniya dolgovechnosti bil mel'nicy RVM-3000-01]. *Energo-resursosberegayushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoj i stroitel'noj otraslyah: materialy mezhdunarodnoj nauchno - prakticheskoy konferencii*. Belgorod: Izd-vo BGTU. 2019. Pp. 51–55. (rus)
2. YAKushev A.A., Duhanin S.A. Increasing the wear resistance of the working bodies of the rotary-vortex mill [Povyshenie iznosostojkosti rabochih organov rotorno-vihrevoj mel'nicy]. *Energo-resursosberegayushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoj i stroitel'noj otraslyah: materialy mezhdunarodnoj nauchno - prakticheskoy konferencii*. Belgorod: Izd-vo BGTU. 2020. Pp. 444–447. (rus)
3. Demushkin N. P., Krasnov V.V., Orekhova T.N. Modernization of the rotary-vortex mill [Modernizaciya rotorno-vihrevoj mel'nicy]. IX Mezhdunarodnyj molodezhnyj forum "Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo". Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shuhov. 2017. Pp. 946–950. (rus)
4. Yinwei Y., Kai F., Jing X. A novel control method for roll gap of roller crusher based on Fuzzy-PID with decision factor self-correction IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. No 892. Pp. 12–19.
5. Xuemin L., Man Z., Nan H. Calculation model of coal comminution energy consumption *Minerals Engineering*. 2016. No 92. Pp. 21–27.
6. Romanovich A.A., Glagolev S.N., Babaevskiy A.N. Methods to improve efficiency of production technology of the innovative composite cementing materials IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. Issue 3, 032009.
7. Kostylev A.A. Investigation of the grinding process in a rotary-vortex fine grinding mill [Issledovanie processa izmel'cheniya v rotorno-vihrevoj mel'nice tonkogo pomola]. *Bulletin of KrasGAU*. 2014. No 8(95). Pp. 245–250. (rus)
8. Duhanin S.A., Romanovich A.A., Romanovich M.A. Impact crusher. Patent RF, no. 208012 U1, 2021.
9. Romanovich A.A., Dukhanin S.A., Romanovich M.A., Amirhadi Zakeri. Improving the Wear Resistance of Rotary-Vortex Mill Hammers *Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future*. 2021. No 1. Pp. 277–284.
10. Duhanin S.A., Romanovich M.A., Romanovich A.A. Ways to improve the reliability of impact shredders [Puti povysheniya nadezhnosti v rabote izmel'chitelej udarnogo dejstviya]. *Energo-resursosberegayushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoj i stroitel'noj otraslyah: materialy mezhdunarodnoj nauchno - prakticheskoy konferencii*. Belgorod: Izd-vo BGTU. 2021. Pp. 99–103. (rus)
11. Egorov S.N., Sirotin P.V., Tamadaev V.G. Analysis of the surface layer of the grinding element of a rotary-vortex mill [Analiz poverhnostnogo sloya pomol'nogo elementa rotorno-vihrevoj mel'nicy]. *Izvestiya of higher educational institutions. The North Caucasus region. Technical sciences*. 2020. No 1(205). Pp. 81–85. doi: 10.17213/1560-3644-2020-1-81-85. (rus)
12. Duhanin S.A., Romanovich M.A., Romanovich A.A. Increasing the durability of the rotary vortex mill [Povyshenie dolgovechnosti rotorno-vihrevoj mel'nicy]. *Energo-resursosberegayushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoj i stroitel'noj otraslyah: materialy mezhdunarodnoj nauchno - prakticheskoy konferencii*. Belgorod: Izd-vo BGTU. 2021. Pp. 93–99. (rus)
13. Kardash S. N., Grechneva M.V. Comparative analysis of surfacing materials on resistance to abrasive wear [Sravnitel'nyj analiz naplavochnyh materialov po soprotivlyaemosti abrazivnomu iznosu]. *Zhiznennyj cikl konstrukcionnyh materialov (ot polucheniya do utilizacii): materialy dokladov V Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*. Irkutsk: Irkutskij nacional'nyj issledovatel'skij tekhnicheskij universitet. 2015. Pp. 198–203. (rus)
14. Korotkov V.A., Grechneva M.V., Bolorsuh B. Abrasive wear and wear-resistant materials [Abrazivnoe iznashivanie i iznosostojkie materialy]. *Zhiznennyj cikl konstrukcionnyh materialov (ot polucheniya do utilizacii): Sbornik trudov IV Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*. Irkutsk: Irkutskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2014. Pp. 232–236. (rus)
15. Agafonov D.S., Kiseleva V.A., Chekhovskoj E.I. Analysis of the design of the rotary crusher in order to increase its productivity [Analiz konstrukcii rotornoj drobilki s cel'yu povysheniya eyo proizvoditel'nosti]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya molodyh uchenykh BGTU im. V.G. Shuhova*. Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova. 2019. Pp. 1609–1613. (rus)
16. Chekhovskoj E.I., Butov A.P., Kiseleva V.A., Agafonov D.S. Analysis of the roll crusher design in order to increase its reliability [Analiz konstrukcii valkovoj drobilki s cel'yu povysheniya eyo nadezhnosti]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya molodyh uchenykh BGTU im.*

V.G. SHuhova. Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. SHuhova. 2019. Pp. 1771–1775. (rus)

17. Prokopenko V.S., SHarapov R.R., Agarkov A.M., Sharapov R.R. Optimization of equipment operation for obtaining fine powders [Optimizaciya raboty oborudovaniya dlya polucheniya tonkodispersnyh poroshkov]. Bulletin of V.G. Shukhov BSTU, 2015. No1. Pp.80–83. (rus)

18. Matveev A.I., Vinokurov V.R. Development of centrifugal mills of multiple impact action with different design of working bodies [Razrabotka centrobezhnyh mel'nic mnogokratnogo udarnogo dejstviya s raznoj konstrukciej rabochih organov]. Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogenogo syr'ya: materialy XXII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Ekaterinburg: Izdatel'stvo "Fort Dialog-Iset". 2017. Pp. 96–100. (rus)

19. Garabazhiu A.A., Klovok D.V., Shostak V.G., Leshkevich A.Yu. New design of energy-sav-

ing rotary centrifugal mixer for mixing dry bulk materials [Novaya konstrukciya energosberegayushchego rotorno-centrobezhnogo smesitelya dlya peremeshivaniya suhikh sypuchih materialov]. Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet im. Imperatora Petra I. 2018. Pp. 48–53. (rus)

20. Gerasimov M.D., Loktionov I.O. Results of ultrafine grinding of materials in a rotor-vortex type reactor [Rezultaty sverhtonkogo izmel'cheniya materialov v reaktore rotorno-vihrevogo tipa]. Energo-, resursosberegayushchie mashiny, oborudovanie i ekologicheski chistye tekhnologii v dorozhnoj i stroitel'noj otraslyah: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova. 2018. Pp. 60–67. (rus)

Information about the authors

Romanovich, Alexey A. DSc, Professor. E-mail: alexejrom@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Dukhanin, Sergey A. Senior lecturer. E-mail: duhanin777@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

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

Received 11.10.2021

Для цитирования:

Романович А.А., Духанин С.А., Романович М.А. Методы повышения износостойкости рабочих органов роторно-вихревой мельницы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 116–123. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-116-123

For citation:

Romanovich A.A., Dukhanin S.A., Romanovich M.A. Methods of increasing the wear resistance of the working bodies of a rotary-vortex mill. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 4. Pp. 116–123. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-116-123

