

Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий

Строительные конструкции,
здания и сооружения

Основания и фундаменты,
подземные сооружения

Строительные материалы
и изделия

Технология и организация строительства

Строительная механика

Градостроительство, планировка сельских
населенных пунктов

Управление жизненным циклом объектов
строительства





Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий

Рецензируемый научно-практический журнал (издается с 2022 года)

eISSN 2949–1835

DOI: 10.23947/2949–1835

Том 5, № 1, 2026

Издание является платформой для научно-образовательного сотрудничества российских и иностранных исследователей, вовлеченных в строительную сферу.

Журнал включен в Единый государственный перечень научных изданий — «Белый список» (Категория 3).

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК, категория II) по следующим научным специальностям:

- 2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
- 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки)
- 2.1.5 – Строительные материалы и изделия (технические науки)
- 2.1.7 – Технология и организация строительства (технические науки)
- 2.1.9 – Строительная механика (технические науки)
- 2.1.13 – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)
- 2.1.14 – Управление жизненным циклом объектов строительства (технические науки)

<i>Индексация и архивация</i>	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, Internet Archive, Google Scholar, Mendeley, AGRIS, SCILIT, Baidu, OpenAlex, Library of Congress, Semantic Scholar, Berkeley, OpenAIRE, MIT Libraries
<i>Наименование органа, зарегистрировавшего издание</i>	Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 83923 от 16 сентября 2022 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
<i>Учредитель и издатель</i>	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)
<i>Периодичность</i>	4 выпуска в год
<i>Адрес учредителя и издателя</i>	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
<i>E-mail</i>	sovtrendstr@gmail.com
<i>Телефон</i>	+7 (863) 273–83–72
<i>Сайт</i>	http://www.stsg-donstu.ru/
<i>Дата выхода в свет</i>	30.03.2026





Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning

Peer-reviewed scientific and practical journal (published since 2022)

eISSN 2949–1835

DOI: 10.23947/2949–1835

Vol. 5, no. 1, 2026

A peer-reviewed scientific and practical journal designed to inform the readers about the latest advancements, trends and prospects in the field of construction, architecture, urban planning and adjacent scientific fields. The journal serves a platform for scientific and educational cooperation of researchers and scholars engaged in field of construction.

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific publications (Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation), where basic scientific results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of Science in scientific specialties and their respective branches of science should be published.

The journal publishes articles in the following fields of science:

- Building Constructions, Buildings and Engineering Structures (Engineering Sciences)
- Footings and Foundations, Subsurface Structures (Engineering Sciences)
- Construction Materials and Products (Engineering Sciences)
- Technology and Organization of Construction (Engineering Sciences)
- Structural Mechanics (Engineering Sciences)
- Urban Planning, Rural Settlements Planning (Engineering Sciences)
- Facilities Life Cycle Management (Engineering Sciences)

<i>Indexing and Archiving</i>	RISC, CyberLeninka, CrossRef, Internet Archive, Google Scholar, Mendeley, AGRIS, SCILIT, Baidu, OpenAlex, Library of Congress, Semantic Scholar, Berkeley, OpenAIRE, MIT Libraries
<i>Name of the Body that Registered the Publication</i>	Extract from the Register of Registered Mass Media ЭЛ № ФС 77 – 83923 dated September 16, 2022, issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media
<i>Founder and Publisher</i>	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Technical University (DSTU)
<i>Periodicity</i>	4 issues per year
<i>Address of the Founder and Publisher</i>	1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation
<i>E-mail</i>	sovtrendstr@gmail.com
<i>Telephone</i>	+7 (863) 2–738–372
<i>Website</i>	http://www.stsg-donstu.ru/
<i>Date of Publication</i>	30.03.2026



Редакционная коллегия

Главный редактор

Батаев Дена Карим-Султанович, доктор технических наук, профессор, Комплексный научно-исследовательский институт имени Х. И. Ибрагимова Российской академии наук (Грозный, Российская Федерация)

Заместители главного редактора

Маилян Дмитрий Рафаэлович, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Щербань Евгений Михайлович, кандидат технических наук, доцент, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Выпускающий редактор

Студеникова Светлана Геннадьевна, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Ответственный секретарь

Шевченко Надежда Анатольевна, начальник отдела научно-технической информации и научных изданий, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Бескопыльный Алексей Николаевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Беккиев Мухтар Юсубович, доктор технических наук, профессор, директор Высокотехнологического Геофизического Института (Нальчик, Российская Федерация);

Ходжаев Аббас Агзамович, доктор технических наук, профессор, начальник отдела контроля учебных программ и учебной литературы Министерства высшего и среднего специального профессионального образования (Ташкент, Республика Узбекистан);

Емрах Маденси, доктор технических наук, доцент, Факультет гражданского строительства, Университет Неджметтина Эрбакана (Конья, Турция);

Несветаев Григорий Васильевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Прокопов Альберт Юрьевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Скибин Геннадий Михайлович, доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный политехнический университет (ЮРГПУ НПИ) имени М.И. Платова (Новочеркасск, Российская Федерация);

Плешко Михаил Степанович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов» (НИТУ «МИСиС») (Москва, Российская Федерация);

Когляр Владимир Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Зайченко Николай Михайлович, доктор технических наук, профессор, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (Макеевка, Российская Федерация);

Адылходжаев Анвар Ишанович, доктор технических наук, профессор, Ташкентский государственный транспортный университет (Ташкент, Республика Узбекистан);

Григорян Вардгес Игитович, доктор технических наук, профессор, руководитель Ассоциации промышленных предприятий Армении (Ереван, Республика Армения);

Байбурин Альберт Халитович, доктор технических наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет (ЮУрГУ) (Челябинск, Российская Федерация);

Толкынбаев Темирхан Анапияевич, доктор технических наук, профессор, действительный (иностранн) член Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), первый проректор Таразского университета (Тараз, Казахстан);

Языев Батыр Меретович, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Акимов Павел Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), академик Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН) (Москва, Российская Федерация);

Мохаммед Шаабан Галла, PhD в области гражданского строительства, Инженерный факультет Университета Кафр-эль-Шейха (Египет);

Беспалов Вадим Игоревич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Данилина Нина Васильевна, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ) (Москва, Российская Федерация);

Сидоренко Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ) (Волгоград, Российская Федерация);

Товмасян Саркис Аристархосович, доктор архитектурных наук, доцент, член Палаты архитекторов Армении (Ереван, Республика Армения).

Editorial Board

Editor-in-Chief

Dena Karim S. Bataev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, academician of the Academy of Sciences of the Chechen Republic (Grozny, Russian Federation);

Deputy Chief Editor

Dmitry R. Mailyan, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Evgenii V. Shcherban', Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Executive Editor

Svetlana S. Studennikova, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Executive Secretary

Nadezhda A. Shevchenko, Head of the Scientific and Technical Information and Scientific Publications Department, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Alexey N. Beskopylny, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Mukhtar Yu. Bekkiev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Director of the High-Mountain Geophysical Institute (Nalchik, Russian Federation);

Abbas A. Khodzhaev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Curricula and Educational Literature Control Department, Ministry of Higher and Secondary Vocational Education of the Republic of Uzbekistan (Tashkent, Republic of Uzbekistan);

Emrah Madenci, Dr.Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Civil Engineering, Necmettin Erbakan University (Türkiye);

Grigory V. Nesvetaev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Albert Yu. Prokopov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Gennady M. Skibin, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (Novocherkassk, Russian Federation)

Mikhail S. Pleshko, Dr.Sci. (Engineering), Professor, National University of Science and Technology MISIS (Moscow, Russian Federation)

Vladimir D. Kotlyar, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Nikolai M. Zaichenko, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (Makeevka, Russian Federation)

Anvar I. Adilkhodjaev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Tashkent State Transport University (Tashkent, Republic of Uzbekistan)

Vardges I. Grigoryan, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Association of Industrial Enterprises of Armenia (Yerevan, Republic of Armenia)

Albert Kh. Bayburin, Dr.Sci. (Engineering), Professor, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

Temirkhan A. Tolkyubaev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Full (Foreign) Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), First Vice-Rector, Taraz University (Taraz, Republic of Kazakhstan)

Batyr M. Yazyev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Pavel A. Akimov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS) (Moscow, Russian Federation)

Mohamed Shaaban Ghalla, Ph.D. in Civil Engineering, Assistant Lecturer at the Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kafrelsheikh University (Egypt);

Vadim I. Bepalov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Nina V. Danilina, Dr.Sci. (Engineering), Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU) (Moscow, Russian Federation)

Vladimir F. Sidorenko, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Volgograd State Technical University (VSTU) (Volgograd, Russian Federation)

Sarkis A. Tovmasyan, Dr.Sci. (Architecture), Associate Professor, Member of the Chamber of Architects of the Republic of Armenia (Yerevan, Republic of Armenia)

СОДЕРЖАНИЕ

ЮБИЛЕЙ УЧЕНОГО

<i>Дмитрию Рафаэловичу Маилян 70 лет</i>	7
--	---

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

<i>Кришан А.Л., Парфенов В.В., Вавилин Н.В., Астафьева М.А.</i> Технология формирования трубобетонных колонн	8
<i>Гарькин И.Н., Сабитов Л.С., Тупикова Е.М.</i> Моделирование эффективности демпферных систем в строительных конструкциях при сейсмическом воздействии с использованием обобщенного процесса Орнштейна-Уленбека	15
<i>Телемаков М.И., Бузало Н.А.</i> Современные подходы к исследованию аэродинамической устойчивости зданий сложной криволинейной формы	23
<i>Вержбовский Г.Б.</i> Протяженные деревянные панели перекрытий и покрытий зданий	32
<i>Зимин С.С., Орлович Р.Б., Данилов С.В., Москалькова Ю.Г.</i> Оценка несущей способности цилиндрических каменных сводов с учетом их повреждений	40
<i>Мажиев Х.Н., Мажиев К.Х., Панасенко Ю.В., Мажиева А.Х., Мажиев А.Х., Мажиев А.Х.</i> Обеспечение прочности, жёсткости и устойчивости несущих конструкций многоэтажного здания сложной формы при сейсмических воздействиях	48

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

<i>Байбурин А.Х., Мельник А.А., Лебедь А.Р.</i> Общие тенденции развития строительных технологий	68
<i>Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Шуть В.В.</i> Анализ результатов хронометража при непрерывном бетонировании массивной фундаментной плиты	79

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

<i>Савельева Н.А.</i> Численный анализ напряженно-деформированного состояния секции железобетонного моста	89
---	----

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

<i>Самарская Н.С.</i> Устойчивое управление жизненным циклом: от лопастей ветрогенераторов до современных игровых комплексов	96
--	----

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

<i>Суаньчжэнь Сун, Муселемов Х.М., Бескопыльный А.Н.</i> Несущая способность соединений из бамбука и их применение в ферменных конструкциях	104
---	-----

CONTENTS

ANNIVERSARY OF THE SCIENTIST

<i>Dmitry Rafaelovich Mailyan is 70 years old</i>	7
---	---

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES

<i>Krishan AL, Parfenov VV, Vavilin NV, Astafieva MA</i> Technology of Forming Tubular Concrete Columns ...	8
<i>Garkin IN, Sabitov LS, Tupikova EM</i> Modeling the Effectiveness of Damping Systems in Building Structures under Seismic Impact Using the Generalized Ornstein-Uhlenbeck Process	15
<i>Telemakov MI, Buzalo NA</i> Modern Approaches to Studying Aerodynamic Stability of Complex Curvilinear Buildings.....	23
<i>Verzhbovsky GB</i> Extended Wooden Panels for Flooring and Cladding of Buildings	32
<i>Zimin SS, Orlovich RB, Danilov SV, Maskalkova YuG</i> Evaluation of the Load-Bearing capacity of Cylindrical Stone Vaults Taking their Damage into Account	40
<i>Mazhiev KhN, Mazhiev KKh, Panasenko YuV, Mazhieva AH, Mazhiev AH, Mazhiev AH</i> Ensuring the Strength, Rigidity and Stability of Load-Bearing Structures of a Multi-Storey Building of Complex Shape under Seismic Influences	48

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

<i>Baiburin AKh, Melnik AA, Lebed AR</i> General Trends in the Development of Cconstruction Technologies	68
<i>Nesvetaev GV, Koryanova JI, Shut VV</i> Analysis of Timing Results during Continuous Concreting of a Massive Foundation Slab.....	79

CONSTRUCTION MECHANICS

<i>Savelyeva NA</i> Numerical Analysis of Stress-Strain Conditions of a Reinforced Concrete Bridge Section	89
--	----

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES

<i>Samarskaya NS</i> Sustainable Lifecycle Management: from Wind Turbine Blades to Modern Playground Complexes.....	96
---	----

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES

<i>Song X, Muselemov KhM, Beskopylny AN.</i> Load-Bearing Capacity of Bamboo Joints and their Use in Truss Structures	104
--	-----

ЮБИЛЕЙ УЧЕНОГО ANNIVERSARY OF THE SCIENTIST

Дмитрию Рафаэловичу Маилян 70 лет



Дмитрий Рафаэлович Маилян — профессор, доктор технических наук, член-корреспондент Российской академии естественных наук, почетный строитель РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, почетный профессор ДГТУ.

В 1981 году Дмитрий Рафаэлович защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности «Строительные конструкции, здания и сооружения» в Киевском инженерно-строительном институте. Тема диссертации: «Прочность, деформативность и трещиностойкость железобетонных стоек с предварительно напряженной арматурой». В 1994 году защитил диссертацию на соискание учёной степени доктора технических наук в Московском институте инженеров транспорта. Тема диссертации: «Эффективные сжатые предварительно напряженные элементы и методы их расчета при различных режимах нагружения с учетом предыстории деформирования». С 1980 по 1991 годы Дмитрий Рафаэлович трудился в качестве научного сотрудника, старшего научного сотрудника, ведущего научного сотрудника отдела железобетона проектного института «Ростовский Промстройинипроект». С 1991 по 1996 годы был старшим преподавателем, доцентом, а затем профессором кафедры математики, механики, информатики и конструкций института архитектуры и искусств Южного федерального университета. С 1996 по настоящее время заведует кафедрой железобетонных и каменных конструкций Донского государственного технического университета. Под его руководством успешно работает Центр судебных экспертиз ДГТУ.

Дмитрий Рафаэлович Маилян — известный ученый в области строительства, инновационных железобетонных конструкций, разработки методов их проектирования и расчета на разные силовые воздействия. Его педагогическая и научная деятельность отражена в 400 трудах, включая 30 монографий, 20 учебников, учебных пособий и справочников, 37 авторских свидетельств и патентов. Под его руководством успешно подготовлено 3 доктора и 39 кандидатов технических наук. Дмитрий Рафаэлович – член трех диссертационных советов (при Донском государственном техническом университете и Казанском федеральном университете); организатор ряда Международных научно-технических конференций; член редколлегий трех научно-технических журналов, заместитель главного редактора журнала «Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий».

Кандидатура Дмитрия Рафаэловича Маиляна для избрания советником РААСН по отделению строительных наук рекомендована академиком Российской академии архитектуры и строительных наук, доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения» Российского университета транспорта В.С. Фёдоровым.

Плодотворная учебная, научная и производственная деятельность ученого высоко оценены в стенах университета и за его пределами. За разработку научных основ оптимального проектирования строительства, перспективного информационного моделирования и эффективного управления жизненными циклами жилых и общественных зданий различных регионов страны Дмитрию Рафаэловичу в составе коллектива ученых и производственников России присуждена премия Правительства РФ в области науки и техники и присвоено почетное звание лауреата премии Правительства РФ. Ученый был награжден медалью Ордена «За службу России», Орденом «За заслуги перед Ростовской областью».

Коллектив редакции журнала «Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий» от всей души поздравляет Дмитрия Рафаэловича с юбилеем и желает здоровья, благополучия, вдохновения и энергии для новых научных достижений на благо родного университета и строительной отрасли России!

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 678.027

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-8-14>

Технология формирования трубобетонных колонн

А.Л. Кришан¹  , В.В. Парфенов² , Н.В. Вавилин² , М.А. Астафьева¹ 

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация

² ООО «Структура Эксперт», г. Екатеринбург, Российская Федерация

✉ kris_al@mail.ru



EDN: TIJSMW

Аннотация

Введение. При изготовлении трубобетонных колонн следует обратить внимание на технологию заполнения стальной трубы бетонной смесью. Практика показывает, что при подаче бетонной смеси в трубу сверху должно быть обеспечено качество бетонирования конструкции не гарантируется. В данном исследовании ставилась цель опытной проверки эффективности технологии формирования колонн самоуплотняющейся бетонной смесью методом напорного бетонирования.

Материалы и методы. Эксперименты по исследованию эффективности предложенной технологии формирования трубобетонной колонны с насыщенным содержанием продольной и спиральной арматуры проводились на прозрачном макете. Подбран состав самоуплотняющейся смеси, обеспечивающий требуемую удобоукладываемость, текучесть, однородность и отсутствие расслоения. В ходе экспериментов подобраны технологические параметры формирования, среди которых наиболее важным была скорость заполнения конструкции бетонной смесью. Контролировалась равномерность распределения бетона по всему макету.

Результаты исследования. В результате эксперимента выявлено, что бетонная смесь легко достигала всех зон конструкции без потерь качества. Наблюдалось отсутствие выделения воздушных пузырей с поверхности конструкции, что свидетельствует о высоком качестве уплотнения смеси. Разброс прочности и плотности бетона в верхней, средней и нижней зонах конструкции минимальный. Полученный в конструкции бетон характеризуется однородной структурой, имеющей однородный, равномерно распределенный состав без значительных пустот или неоднородностей по всему объему.






Обсуждение и заключение. Отсутствие опалубки, подмостей и прочих приспособлений, высокая скорость бетонирования значительно снижают продолжительность и трудоемкость монтажа колонн. Все это, в совокупности с достигнутым качеством бетона, открывает хорошие перспективы для широкого применения метода напорного бетонирования в строящихся объектах в РФ. В дальнейшем необходимо разработать методику ультразвукового контроля качества бетона трубобетонных колонн.

Ключевые слова: трубобетонные колонны, самоуплотняющаяся бетонная смесь, метод восходящей бетонной смеси, прочность и плотность бетона, однородность структуры

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Кришан А.Л., Парфенов В.В., Вавилин Н.В., Астафьева М.А. Технология формирования трубобетонных колонн. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2026;5(1):8–14. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-8-14>

Technology of Forming Tubular Concrete Columns

Anatoly L. Krishan¹  , Vyacheslav V. Parfenov² , Nikita V. Vavilin² , Mariia A. Astafeva¹ 

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

² LLC Struktura Expert, Yekaterinburg, Russian Federation

 kris_al@mail.ru

Abstract

Introduction. In manufacturing tubular concrete columns, attention should be paid to a technology of filling a steel tube with a concrete mixture. In practice when a concrete mixture is being fed into a tube from the top, a proper quality of concreting a structure is not guaranteed. In this study, the aim was to test the effectiveness of a technology of forming columns with a self-sealing concrete mixture by means of pressure concreting.

Materials and Methods. Experiments to study the effectiveness of the suggested technology for forming a tubular concrete column with a saturated content of longitudinal and spiral reinforcement were conducted on a transparent model. A self-compacting mix composition was selected that ensured the required workability, flowability, homogeneity, and absence of stratification. Through the course of the experiments, the process parameters were adjusted with the speed of filling the structure with the concrete mixture as the most important one. The uniformity of concrete distribution throughout the model was monitored.

Research Results. The experiment indicated that the concrete mixture easily reached all of the areas of the structure with no loss of quality. No air bubbles were observed on the surface of the structure, indicating high-quality compaction of the mixture. Concrete strength and density variations in the upper, middle, and lower zones of the structure were minimum. The resulting concrete is characterized by a homogeneous structure, with a uniform, evenly distributed composition with no significant voids or inhomogeneities throughout the entire volume.

Discussion and Conclusion. The absence of formwork, scaffolding, and other equipment, high speed of concreting significantly reduce the time and labor intensity of column installation. All of these, combined with the achieved concrete quality, open up avenues for a broad-scale use of the pressure concreting method in construction projects in the Russian Federation. Further work is needed in order to develop a method for ultrasonic quality control of concrete in tubular concrete columns.

Keywords: tubular concrete columns, self-compacting concrete, method of ascending concrete mixture, strength and density of concrete, homogeneity of a structure

Acknowledgements. The authors would like to thank the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and the above comments making it possible to improve its quality.

For citation. Krishan AL, Parfenov VV, Vavilin NV, Astafeva MA Technology of Forming Tubular Concrete Columns. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(1):8–14. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-8-14>

Введение. При проектировании каркасов высотных зданий в РФ все чаще начинают использовать трубобетонные колонны (ТБК). Этому способствует целый ряд значимых достоинств экономического, технологического, конструктивного плана, а также архитектурная выразительность данных конструкций [1–6]. Одним из сдерживающих факторов для более широкого применения ТБК в нашей стране является недостаточно проработанная технология заполнения стальной трубы бетонной смесью. Ввиду значительной длины стальных труб относительно небольшого диаметра, обеспечивающих «несъемную опалубку» для колонн на два-три этажа и более, традиционные технологии заполнения их бетонной смесью сверху не гарантируют должного качества бетонирования. Обеспечить и контролировать качество укладки и уплотнения бетонной смеси в таких условиях довольно сложно.

Опыт строителей Японии, являющихся одними из лидеров по объемам применения ТБК, свидетельствует о том, что наиболее перспективной технологией их формирования является применение метода восходящей бетонной смеси (ВБС), который известен также под наименованием метода напорного бетонирования. По этой технологии бетонная смесь бетононасосом под давлением подается через специально выполненное отверстие в стальной трубе снизу вверх.

Исследования [7, 8] показали, что такая технология бетонирования приводит к уменьшению количества воздушных пузырьков в контактном слое арматуры с бетоном. Формируемый бетонный слой под арматурой характеризовался лучшим качеством по сравнению с традиционным бетонированием сверху формы, что привело к увеличению сцепления арматуры с бетоном.

Для обеспечения необходимых высоких пластичности и подвижности здесь следует применять самоуплотняющиеся бетонные смеси (СУБС). Такие смеси еще в прошлом веке начали применять за рубежом, но в настоящее время уже достаточно широко применяются и в нашей стране [9–11]. Использование СУБС позволяет достичь еще ряд положительных результатов, среди которых наиболее важными являются:

- отсутствие необходимости в вибрации при укладке;
- отсутствие расслаиваемости смеси;
- снижение содержания цемента;
- высокая прочность, плотность и долговечность бетона.

Цель данного исследования состояла в опытной проверке эффективности технологии формирования колонн ТБК из СУБС методом напорного бетонирования.

Материалы и методы. На первом этапе выполнен подбор состава СУБС и проверка ее качества. Для этого осуществлялся контроль удобоукладываемости смеси с помощью конуса Абрамса и определялась текучесть методом блокирующего кольца. Второй метод использовали для оценки способности смеси проникать при ее заливке в узкие пространства, включая просветы между арматурными стержнями, без расслоения или закупоривания.

Отбор проб для определения нормируемых параметров смесей проводили в соответствии с ГОСТ Р 59715 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний» с учетом указаний ГОСТ 10181 «Смеси бетонные. Методы испытаний».

Контроль прочности бетона производился по результатам испытаний на сжатие контрольных образцов-кубов с размером ребра 100 мм в возрасте 3, 7, 28 суток в соответствии с ГОСТ 18105 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности», ГОСТ 10181 и ГОСТ 31914 «Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества».

После получения смеси требуемого качества на масштабном прозрачном макете трубобетонной колонны (рис. 1) выполнялись модельные эксперименты по формированию изделия. Макет трубобетонной колонны имел высоту — 1973 мм, диаметр — 300 мм. Труба-оболочка была изготовлена из оргстекла. Арматурный каркас выполнялся из 7-ми продольных стержней диаметром 25 мм и спирали из стержней диаметром 8 мм с шагом 50 мм. Дополнительно в нижней части арматурного каркаса установлены два продольных стержня диаметром 25 мм с расстоянием в свету между друг другом и остальными стержнями 30 мм. Это позволяло оценить способность проникновения СУБС между стержнями густоармированных ТБК.

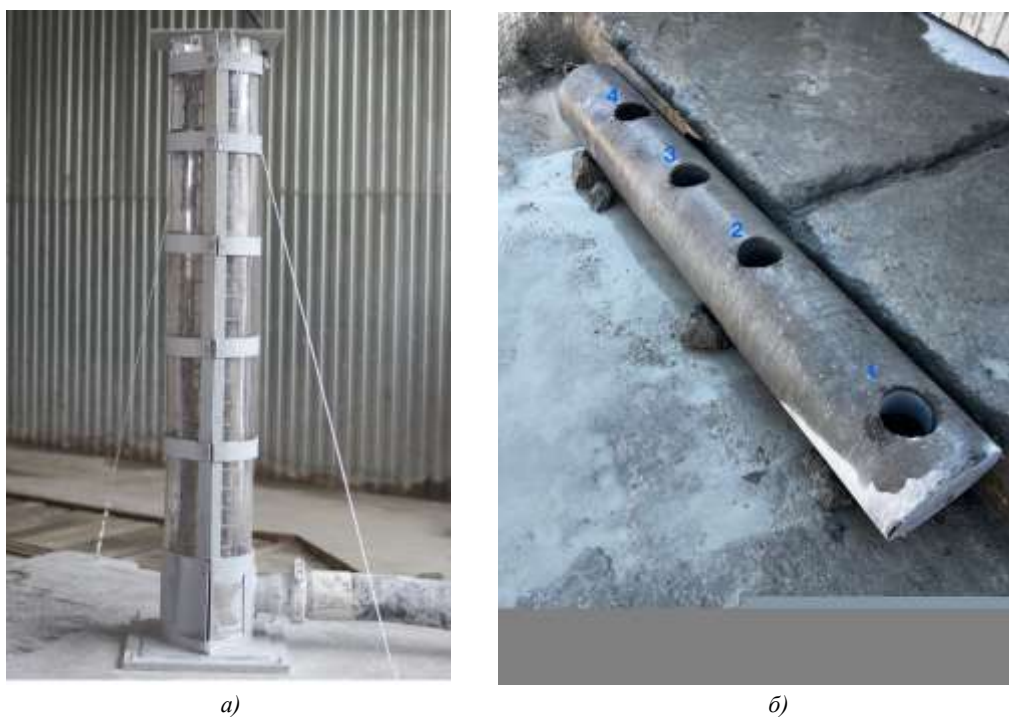


Рис. 1. Исследуемый образец ТБК: *а* — общий вид макета для проверки метода ВБС; *б* — места выбуривания кернов

Для подачи бетонной смеси использовалась система бетоновода диаметром 125 мм, соединяющаяся с макетом посредством специальной быстроръемной фурнитуры. Подача смеси осуществлялась бетононасосом Cifa PC 709.

Через 72 часа после формирования железобетонного ядра из макета извлекались керны для набора бетоном прочности в естественных условиях. Керны выбуривались из четырех участков, расположенных внизу, вверху и в средних зонах макета (рис. 1 б).

Контроль прочности бетона осуществлялся в возрасте 28 суток по результатам испытаний на сжатие цилиндров диаметром 100 мм и высотой порядка 100 мм согласно ГОСТ 28570 «Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций» и ГОСТ 31914.

Результаты исследования. Результаты определения удобоукладываемости СУБС по величине диаметра расплыва стандартного конуса и времени расплыва до диаметра 500 мм представлены в таблицах 1,2 и продемонстрированы на рис. 2.

Смесь получена высокостабильная. Цементное тесто и вода не отделялись от заполнителя по окружности расплыва, признаков расслоения бетонной смеси не наблюдалось. Время остановки расплыва — 62 сек. Контуры четкие. Смесь была плотная, однородная на протяжении всего испытания до завершения укладки в конструкцию. Сохраняемость удобоукладываемости — 180 мин.

Прочность бетона контрольных образцов кубов на сжатие по результатам контроля прочности кубов соответствует классу В70.

Таблица 1

Результаты контроля удобоукладываемости смеси

№ состава	Время t_{500} , сек	Диаметр расплыва, см			Марка по расплыву	Марка вязкости
		d_1	d_2	d_{cp}		
#1	3	77,5	77	77,25	РК3	V2

Таблица 2

Результаты контроля расплыва конуса в блокирующем кольце

№ состава	Диаметр расплыва, см			Измеренные высоты, см					Марка по текучести
	d_1	d_2	d_{cp}	h_0	h_{x1}	h_{x2}	h_{y1}	h_{y2}	
#1	80	79,5	79,75	12,3	12,8	12,9	12,9	12,7	T4

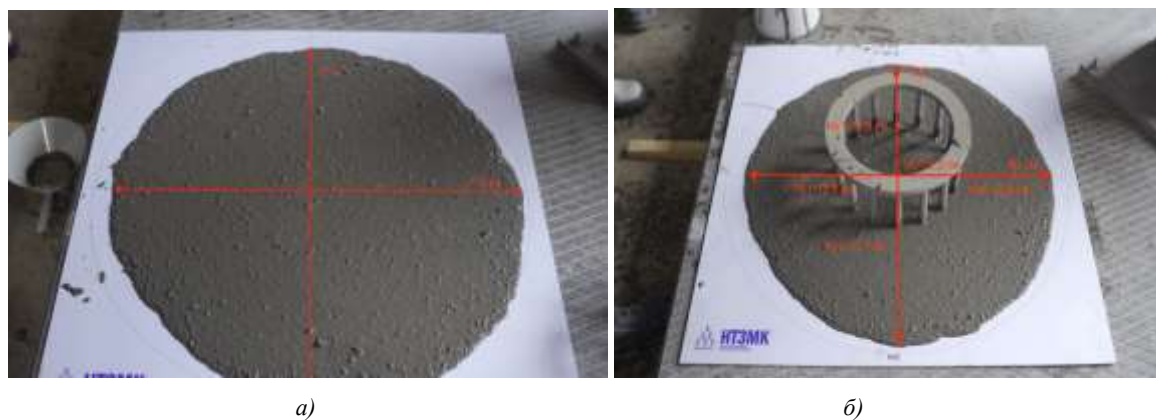


Рис. 2. Результаты испытаний бетонной смеси: а — определение марок по расплыву, вязкости; б — определение марок по текучести

Результаты формирования макета ТБК следующие. Время заполнения смесью — 42 сек, скорость заполнения — 229,5 л/мин. В процессе заполнения макета ТБК важно было обеспечить равномерное распределение бетона по всему объему конструкции. Визуальное наблюдение через прозрачные стенки за процессом заполнения показало, что смесь начинала подниматься внутри арматурного каркаса, но при достижении перепада высот более 50 мм распространялась по периферийным зонам конструкции. Смесь легко достигала всех зон без потерь качества. По завершении процесса бетонирования наблюдалось отсутствие выделения воздушных пузырей с поверхности конструкции, что свидетельствует о высоком качестве уплотнения бетонной смеси. Состояние наружной поверхности железобетонного ядра представлено на рис. 3.

По результатам испытания четырех цилиндров прочность бетона на сжатие составляла от 77,9 МПа до 81,2 МПа. Плотность образцов также находилась в очень узком диапазоне — от 2549 кг/м³ до 2588 кг/м³. Такие результаты свидетельствуют об отсутствии расслоения смеси и равномерном распределении заполнителей по всему объему и высоте.

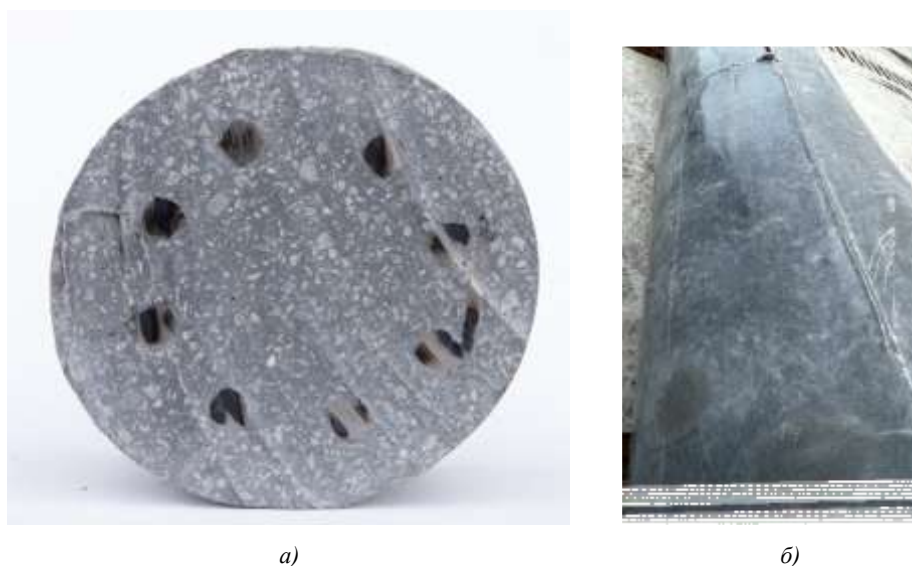


Рис. 3. Качество уплотнения бетона: *а* — железобетонный сердечник в разрезе; *б* — боковая поверхность железобетонного ядра

Обсуждение и заключение. Проведенное исследование показало, что метод ВБС может обеспечивать хорошее качество формирования и уплотнения бетона ТБК. Тиксотропное поведение СУБС уменьшает вязкость смеси и противодействует возникновению ее сегрегации за счет сдвигового напряжения в процессе непрерывного перемещения смеси в объеме конструкции под давлением восходящего потока. В результате достигается высокая однородность бетона в конструкции, в том числе и по ее высоте. Разброс прочности и плотности бетона в верхней, средней и нижней зонах конструкции минимальный.

Для ТБК, чаще используемых в каркасах высотных зданий, однородность бетона по всему объему элемента является не менее важным параметром, чем его абсолютная прочность. Неоднородность приводит к локальным концентрациям напряжений и снижению общей несущей способности конструкции, что может отрицательно сказаться на механической безопасности здания в целом.

Следует отдельно отметить, что в расчетах прочности трубобетонных колонн, бетонируемых этим методом, к расчетному сопротивлению бетона сжатию не требуется применять коэффициент условий работы $\gamma_{бз} = 0,85$ (п. 6.1.12 СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»). В сочетании с возможностью практического использования низкой вариативности прочности (при определении класса бетона) это позволяет получать более высокие расчетные значения сжимающих усилий в бетоне конструкций. В результате появляется возможность заметно улучшить технико-экономические показатели колонн.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о целесообразности практического применения технологии формирования ТБК методом ВБС, когда самоуплотняющаяся бетонная смесь внутри стальной трубы под давлением подается снизу вверх.

Отметим очевидные преимущества этого метода перед традиционными методами с подачей смеси сверху:

- значительное уменьшение возможности захвата дополнительного воздуха внутри СУБС;
- практическое исключение возможности сегрегации смеси из-за ударов об арматуру и стенки трубы опалубки при свободном падении;
- существенное уменьшение времени заполнения конструкции;
- исключение образования рабочих швов и операций с их организацией;
- сокращение сроков монтажа конструкции;
- сокращение количества рабочих на строительной площадке;
- исключение необходимости использования подмостей, лестниц, стремянок.

Полученный в конструкции бетон характеризуется гомогенной структурой, имеющей однородный, равномерно распределенный состав без значительных пустот или неоднородностей по всему объему. Появляется возможность получения более высоких значений расчетного сопротивления бетона по сравнению с бетоном того же состава, но заформованным с использованием традиционных технологий.

Однако ввиду отсутствия нормативных документов с рекомендуемыми значениями технологических параметров формирования для метода ВБС (верхнего и нижнего пределов скорости заполнения ТБК, диаметров бетононасосов, величин избыточного давления), целесообразно провести более широкие комплексные исследования

в данном направлении. Для строительной практики также необходимо разработать методику ультразвукового контроля качества бетона в колоннах.

Список литературы / References

1. Ведерникова А.А. Совершенствование методики расчета трубобетонных элементов обратным численно-аналитическим методом и ее применение. *Инженерный вестник Дона*. 2023;11(107):437–449. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8798> (дата обращения: 29.12.2025).
Vedernikova AA Development and Implementation of the Concrete Filled Steel Tube Elements Inverse Numerical-Analytical Method. *Engineering Journal of Don*. 2023;11(107):437–449. (In Russ.) URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8798> (accessed: 29.12.2025)
2. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А., Парфенов В.В. Оценка несущей способности трубобетонных колонн при стандартном пожаре. *Сборник трудов, посвященных памяти академиков РААСН В.М. Бондаренко и Г.Л. Осипова*. Москва: НИИСФ РААСН; 2025. С. 233–241.
Krishan AL, Rimshin VI, Astafeva MA, Parfenov VV Evaluation of the Bearing Capacity of Concrete Filled Steel Tube Columns under Standard Fire. *Collection of Works Dedicated to the Memory of Academicians of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences V.M. Bondarenko and G.L. Osipov*. Moscow. Publishing House of the Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; 2025. 233–241. (In Russ.)
3. Кондратьева Т.Н., Чепурненко А.С. Применение искусственного интеллекта к прогнозированию прочности трубобетонных колонн. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(3):40–48. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-3-40-48>
Kondratieva TN, Chepurnenko AS Prediction of the Strength of the Concrete-Filled Tubular Steel Columns Using the Artificial Intelligence. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(3):40–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-3-40-48>
4. Хазов П.А., Помазов А.П. Экспериментальное исследование продольного и поперечного изгиба трубобетонных стержней. *Жилищное строительство*. 2023;12:66–72. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-66-71>
Khazov PA, Pomazov AP Experimental Study of Longitudinal and Transverse Bending of Pipe Concrete Rods. *Housing Construction*. 2023;12:66–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-66-71>
5. Chen L., Fakharian P., Eidgahee D.R., Haji M., Arab A., Nouri Y. Axial compressive strength predictive models for recycled aggregate concrete filled circular steel tube columns using ANN, GEP, and MLR. *Journal of Building Engineering*. 2023;77:107439. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107439>
6. Kakizaki M., Abe Y., Ookita Y., Abe A., Hara H. Application of super workable concrete to basement columns and walls caused by concrete construction by upside-down method. *AIJ Journal of Technology and Design*. 1995;1(1):24–29. <https://doi.org/10.3130/aijt.1.24>
7. Phan HD, Le TC Mechanical Behavior of Concrete Filled Steel Tubular Columns with High Strength Materials Subjected to Various Compression Loading Scenarios. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*. 2025;19(1):93–107. [https://doi.org/10.31814/stce.huice2025-19\(1\)-08](https://doi.org/10.31814/stce.huice2025-19(1)-08)
8. Kakizaki M, Aoki H, Nagao K, Asamura T, Abe Y, Suzuki K Pushing Up of Super Workable Concrete into Steel Tubular Columns of Subway Station Constructions. *AIJ Journal of Technology and Design*. 1997;3(5):1–6. (In Japanese) https://doi.org/10.3130/aijt.3.1_2
9. Ерофеев В.Т., Тараканов О.В., Ананьев С.В., Леснов В.В., Ерофеева И.В., Санягина Я.А. и др. Повышение эффективности дисперсного армирования в высокопрочных самоуплотняющихся и каркасных бетонах. *Строительные материалы*. 2024;3:15–24. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-822-3-15-24>
Erofeev VT, Tarakanov OV, Ananyev SV, Lesnov VV, Erofeeva IV, Sanyagina YaA et al. The Increasing the Efficiency of Fiber Reinforced High-Strength Self-Compacting and Carcass Concrete. *Construction Materials*. 2024;3:15–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-822-3-15-24>
10. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Селютин Н.М. Самоуплотняющийся высокопрочный керамзитобетон класса В50–В65 — новое поколение легких бетонов для конструкций высотных зданий. *Строительные материалы*. 2023;4:42–50. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-42-50>
Kapriyelov SS, Sheinfeld AV, Selyutin NM Self-Compacting High-Strength Expanded Clay Concrete of B50-B65 Classes – a New Generation of Expanded Clay Concretes for Structures of High-Rise Building. *Construction Materials*. 2023; 4:42–50 (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-42-50>
11. Zende A.A., Momin A.I.A., Khadiranaikar R.B., Alsabhan A.H., Alam S., Khan M.A. et al. Mechanical properties of high-strength self-compacting concrete. *ACS Omega*. 2023;8(20):18000–18008. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01204>

Об авторах:

Кришан Анатолий Леонидович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова (455000, Российская Федерация, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), kris_al@mail.ru

Парфенов Вячеслав Викторович, директор ООО «Структура Эксперт» (620026, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Горького, 65), [ORCID](#), vvp@structura-expert.com

Вавилин Никита Вячеславович, главный конструктор ООО «Структура Эксперт» (620026, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Горького, 65),

Астафьева Мария Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова (455000, Российская Федерация, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), skymanika@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А.Л. Кришан: научное руководство, анализ результатов исследования, корректировка выводов.

В.В. Парфенов: формирование основной концепции, цели и задачи исследования.

Н.В. Вавилин: проведение расчетов, подготовка текста.

М.А. Астафьева: доработка текста, анализ результатов, формулирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Anatoly L. Krishan, Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38 Lenin Ave., Magnitogorsk, 38455000, Russian Federation), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), kris_al@mail.ru

Vyacheslav V. Parfenov, Head of LLC Struktura Expert (65 Gorky Str., Yekaterinburg, 620026, Russian Federation), [ORCID](#), vvp@structura-expert.com

Nikita V. Vavilin, Chief Architect of LLC Struktura Expert (65 Gorky Str., Yekaterinburg, 620026, Russian Federation), [ORCID](#), vavilin@structura-expert.com

Mariia A. Astafeva, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38 Lenin Ave., Magnitogorsk, 38455000, Russian Federation), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), skymanika@mail.ru

Claimed Contributorship:

AL Krishan: scientific supervision, analysis of research results, revision of conclusions.

VV Parfenov: formation of the main concept, goals and objectives of the study.

NV Vavilin: calculations, text preparation.

MA Astafeva: text revision, analysis of results, formulation of conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

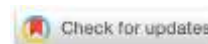
Поступила в редакцию / Received 09.01.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 19.01.2026

Принята к публикации / Accepted 08.02.2026

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 624.044

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-15-22>

Моделирование эффективности демпферных систем в строительных конструкциях при сейсмическом воздействии с использованием обобщенного процесса Орнштейна-Уленбека



И.Н. Гарькин¹, Л.С. Сабитов², Е.М. Тупикова¹

EDN: ZCZMVA

¹ Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация

✉ igor_garkin@mail.ru

Аннотация

Введение. На современном этапе развития науки и техники активно разрабатываются вопросы вибрационной защиты зданий, особенно для специальных сооружений высокого класса ответственности, разрабатываются и испытываются различные конструкции демпферов. Моделирование отклика демпферных систем является актуальной задачей, существуют различные подходы к ее решению, как детерминистские, так и стохастические. В настоящей работе показаны особенности стохастического подхода в варианте математической модели обобщенного процесса Орнштейна-Уленбека. Благодаря использованию данной модели стало возможно оценить эффект применения нелинейного демпфера в конкретном случае и сделать выводы о преимуществах его использования.

Материалы и методы. Основным методом исследования в настоящей работе является решение стохастического дифференциального уравнения, приводится численный эксперимент на реальном примере анализа динамической реакции турбоагрегата с использованием вязкоупругого нелинейного демпфера на случайное сейсмическое воздействие. Анализируется применение обобщенного процесса Орнштейна-Уленбека для математического моделирования динамического отклика демпферных устройств при сейсмическом воздействии на критически важные объекты энергетической инфраструктуры.

Результаты исследования. Предлагается стохастическая модель, которая одновременно учитывает случайную природу сейсмических возмущений и нелинейные реологические характеристики демпферов. Результаты численного эксперимента подтверждают, что при расчете по описанной модели обосновано применение нелинейного демпфера, среднеквадратичные значения отклика по перемещению снижаются более чем в два раза, что способствует уменьшению сейсмических рисков для турбоагрегата, повышает запас его динамической устойчивости и надежность работы в условиях случайных воздействий.

Обсуждение и заключение. Разработанная методология обеспечивает количественную оценку эффективности различных классов демпферных систем и позволяет выполнять параметрическую оптимизацию их настроек с целью максимизации защитной способности и снижения вибрационно-динамических нагрузок на энергетическое оборудование. Теоретическая значимость работы заключается в предложенной авторами методике расчетов, практическая значимость — в оценке и рекомендациях по применению вязкопластичных демпферов для сооружений высокого класса ответственности.

Ключевые слова: процесс Орнштейна-Уленбека, демпферные устройства, сейсмостойкость, энергетические объекты, стохастическое моделирование, виброзащита

Для цитирования. Гарькин И.Н., Сабитов Л.С., Тупикова Е.М. Моделирование эффективности демпферных систем в строительных конструкциях при сейсмическом воздействии с использованием обобщенного процесса Орнштейна-Уленбека. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2026;5(1):15–22. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-15-22>

Modeling the Effectiveness of Damping Systems in Building Structures under Seismic Impact Using the Generalized Ornstein-Uhlenbeck Process

Igor N. Garkin¹  , Linar S. Sabitov² , Evgeniya M. Tupikova¹ 

¹ Peoples' Friendship University of Russia – RUDN University, Moscow, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

 igor_garkin@mail.ru

Introduction. At the current stage of science and technology development, the issues of vibration protection of buildings are being intensively investigated, particularly for special structures of a high responsibility class. Various damper designs are also being developed and tested. Modeling the response of damper systems is an urgent task with both deterministic and stochastic approaches to solving it. This study demonstrates the features of the stochastic approach in a variant of the mathematical model of the generalized Ornstein-Uhlenbeck process. It is possible to the effect of using a nonlinear damper in a specific case can be evaluated by means of this model, and the conclusions can be made regarding its benefits.

Materials and Methods. The major research method is the solution of a stochastic differential equation. A numerical experiment is shown with a real example of analyzing the dynamic response of a turbo unit with a viscoelastic nonlinear damper to a random seismic impact. The application of the generalized Ornstein-Uhlenbeck process for mathematical modeling of the dynamic response of damping devices to seismic impacts on critical energy infrastructure is analyzed.

Research Results. A stochastic model is set forth that takes into account both the random nature of seismic excitations and the nonlinear rheological characteristics of dampers. The results of the numerical experiment confirm that while calculating by means of the described model, the use of a nonlinear damper is justified, the mean-square values of the displacement response are reduced by more than two times helping to reduce seismic risks for the turbine unit as well as to increase its dynamic stability and reliability of operation under the action of random impacts.

Discussion and Conclusions. The developed methodology provides a quantitative assessment of the effectiveness of a variety of classes of damper systems and allows for parametric optimization of their settings in order to maximize their protective capacity and to reduce the vibration and dynamic loads on energy equipment. The theoretical significance of the study is the suggested calculation methodology, while the practical significance is in the assessment and recommendations for making use of viscoelastic dampers for a high responsibility class of structures.

Keywords: Ornstein-Uhlenbeck process, damping devices, earthquake resistance, energy facilities, stochastic modeling, vibration protection

For citation. Garkin IN, Sabitov LS, Tupikova EM Modeling the Effectiveness of Damping Systems in Building Structures under Seismic Impact Using the Generalized Ornstein-Uhlenbeck Process. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(1):15–22. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-15-22>

Введение Расчет зданий на сейсмические и динамические нагрузки относится к развивающимся и наиболее актуальным разделам современной строительной механики, работы множества исследователей посвящены исследованиям работы сооружений в условиях сейсмике и применению демпфирующих устройств различной конструкции [1–7] для защиты зданий от вибраций и предотвращения колебаний [8–14]. Обеспечение сейсмической устойчивости объектов энергетической инфраструктуры является ключевым условием поддержания надежности и непрерывности энергоснабжения на региональном и межсистемном уровнях. Критически важные элементы энергосистемы — атомные и тепловые электростанции, распределительные подстанции, протяженные линейные объекты, включая воздушные и кабельные линии электропередачи, — подвержены значительному спектру повреждений при воздействии сейсмических колебаний различной интенсивности и частотного состава. Механизмы деградации включают потерю устойчивости опорных конструкций, возникновение резонансных режимов в гибких пролетах и подвесах, нарушение целостности фундаментов и анкерных узлов, отказ оборудования вторичных систем вследствие превышения допустимых перемещений и ускорений. В этой связи особое значение приобретает корректный выбор и параметрическая настройка демпферных систем, предназначенных для снижения динамических откликов и перераспределения инерционных нагрузок [15, 16]. Традиционные детерминистические подходы к расчету демпфирующих устройств и виброизоляции, основанные на регламентных акселерограммах и фиксированных сценариях нагружения, зачастую не отражают вариабельность реальных сейсмических воздействий, их нестационарность, межсобытийную и внутрисобытийную изменчивость, возможные нелинейные эффекты в ответе конструкции. В результате формируемые проектные решения могут быть чувствительны к неопределенностям входных параметров, что приводит либо к неэффективному перерасходу ресурсов,

либо к недооценке вероятности отказа. Стохастическое моделирование динамики «грунт–сооружение–оборудование» с использованием марковских процессов, в частности процессов Орнштейна-Уленбека (ОУ), предоставляет формальный аппарат для описания случайной составляющей сейсмического воздействия и отклика системы в вероятностной постановке. Процесс ОУ, обладающий свойствами гауссовости, стационарности по приращениям и средневозвратности, позволяет аппроксимировать фильтрованный белый шум с заданной корреляционной структурой, что делает его удобным для моделирования не только входного ускорения основания, но и обобщенных возмущений, формируемых переходом волновых полей через геологические слои и опорные части. Расширенные постановки включают в себя кусочно-стационарные и нестационарные модификации ОУ-процессов с медленно изменяющимися параметрами дисперсии и частоты доминирующих компонент, векторные модели для согласованного описания многокомпонентных записей (две горизонтальные и вертикальная составляющие) [12]. Интеграция таких стохастических представлений в уравнения движения механических подсистем с линейным или слабо нелинейным демпфированием позволяет получить аналитические или квазизамкнутые выражения для статистик отклика: спектральных плотностей ускорений и перемещений, дисперсий относительных перемещений, вероятностей превышения предельных состояний, средних времен до отказа при заданных порогах. Для демпферных устройств с нелинейной характеристикой (например, вязкоупругие вставки с зависимостью модуля от частоты и температуры, фрикционные и вязкопластические демпферы, инерционные масс-демпферы) применимы методы эквивалентного линеаризования, стохастического усреднения и техники Фоккера-Планка-Колмогорова для оценки стационарного и переходного распределений состояний. Это обеспечивает получение вероятностных показателей эффективности демпфирования, включая кривые риска и функции уязвимости для элементов оборудования и конструктивных систем. Практическая методология проектирования в стохастической постановке включает: калибровку параметров входного сейсмического процесса на основе региональных аттенуационных отношений и базы акселерограмм; идентификацию параметров демпферов по экспериментальным кривым гистерезиса и частотно-зависимым модулям; построение стохастических моделей взаимодействия сооружения с основанием, учитывающих импеданс фундамента и радиационное демпфирование; проведение вероятностного динамического анализа во временной и частотной области с оценкой чувствительности к ключевым неопределенностям. Оптимизация параметров демпфирующих устройств формулируется как задача минимизации функционалов риска (например, математического ожидания ущерба или вероятности превышения предельных откликов за срок службы) при ограничениях по массе, габаритам, технологичности и эксплуатационной надежности. Для объектов повышенного уровня ответственности целесообразно использовать многоцелевую оптимизацию с критерием робастности к вариациям входных процессов и деградации свойств материалов во времени [17, 18]. Дополнительное повышение достоверности достигается путем комбинирования процессов Орнштейна-Уленбека с физически информированными моделями источника, пути распространения и приповерхностных условий, использованием байесовских процедур обновления параметров по данным мониторинга. Встроенные системы регистрации отклика оборудования и сооружений позволяют в ходе эксплуатации выполнять идентификацию и онлайн-коррекцию стохастических моделей, что обеспечивает адаптивную перенастройку демпферов с переменными характеристиками и раннее выявление деградационных изменений. Для линейной части инфраструктуры особую актуальность имеют пространственно-коррелированные многоточечные модели сейсмического возбуждения, что позволяет учитывать несинхронность воздействий на протяженные линии и каскадные эффекты в сети. Таким образом, переход от детерминистических к стохастическим методам анализа и проектирования демпферных систем на основе процессов Орнштейна-Уленбека обеспечивает более адекватное представление природной вариабельности сейсмических воздействий, позволяет получать количественные вероятностные оценки эффективности защитных мер и формировать научно обоснованные решения для повышения надежности и живучести энергетических объектов на всем жизненном цикле — от проектирования и строительства до эксплуатации и модернизации. В результате достигается баланс между безопасностью, экономической эффективностью и требованиями нормативного регулирования при наличии существенных неопределенностей внешних воздействий и параметров систем [19].

Материалы и методы. Основная исследовательская задача состоит в построении целостной математической модели сейсмостойкой защиты, которая одновременно отражает стохастическую природу возбуждающих воздействий, адекватно описывает нелинейную динамику демпферных устройств различных типов, поддерживает параметрическую оптимизацию и обеспечивает вероятностную оценку надёжности функционирования защищаемого оборудования. В отличие от распространенных подходов, опирающихся на избыточно упрощённые представления о сейсмическом воздействии или игнорирующих случайный характер динамических процессов, предлагаемая постановка ориентирована на статистически согласованное описание входных сигналов, точный учёт нелинейностей в подсистемах рассеяния энергии и строгую увязку критериев эффективности с показателями

риска и отказоустойчивости. Ключевой элемент модели — описание сейсмического входа как случайного процесса с заданными спектрально-временными характеристиками. Для этого целесообразно использовать семейства нестационарных гауссовских или квазистационарных процессов с эволюционным спектром мощности, генераторы акселерограмм, калиброванные по нормативным откликовым спектрам и статистике длительности и интенсивности. Такая постановка позволяет корректно воспроизводить вариабельность интенсивности, частотный дрейф и временную модуляцию, существенные для точной оценки отклика. Динамическая подсистема демпфирования должна моделироваться в нелинейной постановке с учётом реальных конститутивных законов: билинейных и многостепенных гистеретических моделей для вязкоупругих элементов, силовых зависимостей для вязких демпферов, моделей с зависимостью параметров от температуры и амплитуды деформаций, возможных предельных состояний (уступ, насыщение). Для повышения идентифицируемости и вычислительной устойчивости рекомендуется применять редуцированные описания на основе операционных моделей с экспериментально верифицированными диапазонами параметров. Поскольку задачи настройки демпферов в реальных сооружениях имеют многокритериальный характер, модель должна включать формализованные целевые функции и ограничения: минимизацию передаваемых ускорений и перемещений, ограничение усилий в связях, обеспечение эксплуатационной пригодности при многоуровневых сценариях возбуждения, требования по стоимости, массе и технологичности. Оптимизация параметров демпферов может осуществляться в рамках вероятностной постановки с применением методов градиентно-стохастической оптимизации, эволюционных стратегий или байесовской оптимизации с суррогатными моделями, что существенно снижает вычислительные затраты при сохранении точности оценок. Вероятностная оценка надёжности должна быть интегрирована в вычислительный контур через метрики риск-ориентированного проектирования. Это включает вычисление функций превышения предельных состояний, оценку вероятности отказа по выбранным критериям работоспособности и доверительных интервалов для ключевых откликов. Для повышения эффективности методов Монте-Карло следует применять многоуровневые и многофидельные схемы, важностное взвешивание, редукцию размерности входного пространства посредством стохастических мод на основе расширенных полиномов Чебышёва/Лежандра или гауссовых процессов. С точки зрения численной реализации предпочтительна модульная архитектура, сочетающая прямую временную интеграцию нелинейной системы уравнений движения с адаптивными схемами шага и устойчивыми интеграторами, специализированные солверы для негладких гистеретических законов, блок вероятностного моделирования, обеспечивающий генерацию ансамблей входных воздействий и статистическую обработку откликов. Для ускорения вычислений целесообразно использовать редуцирование моделей на базе POD/DEE или обучаемые суррогаты (например, физически информированные нейросети) с обязательной апостериорной валидацией на независимых сценариях. Предлагаемая концепция позволяет устранить ограничения существующих подходов за счёт согласованного учёта случайности сейсмического возбуждения, точного описания нелинейных демпферных механизмов и прямой увязки параметрической оптимизации с вероятностными критериями надёжности [20]. Это создаёт основу для разработок, ориентированных на практическое проектирование, обеспечивает масштабируемость под разные классы сооружений и типов демпферов и даёт воспроизводимые количественные оценки эффективности систем защиты с контролируемой неопределённостью.

Рассмотрим реальный пример. Исходные параметры системы:

Масса турбоагрегата $m = 50\,000$ кг.

Собственная частота колебательной системы $f_0 = 2,5$ Гц.

Коэффициент демпфирования (для линейного случая) $\zeta = 0,02$.

Параметры случайного процесса Орнштейна-Уленбека:

Темп возврата к среднему $\theta = 1,5 \text{ с}^{-1}$, дисперсия интенсивности $\sigma = 0,3 \text{ м}^2/\text{с}^2$, математическое ожидание возмущения $\mu = 0$.

Параметры вязкоупругого демпфера:

Коэффициент демпфирования $c_d = 2 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}$, показатель силы нелинейности $\sigma = 1,8$.

Стационарная дисперсия смещений без демпфера. Для одномассной системы, подвергающейся случайному возбуждению типа Орнштейна-Уленбека, дисперсия стационарных смещений выражается как

$$\sigma_x^2 = \frac{\sigma^2}{2\theta\omega_0^2},$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$ — собственная угловая частота системы.

Подставим исходные значения:

$$\omega_0 = 2 \cdot 3,14 \cdot 2,5 \approx 15,71 \text{ рад/с};$$

$$\alpha_x^2 = \frac{0,09}{2 \cdot 1,5 \cdot 15,71^2} \approx \frac{0,09}{739,5} \approx 1,22 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Корректировка демпфирования при наличии нелинейного демпфера.

При применении вязкоупругого демпфера с нелинейной характеристикой вида

$$F = c_d x^\alpha.$$

проявляется его влияние на эффективную величину демпфирования при расчете динамических параметров. Эффективный коэффициент демпфирования оценивается приближенно по формуле:

$$\zeta_{\text{эфф}} = \zeta + \frac{c_d + \sigma_x^{\alpha-1}}{2 m \omega_0}.$$

Здесь σ_x — стандартное отклонение скорости, оцененное для нелинейной системы. Для выбранных параметров

$$\zeta_{\text{эфф}} \approx 0,02 + 0,089 = 0,109.$$

Снижение стационарной дисперсии смещений за счет увеличенного демпфирования приблизительно можно оценить как

$$\frac{\sigma_x^2}{\sigma_{x_0}^2} \approx \frac{\zeta}{\zeta_{\text{эфф}}}.$$

Подставляя численные значения,

$$\frac{\sigma_x^2}{\sigma_{x_0}^2} \approx \frac{0,02}{0,109} \approx 0,18,$$

что эквивалентно уменьшению среднеквадратичного отклонения смещений вследствие действия демпфера в 2,4 раза.

Таким образом, применение нелинейного вязкоупругого демпфера существенно увеличивает эффективное демпфирование системы. За счет этого среднеквадратичные значения отклика по перемещению снижаются более чем в два раза, что способствует уменьшению сейсмических рисков для турбоагрегата, повышает запас его динамической устойчивости и надежность работы в условиях случайных воздействий. Данный подход можно рекомендовать для модернизации виброзащиты крупных энергетических агрегатов в сейсмоопасных регионах.

Результаты исследования. В настоящем исследовании продемонстрирована высокая адекватность обобщенного процесса Орнштейна-Уленбека как стохастической модели для описания входных сейсмических воздействий, применяемых при анализе динамики строительных сооружений. Использование данной модели оправдано её аналитической прозрачностью, позволяющей получать замкнутые выражения для ключевых статистических характеристик, включая спектральные плотности, функции корреляции, дисперсии отклика и вероятности превышения критических уровней. Это существенно облегчает решение инженерных задач по оценке и прогнозированию поведения сооружений при случайных динамических воздействиях.

Показано, что применение демпфирующих устройств с нелинейной силовой характеристикой, в отличие от линейных аналогов, позволяет существенно повысить эффективность рассеивания энергии во время интенсивных сейсмических колебаний случайной природы. Данный эффект обусловлен способностью нелинейных демпферов к амплитудно-зависимой адаптации демпфирующего усилия, что приводит к более равномерному перераспределению энергии по спектру возбуждающих частот. Такая адаптация способствует уменьшению вероятности возникновения локальных резонансов и снижению уровня экстремальных откликов конструкции. Наиболее высокая энергорассеивающая способность наблюдается для демпферов с нелинейным показателем α в диапазоне 1,6–2,0, что подтверждено теоретическим анализом и численным моделированием.

Разработана комплексная методология вероятностно-ориентированной параметрической оптимизации демпфирующих систем, позволяющая учитывать статистическую неоднородность и региональные особенности сейсмических воздействий. Предложенный подход интегрирует настройку параметров стохастической модели входного процесса с многоцелевой оптимизацией эффективности виброзащиты с ограничениями по материальным ресурсам и соблюдением актуальных нормативных требований. Данная методология предполагает использование процедур идентификации статистических характеристик сейсмических воздействий на рассматриваемой территории и адаптацию параметров демпфирующих устройств с учётом вероятностных критериев надёжности и эксплуатационной эффективности.

Обсуждение и заключение. Обобщенный процесс Орнштейна-Уленбека представляет собой строгую математическую и вычислительно эффективную основу для формализации стохастической природы сейсмических воздействий и аналитической оценки динамического отклика инженерных систем. Применение нелинейных демпферов, обладающих показателем нелинейности α порядка 1,6–2,0, обеспечивает существенное превосходство по показателям энергорассеивания и ограничению экстремальных откликов по сравнению с традиционными линейными системами. Разработанная вероятностно-ориентированная методология параметрической оптимизации открывает возможности гибкой адаптации характеристик демпферов к различным региональным особенностям сейсмической активности, учитывая изменчивость входных процессов и специфику строительных объектов.

В перспективе рекомендуется расширить экспериментальные исследования с целью верификации математических моделей и повышения точности параметризации материалов и элементов сопряжения. Дополнительно требуется развитие теории и практики анализа неопределённостей, связанных как с

характеристиками сейсмических воздействий, так и с физико-механическими свойствами демпфирующих устройств. Это позволит повысить общую надёжность и инженерную обоснованность принимаемых конструктивных решений в области сейсмостойкого строительства, создать предпосылки для внедрения интеллектуальных систем адаптивной виброзащиты, основанных на стохастических моделях современного уровня.

Список литературы

1. Khan IU, Usman M, Tanveer M Vibration Control of an Irregular Structure Using Single and Multiple Tuned Mass Dampers. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*. 2021;176(10):778–790. <https://doi.org/10.1680/jstbu.21.00011>
2. Elias S, Rupakhety R, Olafsson S Tuned Mass Dampers for Response Reduction of a Reinforced Concrete Chimney Under Near-Fault Pulse-Like Ground Motions. *Frontiers in Built Environment*. 2020;6. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00092>
3. Brysin AN, Solovyev VC, Mikayeva SA, Nikiforov AN Seismic and Shock Effects Reduction by Vibration Protection Systems Equipped with Amplifiers of Inertial Characteristics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019;698(2):022049. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/2/022049>
4. Wang L, Zhou Y, Shi W Dynamic Test, Monitoring and Active Control of Non-Resonant Running-Induced Vibration for Floor Structure. *Structures*. 2024;63:106348. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106348>
5. Симбиркин В.Н., Панасенко Ю.В., Курнавин В.В. Сравнительный анализ применения различных моделей демпфирования при расчете сейсмической реакции сооружений в ПК STARK ES. *Железобетонные конструкции*. 2023;2:58–64. <https://doi.org/10.22227/2949-1622.2023.2.58-64>
- Simbirkin VN, Panasenko YuV, Kurnavin VV Analysis of Various Damping Models in The Simulation of the Seismic Response of Structures in the STARK ES Software. *Reinforced Concrete Structures*. 2023;2(2):58–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/2949-1622.2023.2.58-64>
6. Kim YC, Lee HW, Hu JW Experimental Performance Evaluation of Elastic Friction Damper. *Case Studies in Construction Materials*. 2023;18:e01823. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01823>
7. Shirai K, Sano T, Suzui Y Energy Response of a Passive Variable Friction Damper and Numerical Simulation on the Control Effects for High-Rise Buildings. *Structural Control Health Monitoring*. 2022;29. <https://doi.org/10.1002/stc.3124>
8. Stanekzai M, Elias S, Chae Y Research Advances in Hybrid Vibration Control Systems. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000685](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000685)
9. Aggumus H, Guclu R Hybrid Experimental Investigation of MR Damper Controlled Tuned Mass Damper Used for Structures under Earthquakes. *Journal of Soft Computing and Artificial Intelligence*. 2022;3(1):28–33. <https://doi.org/10.55195/jsc.ai.1122514>
10. Pecora R A Practical Approach for the Mitigation of Seismic-Induced Vibrations in Slender Metallic Structures through Magnetorheological Fluid Dampers. *Applied Sciences*. 2022;12(9):4155. <https://doi.org/10.3390/app12094155>
11. Пушкарев И.А. Анализ колебаний плиты перекрытия с двумя источниками вибрации. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. 2024;24(3):24–32. <http://dx.doi.org/10.14529/build240303>
- Pushkarev IA The Analysis of Vibrations in a Floor Plate with Two Sources of Vibration. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2024;24(3):24–32. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.14529/build240303>
12. Пушкарев И.А. Структурная схема средств виброзащиты строительных конструкций с подвижными нагрузками. *Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова*. 2022;25:27–36. <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2022-4-27-36>
- Pushkarev IA Structural Diagram of Vibration Protection Means of Building Structures with Moving Loads. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2022;25:27–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2022-4-27-36>
13. Etedali S, Akbari M, Seifi M Friction Tuned Mass Dampers in Seismic-Excited High-Rise Buildings with SSI Effects: A Reliability Assessment. *Journal of Earthquake and Tsunami*. 2023;17(2):2250022. <https://doi.org/10.1142/S1793431122500221>
14. Tuninetti V, Gómez Á, Bustos F, Oñate A, Hinojosa J, Gallo C et al. Computational Modeling of U-Shaped Seismic Dampers for Structural Damage Mitigation. *Applied Sciences*. 2024;14(22):10238. <https://doi.org/10.3390/app142210238>
15. Абдуллазянов Э.Ю., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н., Закирова М.А. Ресурсно-оптимизационный подход при ремонтных работах на объектах энергетического строительства башенного типа. *Строительное производство*. 2025;2:105–111.

Abdullazyanov EY, Sabitov LS, Garkin IN, Zakirova MA Resource-Optimization Approach during Repair Work at Tower-Type Energy Construction Facilities. *Construction Production*. 2025;2:105–111. (In Russ.)

16. Евсеев А.Е., Гарькин И.Н., Абдуллазанов Э.Ю. Использование дифференциальных уравнений движения тела при определении параметров виброзащиты. *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. 2024;4(50):127–131. <https://doi.org/10.52684/2312-3702-2024-50-4-127-131>

Yevseyev AYe, Garkin IN, Abdullazyanov EYu Using Differential Equations of Body Motion in Determining Vibration Protection Parameters. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2024;4(50):127–131. (In Russ.) <https://doi.org/10.52684/2312-3702-2024-50-4-127-131>

17. Коротков В.А. Анализ динамических методов расчета строительных конструкций АЭС. *Вестник НИИЦ Строительство*. 2023;2(37):7–17. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-7-17](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-7-17)

Korotkov VA Analysis of Dynamic Methods for Calculating NPP Building Structures. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;2(37):7–17. (In Russ.) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-7-17](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-7-17)

18. Симбиркин В.Н., Панасенко Ю.В., Курнавин В.В. Моделирование работы демпфирующих устройств при расчете сейсмической реакции конструкций здания аэровокзала. *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022;2:118–124 <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-2-118-124>

Simbirkin VN, Panasenko YV, Kurnavin VV Modelling of Damping Devices in the Seismic Analysis of an Airport Terminal Structures. *Earthquake Engineering Constructions Safety*. 2022;2:118–124 (In Russ.) <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-2-118-124>

19. Симбиркин В.Н., Панасенко Ю.В., Курнавин В.В. Моделирование работы жидкостно-вязкостных демпферов при расчете сейсмической реакции сооружений. *Строительная механика и расчет сооружений*. 2022;2(301):2–8. URL: https://stroy-mex.narod.ru/index/2022_2/0-270 (дата обращения 11.11.2025)

Simbirkin VN, Panasenko YV, Kurnavin VV Modelling the Operation of Liquid-Viscous Dampers when Calculating the Seismic Response of Structures. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2022;2(301):2–8. (In Russ.) URL: https://stroy-mex.narod.ru/index/2022_2/0-270 (дата обращения 11.11.2025)

20. Саденко Д.С., Гарькин И.Н., Арискин М.В. Научно-техническое сопровождение работ по усилению строительных конструкций монолитного многоэтажного жилого дома. *Региональная архитектура и строительство*. 2023;3(56):122–127.

Sadenko DS, Garkin IN, Ariskin MV Scientific and Technical Support of Work on Strengthening the Building Structures of a Monolithic Multi-Storey Residential Building. *Regional Architecture and Engineering*. 2023;3(56):122–127. (In Russ.)

Об авторах:

Гарькин Игорь Николаевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой архитектуры, реставрации и дизайна Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы (117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6), [ScopusID](#), [ORCID](#), igor_garkin@mail.ru

Сабитов Линар Салихзанович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии и организации строительного производства Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, Российская Федерация, г. Москва, Ярославское шоссе, 26), [ORCID](#), sabitov-kgasu@mail.ru

Тупикова Евгения Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительства и конструкционных материалов Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы (117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), tupikova-em@rudn.ru

Заявленный вклад соавторов:

И.Н. Гарькин: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

Л.С. Сабитов: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

Е.М. Тупикова: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Igor N. Garkin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Architecture, Restoration and Design of the Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia (6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow, 117198, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), igor_garkin@mail.ru

Linar S. Sabitov, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production at the National Research Moscow State University of Civil Engineering (26 Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation), [ORCID](#), sabitov-kgasu@mail.ru

Evgeniya M. Tupikova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Construction Technologies and Structural Materials of the Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia (6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow, 117198, Russian Federation), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), tupikova-em@rudn.ru

Claimed contributorship:

IN Garkin: formation of the basic concept, aims of the study, calculations, preparation of the manuscript, formation of the conclusions.

LS Sabitov: formation of the basic concept, aims of the study, calculations, preparation of the manuscript, formation of the conclusions.

EM Tupikova: scientific supervision, analysis of research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 19.11.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 09.12.2025

Принята к публикации / Accepted 27.12.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 624.042.41

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-23-31>

Современные подходы к исследованию аэродинамической устойчивости зданий сложной криволинейной формы



EDN: TKIRJA

М.И. Телемаков  , Н.А. Бузало 

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова,
г. Новочеркасск, Российская Федерация

 makstelemakov@gmail.com

Аннотация

Введение. Современная архитектура характеризуется активным использованием зданий сложной криволинейной формы, обладающих высокой выразительностью, но требующих решения новых инженерных задач, связанных с обеспечением их аэродинамической устойчивости. Нормативные методы расчёта ветровых нагрузок ориентированы преимущественно на здания простой геометрической формы и не учитывают особенностей обтекания свободных оболочек. Это обуславливает необходимость систематизации современных подходов к анализу ветрового воздействия на подобные сооружения. Целью настоящего исследования является обобщение и сравнение нормативных, экспериментальных и численных методов оценки аэродинамической устойчивости зданий сложной формы.

Материалы и методы. Объектом исследования является здание с биоморфной трёхлучевой структурой, характеризующееся плавными очертаниями и сложной пространственной топологией. Для анализа аэродинамических характеристик выполнено численное моделирование ветрового потока с применением программы RWIND Simulation. Исследование выполнено с целью определения особенностей обтекания и распределения аэродинамических нагрузок на поверхность здания сложной формы.

Результаты исследования. В результате выполненных расчетов получены распределения давления, скоростей и коэффициентов давления по поверхности здания. Выявлены зоны локального повышения и разрежения давления в областях сопряжения объёмов и углублений кровли. Установлено, что криволинейная форма здания способствует снижению интегрального аэродинамического сопротивления, однако вызывает образование локальных вихревых структур, которые необходимо учитывать при проектировании фасадных и кровельных систем.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты подтверждают эффективность применения методов вычислительной гидродинамики (CFD — Computational Fluid Dynamics) для анализа аэродинамических свойств зданий сложной формы. Комплексное использование нормативных, экспериментальных и численных подходов обеспечивает более точную оценку ветровых воздействий и способствует формированию современной методологии проектирования аэродинамически устойчивых архитектурных сооружений.

Ключевые слова: аэродинамическая устойчивость зданий, ветровое воздействие, здания сложной геометрии, криволинейные оболочки, вычислительная гидродинамика, численное моделирование, аэродинамическое давление, вихревые структуры обтекания, ветровые нагрузки на сооружения

Для цитирования. Телемаков М.И., Бузало Н.А. Современные подходы к исследованию аэродинамической устойчивости зданий сложной криволинейной формы. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2026;5(1):23–31. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-23-31>

Modern Approaches to Studying the Aerodynamic Stability of Complex Curvilinear Buildings

Maxim I. Telemakov  , Nina A. Buzalo 

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

 makstelemakov@gmail.com

Abstract

Introduction. Modern architecture is characterized by the extensive use of buildings with complex curvilinear forms that are high expressive yet require tackling new engineering challenges associated with ensuring their aerodynamic stability. Normative methods for calculating wind loads are largely focused on buildings with a simple geometric shape and fail to account for the flow characteristics of free-form shells. This highlights the need to systematize modern approaches to analyzing wind effects on such structures. The aim of the study is to summarize and compare normative, experimental, and numerical methods for assessing the aerodynamic stability of complex-shaped buildings.

Materials and Methods. The object of the study is a building with a biomorphic three-beam structure characterized by smooth contours and a complex spatial topology. In order to analyze its aerodynamic characteristics, numerical simulation of wind flow was performed using the RWIND Simulation software. The study was conducted in order to identify the flow characteristics and distribution of aerodynamic loads on the surface of a complex-shaped building.

Research Results. As a result of the calculations, distributions of the pressure, velocity, and pressure coefficients over a building surface were obtained. Zones of a local pressure increase and dilution were identified in the areas of volume junctions and roof recesses. It was found that the curvilinear form of a building contributes to a reduction in the overall aerodynamic drag; however, it also induces the formation of local vortex structures, which is to be considered in designing façade and roofing systems.

Discussion and Conclusion. The results confirm the effectiveness of applying Computational Fluid Dynamics (CFD) methods for analyzing the aerodynamic properties of complex-shaped buildings. The integrated use of normative, experimental, and numerical approaches ensures a more accurate assessment of wind effects and contributes to developing a cutting-edge methodology for designing aerodynamically stable architectural structures.

Keywords: aerodynamic stability of buildings, wind effects, complex-shaped buildings, curvilinear shells, computational fluid dynamics, numerical simulation, aerodynamic pressure, vortex flow structures, wind loads on structures

For citation. Telemakov MI, Buzalo NA Modern Approaches to Studying Aerodynamic Stability of Complex Curvilinear Buildings. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(1):23–31. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-23-31>

Введение. Архитектура XXI века характеризуется стремительным ростом числа зданий и сооружений сложной криволинейной формы. Современные технологии проектирования, моделирования и строительства, наряду с использованием новых композиционных материалов и систем ограждающих конструкций, позволяют реализовать архитектурные замыслы, ранее считавшиеся утопическими. Развитие интереса к криволинейным архитектурным структурам отражает продолжение тенденций, сформировавшихся ещё в конце XX века, когда пластичные и биоморфные формы начали рассматриваться как средство объединения эстетики, функциональности и инженерной рациональности [1]. В крупнейших мегаполисах мира появляются концертные залы с оболочковыми покрытиями, музеи с асимметричными объёмами, спортивные арены с купольными и комбинированными кровлями, а также высотные комплексы, фасады которых содержат изгибы, скрученные и торсионные элементы. Подобные сооружения формируют современный архитектурный облик городов, становятся визуальными доминантами и символами культурной идентичности регионов.

Рост доли зданий с нестандартной геометрией сопровождается новыми инженерными вызовами. Одним из ключевых факторов, определяющих безопасность, эксплуатационную надёжность и долговечность подобных сооружений, является их аэродинамическая устойчивость при воздействии ветровых нагрузок [2]. В отличие от традиционных прямолинейных или цилиндрических форм, криволинейные конструкции создают сложную структуру обтекания воздушного потока, сопровождаемую интенсивным вихреобразованием, локальными зонами отрыва и концентрацией давлений [3]. Эти явления приводят к неравномерному распределению нагрузок по поверхности, усиливают колебательные процессы и в отдельных случаях могут вызывать резонансные эффекты. Кроме того, локальные зоны повышенного давления способны вызывать повреждения фасадных систем,

светопрозрачных конструкций и элементов кровельных покрытий. В условиях плотной городской застройки взаимодействие между соседними зданиями дополнительно усложняет аэродинамическую картину, усиливая локальные вихревые зоны и повышая давление на ограждающие конструкции [4].

Проблема адекватной оценки ветрового воздействия на здания сложной формы носит комплексный характер. В инженерной практике по-прежнему преобладают нормативные методы, закреплённые в национальных и международных стандартах. В России основными документами являются СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» и СП 267.1325800.2016 «Здания и сооружения. Правила проектирования на ветровые воздействия», регламентирующие методы определения расчётного давления ветра, коэффициентов аэродинамического сопротивления и динамических характеристик. За рубежом аналогичные положения содержатся в Eurocode EN 1991-1-4, ASCE 7-22, AIJ Recommendations for Loads on Buildings (Япония) и GB 50009-2012 (Китай). Эти документы задают базовые принципы расчёта ветровых нагрузок, однако их применение к объектам со сложной геометрией ограничено, поскольку расчётные зависимости разработаны для тел простой формы — призматических, цилиндрических и купольных.

Параллельно активно развиваются экспериментальные и численные методы исследования ветровых воздействий. Аэродинамические испытания в ветровых трубах обеспечивают высокую точность и позволяют выявлять локальные зоны концентрации давлений, отрыва потока и формирования турбулентных структур. Натурные измерения на реальных сооружениях дают представление о фактическом поведении зданий в условиях естественного ветра, однако требуют значительных финансовых и временных ресурсов.

Численные методы, основанные на решении уравнений Навье–Стокса, получили развитие в рамках подхода CFD. Этот подход предусматривает дискретизацию расчётной области и численное решение уравнений движения и сохранения массы для исследуемого потока. Применение CFD позволяет анализировать нестационарные трёхмерные аэродинамические процессы вокруг объектов практически любой конфигурации и получать детализированные поля скоростей, давлений и вихревых структур. Точность таких расчётов во многом определяется выбором турбулентной модели (RANS — Reynolds-Averaged Navier-Stokes, LES — Large Eddy Simulation и гибридные DES — Detached Eddy Simulation) [5, 6], корректностью постановки граничных условий и степенью детализации расчётной сетки.

Таким образом, современное состояние исследований в области аэродинамической устойчивости зданий сложной геометрии характеризуется многообразием подходов, но отсутствием унифицированной методологии, обеспечивающей как точность расчётов, так и их практическую применимость. Это подчёркивает необходимость комплексного анализа архитектурно-строительной аэродинамики, рассматривающей взаимосвязь формы, структуры и потоков воздуха [7]. Возникает потребность в систематизации существующих методов, сопоставлении их возможностей и ограничений, а также в разработке стратегии дальнейшего развития данной научно-технической области.

Цель настоящей работы — комплексный анализ современных подходов к исследованию ветрового воздействия на здания сложной криволинейной формы. В статье рассматриваются положения нормативной базы, экспериментальные методики аэродинамических испытаний и современные технологии CFD-моделирования. Особое внимание уделено сравнительной оценке точности, вычислительной эффективности и интеграции указанных методов в рамках единой методологической системы.

Материалы и методы. Исследование аэродинамической устойчивости зданий сложной криволинейной формы основано на анализе трёх основных групп методов: нормативных, экспериментальных и численных (CFD). Такое деление отражает современное состояние инженерной практики и позволяет сопоставить их точность, область применимости и ограничения.

Нормативные методы расчёта ветрового воздействия базируются на обобщении статистических данных многолетних метеорологических наблюдений и результатах аэродинамических экспериментов, выполненных для типовых геометрий зданий. В отечественной практике расчёты регламентируются документом СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», в котором расчётная скорость ветра и давление определяются с учётом ветрового района, категории местности и высоты сооружения. Современные исследования показывают, что существующие нормативные зависимости, разработанные преимущественно для зданий простой формы, демонстрируют ограниченную применимость при анализе объектов со сложной или криволинейной геометрией, что приводит к снижению точности расчётов аэродинамических нагрузок [8].

Экспериментальные методы включают аэродинамические испытания в ветровых трубах и натурные измерения, позволяющие получать распределения давления и скоростей вдоль поверхности моделей зданий [2, 9]. В современных исследованиях применяются высокочувствительные датчики давления, а также методы визуализации потока, такие как PIV (Particle Image Velocimetry) и цифровая анемометрия. Использование масштабных моделей фрагментов городской застройки повышает реалистичность получаемых данных, что особенно важно для зданий, расположенных в плотной градостроительной среде [10]. При всей высокой точности такие испытания

требуют значительных материальных и временных затрат, а их результаты зачастую ограничены конкретными сценариями обтекания. Поэтому экспериментальные методы преимущественно применяются для верификации численных моделей и уточнения параметров турбулентности.

Численные методы (CFD) представляют собой универсальный инструмент анализа ветровых воздействий на здания сложной формы. Они позволяют исследовать трёхмерные нестационарные потоки и оценивать влияние формы, угла атаки и шероховатости поверхности на аэродинамические характеристики [11]. В рамках настоящего исследования расчётная модель здания была создана в среде Rhinoceros 3D и экспортирована в программный комплекс RWIND Simulation, реализующий метод конечно-объёмного решения уравнений Навье-Стокса в стационарной постановке с использованием турбулентной модели $k-\omega$ SST [12, 13]. Программа автоматически формирует адаптивную конечно-объёмную сетку, сгущаемую в зонах повышенной кривизны и ожидаемого отрыва потока. В зависимости от поставленных задач могут использоваться различные турбулентные модели — RANS, LES и гибридные DES [5, 6, 14]. CFD-анализ обеспечивает получение детализированных полей давления, скоростей и турбулентной энергии, визуализацию вихревых структур и определение аэродинамических коэффициентов. Особое внимание уделяется качеству расчётной сетки и корректности постановки граничных условий, от которых зависит достоверность получаемых результатов [15].

Комплексное применение нормативных, экспериментальных и численных подходов обеспечивает всестороннюю оценку аэродинамической устойчивости зданий. Нормативные методы задают исходные расчётные ориентиры, экспериментальные испытания уточняют распределение давления, а CFD-моделирование раскрывает пространственную структуру потока и зоны локальных аэродинамических эффектов. Такой интегрированный подход формирует основу современной методологии анализа и проектирования зданий сложной формы, обеспечивающей их устойчивость, безопасность и долговечность.

Результаты исследования. Объектом численного анализа является здание с плавной криволинейной архитектурной формой без чётко выраженных граней и трёхлучевой структурой, характерной для современных биоморфных форм (рис. 1). В плане здание представляет собой трёхлучевую структуру, образованную тремя взаимосвязанными овальными объёмами, объединёнными в центральной части. Такая геометрия позволяет исследовать особенности взаимодействия потоков в зонах сопряжения объёмов и на участках с переменной кривизной поверхности. Обтекаемый контур здания способствует равномерному перераспределению набегающего воздушного потока и снижению интенсивности локальных вихревых образований.



Рис. 1. Архитектурный рендер исследуемого объекта

Поверхность кровли имеет непрерывную сглаженную геометрию с тремя крупными овальными понижениями, внутри которых размещены остеклённые купольные конструкции. Эти понижения образуют замкнутые контуры, плавно сопрягающиеся с основным телом здания, что позволяет избежать резких перепадов кривизны и минимизировать вероятность возникновения зон локального повышения аэродинамического сопротивления. Визуально форма здания напоминает биоморфную оболочку, органично интегрированную в окружающее пространство и адаптированную к направлению ветрового потока.

Создание цифровой геометрической модели осуществлялось в среде Rhinoceros 3D с использованием NURBS-представления геометрии (рис. 2), что позволило точно воспроизвести криволинейную форму оболочки с кон-

тролируемыми радиусами кривизны и обеспечить высокую степень соответствия между архитектурной концепцией и расчётной моделью [11, 15]. На основе построенной модели выполнена подготовка поверхности для CFD-анализа в программной среде RWIND Simulation [3, 14, 15], где реализованы алгоритмы генерации адаптивной конечно-объёмной сетки и моделирования ветровых потоков вокруг сложных пространственных форм.

Численный анализ аэродинамической устойчивости проводился в RWIND Simulation с использованием метода конечно-объёмного решения уравнений Навье-Стокса в стационарной постановке [3, 11]. В качестве турбулентной модели применялась $k-\omega$ SST [12], обеспечивающая точное описание течения в приграничных слоях и корректное моделирование зон отрыва потока на криволинейных поверхностях [3, 14]. Для расчёта была задана трёхмерная расчётная область, обеспечивающая свободное развитие потока без граничных эффектов. На входе задавался равномерный профиль скорости с максимальным значением 41,2 м/с. Выходная граница определялась условием нулевого градиента давления, верхняя и боковые поверхности — условием свободного скольжения. Поверхность здания принималась шероховатой, что позволило учесть влияние микрорельефа кровли и фасадных элементов.

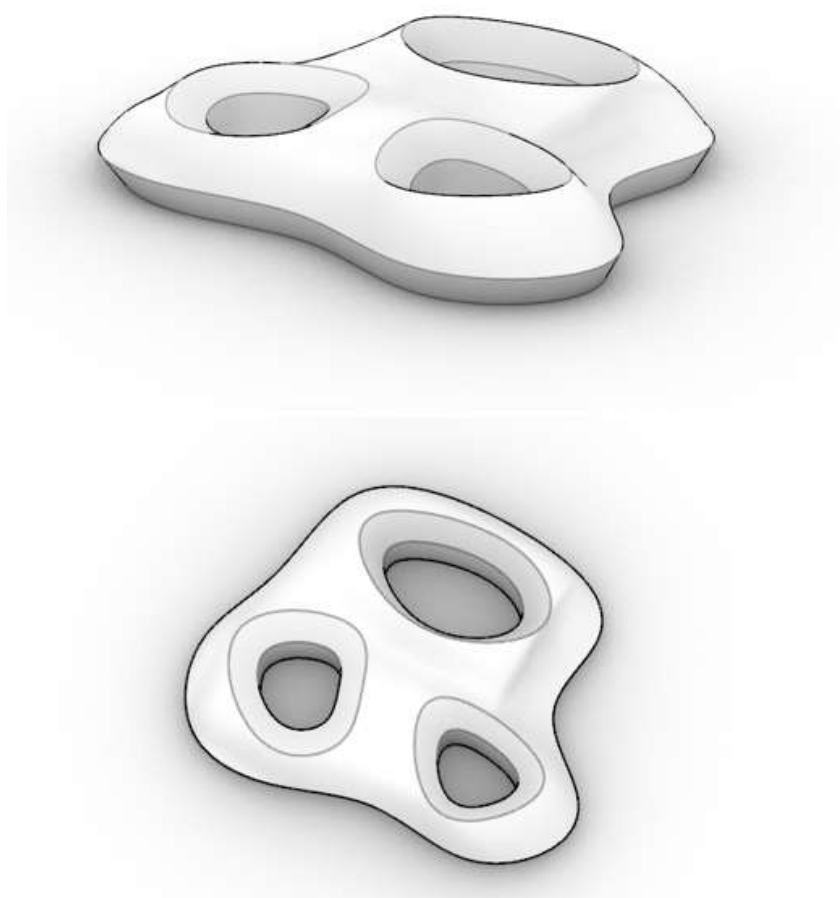


Рис. 2. Цифровая NURBS-модель оболочки

Результаты численного моделирования включают трёхмерные поля статического давления, аэродинамического коэффициента (c), скоростей и траекторий движения воздушного потока. На рис. 3 представлено распределение статического давления по поверхности здания. Максимальные положительные значения, достигающие +574 Па, наблюдаются на наветренных участках оболочки — преимущественно на передних выпуклых зонах и в центральной части, перпендикулярной направлению ветра. В областях между овальными понижениями и в тыловой части конструкции фиксируются отрицательные значения давления до -864 Па, что указывает на образование зон разрежения и локальных вихревых структур.

На рис. 4 показано распределение аэродинамического коэффициента C . Наибольшие значения ($C = 1,02$) приходятся на фронтальные участки кровли, где происходит торможение воздушного потока. Минимальные значения ($C = -1,54$) наблюдаются в понижениях и за тыловыми краями объёмов, где формируются зоны рециркуляции — области обратного движения потока, сопровождающиеся пониженным давлением и вихреобразованием. Анализ данных подтверждает наличие устойчивых вихревых структур в межлепестковых областях, вызывающих пульсации давления и увеличение динамической составляющей ветровой нагрузки [13].

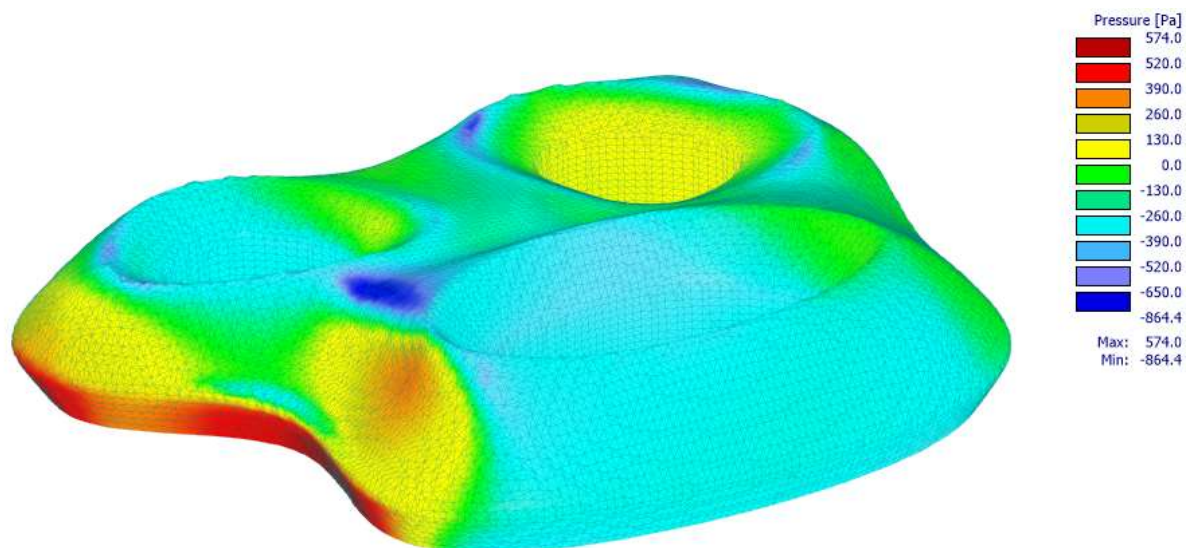
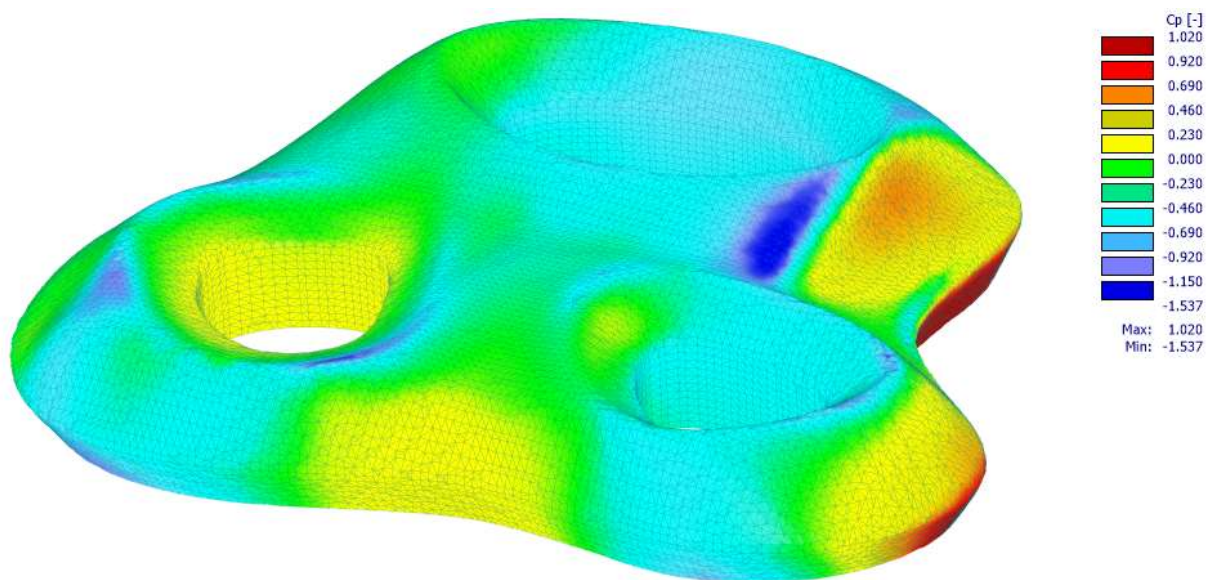


Рис. 3. Статическое давление по поверхности здания

Рис. 4. Распределение коэффициента давления C_p

На рис. 5 представлено распределение скоростей в сечении потока. Вдоль поверхности здания скорость потока снижается до 3–5 м/с в приграничных областях и зонах вихреобразования, тогда как между основными объёмами наблюдается ускорение до 30–35 м/с. Над центральной частью формируется крупномасштабный вихревой след, постепенно затухающий по мере удаления. Такая структура обтекания типична для аэродинамически обтекаемых, но геометрически сложных форм, сочетающих плавные переходы и взаимное влияние сопряжённых элементов оболочки.

Таким образом, численное моделирование подтвердило высокую аэродинамическую эффективность криволинейных архитектурных форм при наличии плавных сопряжений поверхностей. Полученные результаты позволяют количественно оценить распределение ветровых нагрузок и визуализировать структуру потоков, что является важным этапом оптимизации архитектурной оболочки и повышения надёжности конструкций зданий сложной формы.

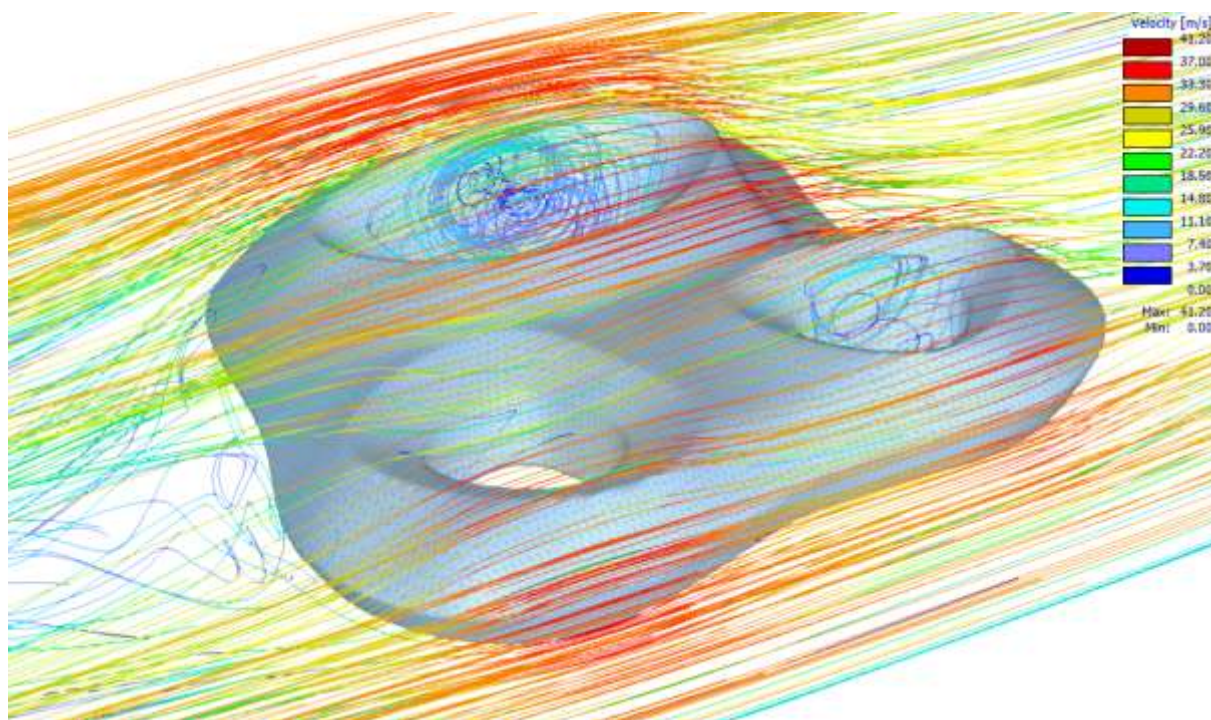


Рис. 5. Распределение скоростей в сечении потока

Обсуждение и заключение. Проведённое исследование показало, что архитектурные объекты с выраженной криволинейной геометрией обладают не только высокой эстетической и функциональной ценностью [1], но и предъявляют повышенные требования к обеспечению аэродинамической устойчивости и точности расчёта ветровых воздействий. Анализ нормативных, экспериментальных и численных подходов подтвердил, что традиционные методы, основанные на упрощённых моделях и усреднённых коэффициентах, оказываются недостаточно точными при расчётах зданий сложной формы. В то же время использование современных средств вычислительной аэродинамики позволяет существенно повысить достоверность прогнозов и детализировать картину обтекания.

На примере исследуемого здания с трёхлучевой оболочкой показано, что сочетание программных сред Rhinoceros 3D и RWIND Simulation обеспечивает возможность комплексного анализа аэродинамических характеристик. Применение турбулентной модели $k-\omega$ SST [12] позволило корректно воспроизвести вихревые структуры и определить распределение давления по поверхности, выявив зоны локальных нагрузок и потенциальной неустойчивости. Полученные результаты согласуются с данными зарубежных исследований [11, 13] и подтверждают эффективность CFD-подхода при анализе зданий со свободной архитектурной пластикой.

Интеграция методов численного анализа формирует современную методологию проектирования зданий сложной геометрии, обеспечивая взаимосвязь между архитектурной концепцией и инженерной надёжностью. Применение CFD-моделирования на ранних стадиях проектирования позволяет выявлять неблагоприятные аэродинамические зоны, оптимизировать геометрию оболочки и предотвращать возникновение резонансных колебаний. Такой подход способствует повышению безопасности, долговечности и энергоэффективности сооружений, а также отвечает принципам устойчивого архитектурного развития.

Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией численных и экспериментальных методов, созданием унифицированных баз данных аэродинамических коэффициентов для типовых геометрий и внедрением цифровых двойников зданий для мониторинга ветровых воздействий в условиях эксплуатации [16]. Кроме того, актуальной задачей остаётся совершенствование национальной нормативной базы, включая СП 20.13330.2016 и СП 267.1325800.2016, с приведением их положений в соответствие с международными стандартами Eurocode EN 1991-1-4, ASCE 7 и AII Recommendations.

Реализация указанных направлений позволит сформировать единую комплексную методологию анализа и проектирования, обеспечивающую повышение точности расчётов, эксплуатационной надёжности и устойчивости зданий сложной криволинейной архитектуры.

Список литературы / References

1. Алборова Л.А., Мамиева И.А. Криволинейные формы в архитектуре зданий и сооружений XX века. *Academia. Архитектура и строительство*. 2023;3:154–164. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2023-3-154-164>
Alborova L, Mamieva I Curvilinear Forms in Architecture of Buildings and Structures Up to the XXI Century. *Academia. Architecture and Construction*. 2023;3:154–164. (In Russ.) <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2023-3-154-164>
2. Rimshin V, Truntov P. Determination of aerodynamic coefficients in the design of buildings. *Modern Problems in Construction*. 2023;372:149–155. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36723-6_16
3. Gan W, Guo H, Zhang H, Zhao F, Li J, Peng S. et al. Wind-driven dynamics around building clusters: impact of convex and concave curvilinear morphologies and central angles. *Atmosphere*. 2024;15(12):1454. <https://doi.org/10.3390/atmos15121454>
4. Самсонов В.Т. Расчёт аэродинамических характеристик смежных зданий. *Строительство и архитектура*. 2020;8(1):67–81. <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2020-8-1-67-81>
Samsonov VT Calculation of Aerodynamic Characteristics of Adjacent Buildings. *Construction and Architecture*. 2020;8(1):67–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2020-8-1-67-81>
5. Celik I, Rumsey C, Smith R, Ham F, Menter F, Rumsey P. RANS/LES/DES/DNS: the future prospects of turbulence modelling. *ASME Journal of Fluids Engineering*. 2005;127(5):829–830. <https://doi.org/10.1115/1.2033011>
6. Liu C., Liu C., Ma W. Rans, detached Eddy simulation and large Eddy simulation of internal Torque converters flows: A comparative study. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2015;9(1):114–125. <https://doi.org/10.1080/19942060.2015.1004814>
7. Yadav H., Roy A.K. Wind-induced aerodynamic responses of triangular high-rise buildings with varying cross-section areas. *Buildings*. 2024;14(9):2722. <https://doi.org/10.3390/buildings14092722>
8. Cunningham D, Ramponi R, MacReamoinn R, Keenahan J. Modernizing wind load standards for Ireland. *Wind*. 2025;5(4):26. <https://doi.org/10.3390/wind5040026>
9. Verma H, Sonparote RS. Forecasting aerodynamic coefficients of bi-axial symmetric C plan-shaped tall buildings using ANFIS. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2024;28: 2286–2303. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-0982-y>
10. Wang Q, Zhang B. Wind-induced responses and wind loads on a super high-rise building with various cross-sections and high side ratio — a case study. *Buildings*. 2023;13(2):485. <https://doi.org/10.3390/buildings13020485>
11. Han W, Kim H, Son E, Lee S. Assessment of yaw-control effects on wind turbine-wake interaction: A coupled unsteady vortex lattice method and curled wake model analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023;242:105559. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105559>
- 12 Menter FR Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*. 1994;32(8):1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- 13 Lu WT, Phillips BM, Jiang Z Aerodynamic Responses of Tall Buildings with Cross-Section Modification through Additive- and Subtractive-Based Strategies. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2024;250:105762. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2024.105762>
- 14 Su LK, Gu M Research on Wind-Induced Interference Effect of Adjacent Super Tall Buildings Based on Two-Aeroelastic-Model Wind Tunnel Test. *Acta Aerodynamica Sinica*. 2025;1:1–10. (in Chinese) <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2024.0049>
- 15 Rani N, Pratap A, Ahuja AK Evaluation of Wind Pressure Distribution on Single and Multi-Span Cylindrical Canopy Roofs Using Wind Tunnel Testing. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2024;28(8):3344–3358. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-1013-8>
- 16 Jiang Y, Hui Y, Li M, Zhu H, He B Experimental Study on Wind Load Characteristics of Rooftop Canopies of Low and Medium Rise Buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2024;249:105748. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2024.105748>

Об авторах:

Телемаков Максим Игоревич, аспирант Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова, (346428, Российская Федерация, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), [ORCID](#), makstелемаков@gmail.com

Бузало Нина Александровна, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры градостроительства, проектирования зданий и сооружений Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова, (346428, Российская Федерация, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), buzalo_n@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

М.И. Телемаков: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, разработка геометрии здания, проведение расчетов, подготовка текста, анализ результатов исследований, визуализация данных, систематизация современных подходов к анализу ветровых воздействий, сравнительный анализ нормативных и численных методов, формирование выводов;

Н.А. Бузало: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Maxim I. Telemakov, PhD student at Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), (132 Prosveshcheniya Str., Novocherkassk, 346428, Russian Federation), [ORCID](#), makstelemakov@gmail.com

Nina A. Buzalo, Cand.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Urban Planning, Design of Buildings and Structures at Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), (132 Prosveshcheniya Str., Novocherkassk, 346428, Russian Federation), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), buzalo_n@mail.ru

Claimed contributorship:

MI Telemakov: formation of the basic concept, aims of the study, development of building geometry, calculations, preparation of the manuscript, analysis of the research results, visualization of data, systematization of modern approaches to the analysis of wind impacts, comparative analysis of normative and numerical methods, formation of the conclusions;

NA Buzalo: scientific supervision, analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 12.11.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 03.12.2025

Принята к публикации / Accepted 17.12.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 624.011.1

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-32-39>

Протяженные деревянные панели перекрытий и покрытий зданий

Г.Б. Вержбовский  

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

 vergen2005@yandex.ru



EDN: RUPNIO

Аннотация

Введение. Развитие строительной отрасли России предполагает как появление новых технологий и материалов, так и использование традиционных методов строительства. Одним из хорошо известных методов в нашей стране является деревянное домостроение. В настоящее время возводятся многоквартирные дома из деревянных CLT-панелей, широко используется клееная древесина, балки из однонаправленного шпона и т.п. Современная архитектура направлена на создание значительных открытых пространств для свободной планировки. В деревянных зданиях не всегда удается организовать подобные пространства из-за ограниченности длин выпускаемых пиломатериалов. В связи с этим актуальными становятся исследования, направленные на создание протяженных панелей из древесины. Целью настоящей работы является разработка новых конструкций деревянных панелей покрытий и перекрытий зданий из стандартных пиломатериалов, фанеры и ориентированностружечных плит с пролетами, превышающими стандартную длину досок, определение пределов несущей способности таких панелей, а также их геометрический расчет.

Материалы и методы. Рассмотрены два типа панелей коробчатого строения, выполненных из деревянных досок, фанеры и/или ориентированностружечных плит. Оценка несущей способности предлагаемых конструкций произведена как при помощи традиционных методов сопротивления материалов, так и на компьютерных моделях.

Результаты исследования. Описана конструкция протяженных панелей, отличающаяся от известных зарубежных аналогов и свободная от присущих последним недостатков. Выполнен геометрический расчет предлагаемых конструкций. Определены рациональные соотношения размеров досок, составляющих панели. Установлены конструктивные ограничения для отдельных элементов изделий. Созданы компьютерные модели панелей, при помощи которых установлены пределы применимости предлагаемых конструкций.

Обсуждение и заключение. В результате проведенных исследований разработаны новые конструкции деревянных панелей перекрытий и покрытий зданий с возможными пролетами, превышающими стандартную длину пиломатериалов и выполненные без использования дорогостоящих материалов. Простота конструкции позволяет организовать выпуск изделий на небольших производствах без сложного и дорогостоящего оборудования. Панели могут применяться для создания протяженных открытых пространств в деревянных зданиях и сооружениях различного назначения.

Ключевые слова: панель, древесина, пиломатериалы, фанера, перекрытие, покрытие, протяженные пролеты

Для цитирования. Вержбовский Г.Б. Протяженные деревянные панели перекрытий и покрытий зданий. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2026;5(1):32–39. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-32-39>

Extended Wooden Panels for Flooring and Cladding of Buildings

Gennadiy B. Verzhbovskiy  

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 vergen2005@yandex.ru

Abstract

Introduction. The development of the construction industry in Russia involves both emerging technologies and materials and traditional construction methods. One of the well-known tools in this country is wooden housing construction. Apartment buildings are being built from wooden CLT panels, glued timber, beams made of unidirectional veneer, etc. are commonly employed. Modern architecture seeks to create large open spaces for free planning. In wooden buildings, it is not always possible to organize such spaces due to a limited length of lumber being produced. Studies aimed at designing extended panels from wood are thus gaining momentum. The aim of this study is to develop new designs of wooden panels for cladding and flooring of buildings from standard lumber, plywood and oriented strand boards with spans exceeding the standard length of boards, to identify the limits in the load-bearing capacity of such panels, as well as to conduct their geometric calculation.

Materials and Methods. Two types of box-shaped panels made of wooden planks, plywood and/or oriented strand boards are considered. The load-bearing capacity of the suggested structures is estimated by means of both traditional methods of material strength and computer models.

Research Results. The design of extended panels is described differing from the known overseas analogues and is free from the inherent disadvantages of the latter. Geometric calculation of the suggested structures is performed. The rational size ratios of the sizes of boards that make up the panels are identified. Design limitations for individual elements of products are established. Computer models of the panels are designed and employed in order to identify the applicability limits of the suggested structures.

Discussion and Conclusion. As a result of the research, new designs of wooden panels for flooring and cladding of buildings with possible spans exceeding the standard length of lumber and made with no use of costly materials have been developed. The simplicity of the design makes it possible to organize manufacturing of products in small-size industries with complex and costly equipment involved. The panels can be employed for long open spaces in wooden buildings and structures for a broad range of purposes.

Keywords: panel, wood, lumber, plywood, flooring, cladding, long spans

For citation. Verzhbovsky GB Extended Wooden Panels for Flooring and Cladding of Buildings. *Modern Trends in Construction, Urban Territorial Planning*. 2026;5(1):32–39. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-32-39>

Введение. В современной гражданской архитектуре приветствуются протяженные открытые пространства. Для их организации, как правило, применяются специальные конструкции перекрытий и покрытий, чаще всего выполняемые из металла. В деревянных зданиях открытые пространства обычно ограничены размерами стандартных пиломатериалов и не превышают шести метров. Для создания помещений больших размеров необходимо использовать балки из клееной древесины или изделия из однонаправленного шпона (LVL), пролеты которых зависят от размеров их поперечных сечений. Применение указанных балок удорожает конструкцию каркаса и значительно увеличивает толщину перекрытий и покрытий. В связи с этим интерес представляют протяженные панели коробчатого сечения, в которых силовые несущие элементы «размазываются» по площади панели.

Одним из возможных вариантов подобных изделий являются панели фирмы «Kielsteg», показанные на рис. 1 и позволяющие перекрывать пространства длиной до 27 метров [1]. Следует заметить, что в нашей стране подобная конструкция была запатентована еще в 2010 году [2].

Указанные изделия имеют ряд конструктивных особенностей, по мнению автора снижающих их эффективность. Поскольку древесина лучше работает на сжатие, чем на растяжение, целесообразно рассмотреть возможность использования в панелях досок различной толщины для верхней и нижней обшивок. Изогнутые при изготовлении панелей фанерные ребра получают предварительное напряжение, что необходимо учитывать при проектировании. Наконец, сходящиеся в одном стыке ребра образуют труднодоступные пространства внутри панели для размещения в них эффективного утеплителя. Следует заметить, что слоистые панели из древесины могут иметь весьма разнообразную структуру [3–5], и в статье рассмотрены только два из возможных вариантов таких изделий.

Наряду с плоскими покрытиями рассмотренные в статье панели возможно использовать и в сводах. Деревянные своды являются одним из старейших и наиболее интересных типов инженерных конструкций, используемых

человеком. Первоначально они появились как следствие арочных конструкций для перекрытия достаточно больших пространств без промежуточных опор [6]. В Древнем Риме знаковыми сооружениями с использованием сводов стали Пантеон и Колизей. Конструкции получили дальнейшее развитие в Средние века, когда появились тонкостенные покрытия, способные выдерживать значительные нагрузки при минимальной толщине, например, собор Нотр-Дам в Париже. Современная архитектура использует новые подходы к проектированию сводчатых конструкций, включающие применение композитных материалов, параметрическое проектирование с использованием специализированного программного обеспечения и т.п.



Рис. 1. Деревянная панель перекрытия производства фирмы «Kielsteg»: а — поперечное сечение; б — пример применения панелей [1]

Очевидно, что для всестороннего рассмотрения предлагаемых панелей необходимо решить ряд вопросов, основными из которых являются конструкция изделий и используемые для их создания материалы, а также геометрический расчет плоских и сводчатых панелей.

Важно также определиться со способом оценки напряженно-деформированного состояния панелей. Для этой цели используются различные подходы [7, 8], однако конечноэлементная методика представляется наиболее универсальной, позволяющей учесть практически все особенности конструкции.

Использование возобновляемых природных экологически чистых материалов в конструкциях зданий и сооружений становится современным трендом строительной индустрии. В Российской Федерации вопросам применения древесины в строительстве уделяется всё большее внимание, однако ограниченные размеры пиломатериалов не дают возможности перекрывать значительные пролеты без металла или массивных клееных конструкций. Создание новых изделий с меньшей по сравнению с традиционными конструкциями материалоемкостью является актуальной задачей [9], а их применение в покрытиях значительных пролетов, в том числе и сводчатых, открывает широкие возможности для создания архитектурно привлекательных объектов.

Целью настоящего исследования является оценка возможности применения предлагаемых панелей в качестве несущих конструкций перекрытий и покрытий, установление их предельных пролетов и оптимальных соотношений между размерами составляющих изделия элементов.

Задачами, которые необходимо решить для достижения указанной цели, являются:

- геометрический расчет панелей и получение аналитических зависимостей для определения размеров всех составляющих изделие элементов;
- оценка напряженного состояния принудительно изогнутых ребер среднего слоя панелей;
- создание параметрических компьютерных моделей конструкций.

Материалы и методы. Рассмотрены два типа панелей коробчатого строения с дощатыми обшивками и ребрами из фанеры или ориентированностружечных плит (далее — ОСП). Панели состоят из повторяющихся модулей, вид которых с размерами показан на рис. 2. Модули отличаются друг от друга формой ребер. Первый модуль имеет предварительно изогнутые, а второй — прямолинейные ребра. Каждый из предлагаемых вариантов имеет свои достоинства и недостатки. В первом случае используются доски без фасок, однако для предварительного изгиба ребра необходимо прикладывать определенные усилия, что может потребовать использования прессов, а сами ребра будут иметь меньшие запасы прочности в связи с наличием преднапряжения в них. В случае прямолинейных ребер возникает необходимость снятия фасок у досок обшивок, однако ребра не имеют предварительного напряжения.

Базовыми размерами панелей являются их высота H , толщины обшивок и ребер t_1 , t_2 и t соответственно, а также ширина пиломатериалов b . Остальные размеры, показанные на рис. 2, определяются через базовые.

Модули для сводчатых покрытий имеют большее количество размеров и представляются более сложными для изготовления (рис. 3).

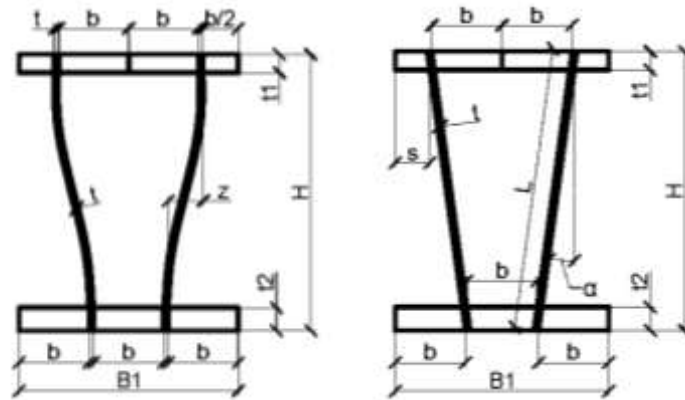


Рис. 2. Модули плоских панелей

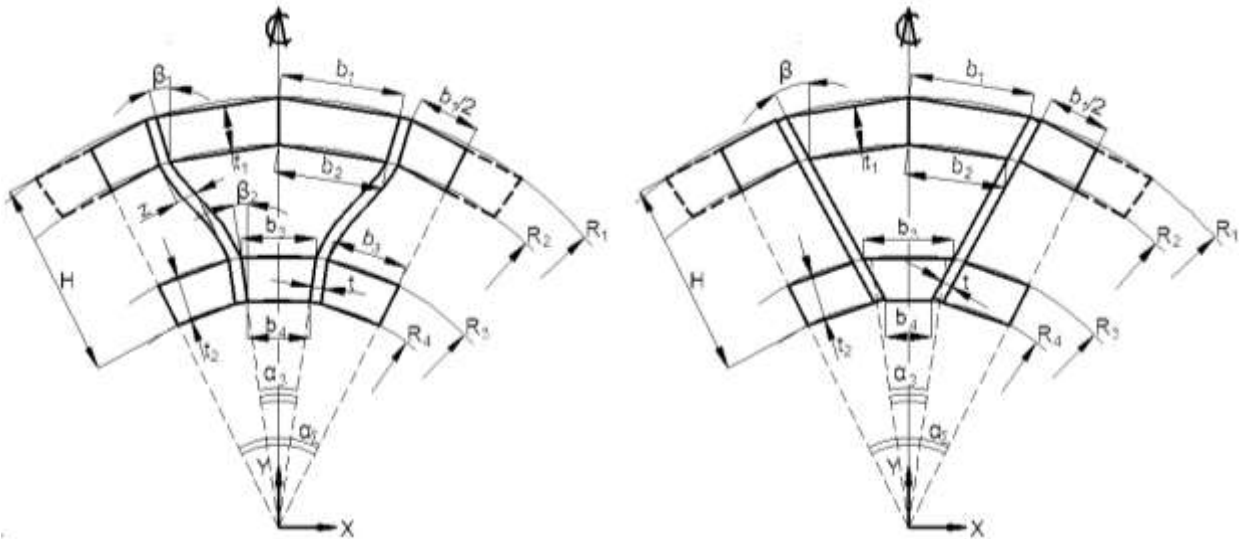


Рис. 3. Модули панелей сводов

Для достижения заявленной цели исследования использован численно-аналитический подход. При этом геометрический расчет панелей выполнен аналитически, а полученные зависимости применены в соответствующей программе. Создание компьютерных моделей панелей осуществлено в программном комплексе SolidWorks.

Результаты исследования. Первый этап исследования заключался в геометрическом расчете панелей. И если в случае плоских панелей расчет оказывается несложным, то для элементов свода — это достаточно трудоемкий процесс, сложность которого обусловлена необходимостью определения центральных углов ребер на радиусах R_1 и R_4 , а также нахождением зависящих от указанных параметров скосов досок обшивок. Задачу пришлось решать при помощи методов аналитической геометрии, причем, например, для определения всех размеров модуля сводчатого покрытия с предварительно изогнутыми ребрами потребовалось провести вычисление более пятидесяти параметров.

Решение задачи геометрического расчета сводчатой панели реализовано в программе Microsoft Excel. На рис. 4 представлен лист рабочей книги для модуля с изогнутыми ребрами, где первоначально вычисляется ширина доски b_3 , обеспечивающая равенство центрального угла нижней обшивки углу α_2 (обозначения приведены на рис. 3), а затем записывается текстовый файл с данными, необходимыми для формирования генеративного свода. Аналогично рассчитывается и модуль с прямолинейными ребрами.

Криволинейные ребра панелей получают предварительный изгиб в процессе изготовления панелей как пластина, испытывающая цилиндрический изгиб. Очевидно, что для этого должно быть приложено определенное давление на ребро, величина которого в данном случае может быть установлена методами сопротивления материалов. Рассмотрена консольная балка пролетом, равным длине участка ребра между дощатыми обшивками, к свободному концу которой приложены сосредоточенная сила и изгибающий момент (рис. 5).

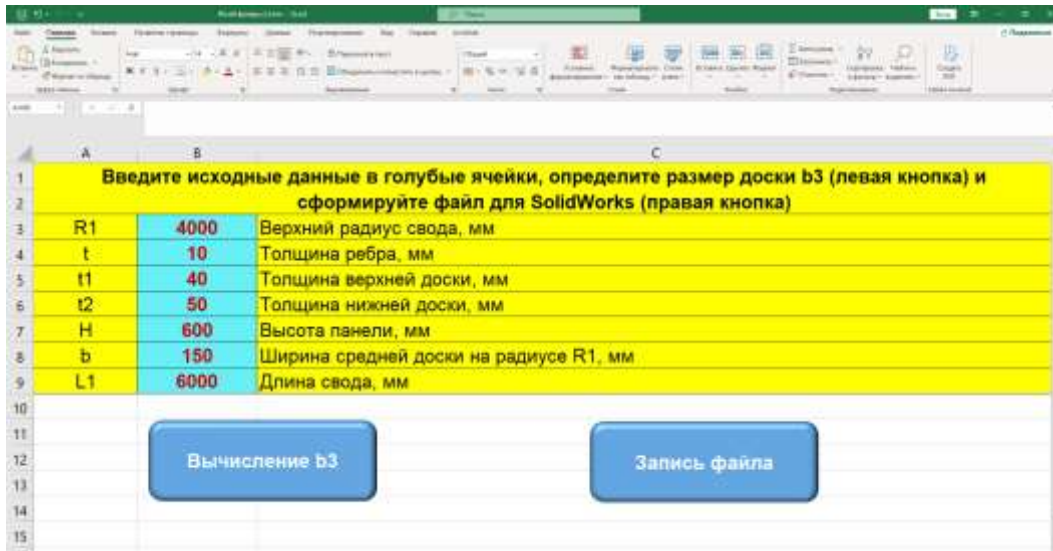


Рис. 4. Программа для геометрического расчета модуля сводчатой панели с изогнутыми ребрами

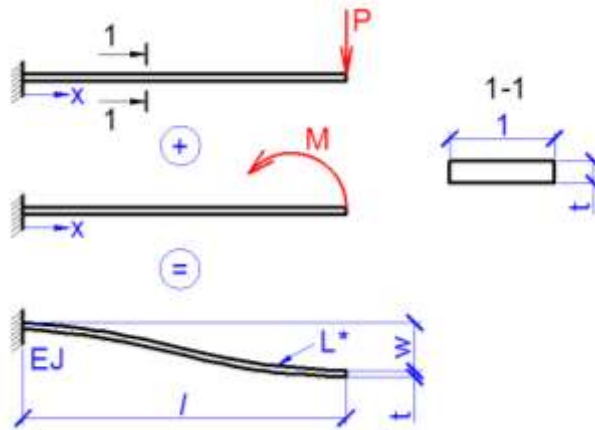


Рис. 5. Определение длины заготовки криволинейной части ребра

Соотношение указанных силовых факторов подбирается таким образом, чтобы был обеспечен заданный прогиб балки при одновременном равенстве нулю угла поворота ее свободного конца. Очевидно, что в данном случае изгибающий момент может быть выражен через сосредоточенную силу, поэтому уравнение изогнутой оси балки будет иметь вид, показанный ниже. С учетом того, что напряжения в ребре не должны превышать расчетного сопротивления изгибу, величины максимального прогиба ребра и создающей его силы определяются из следующих выражений:

$$w(x) = \frac{Px^2}{Et^3}(3l - 2x); w_{\max} = \frac{R_u l^2}{3Et}; P = \frac{R_u t^2}{3l}.$$

Здесь R_u — это расчетное сопротивление материала ребра изгибу, а остальные обозначения понятны из рис. 5.

При изготовлении панелей рекомендуется листы фанеры или ОСП, используемые в качестве ребер, располагать так, чтобы направление волокон внешних слоев было параллельно толщине изделия.

Длина заготовки криволинейного участка ребра определяется через эллиптический интеграл вида

$$L^* = \int_0^l \sqrt{1 + \left[\frac{Px}{2EJ}(l-x)^2 \right]} dx.$$

В результате численного эксперимента, в рамках которого варьировались расстояние между обшивками панели и величина предварительного выгиба ребра, установлено, что длина заготовки криволинейного участка ребра оказывается незначительно больше расстояния между обшивками и может быть найдена по формуле

$$L^* = l + 0,01w_{\max}^2.$$

Все описанные выше действия были необходимы для определения напряженно-деформированного состояния сводов, которое выполнялось в программном комплексе SolidWorks. Это программное средство предоставляет

Обсуждение и заключение. В результате проведенного обзора литературы предложены новые типы панелей покрытий и перекрытий из древесины, фанеры и/или ОСП. В отличие от традиционных клефанерных панелей обшивки предлагаемых изделий выполнены из досок, а средний слой представляет собой систему ребер из листовых материалов. Такое решение дает возможность существенно увеличить перекрываемые панелями пролеты и, таким образом, позволяет организовать протяженные открытые пространства в деревянных зданиях. Панели могут быть как плоскими, так и изогнутыми по дуге окружности по коротким сторонам, что дает возможность использовать их в сводчатых покрытиях.

В результате геометрического расчета установлены основные соотношения размеров панелей и составлена программа для получения указанных характеристик сводчатых изделий. Составлены компьютерные модели панелей и проведены предварительные расчеты, доказывающие применимость разработанных конструкций в качестве элементов покрытий зданий при пролетах до 15 метров. Большие пролеты ими также можно перекрывать при условии создания строительного подъема.

Панели указанной конструкции применимы и в перекрытиях зданий, однако в таком случае пролеты будут несколько меньше. Это объясняется более высокой нагрузкой на перекрытия. В настоящее время рассматриваются и другие типы аналогичных панелей, в том числе с использованием стальных тонкостенных гнутых профилей в качестве среднего слоя. На описанные в статье изделия поданы заявки на изобретения.

Дальнейшие направления исследований предполагают аналитическое определение рационального соотношения толщин досок обшивок панелей и формирование инженерной методики их расчета без применения сложных вычислительных комплексов.

Список литературы / References

1. Trummer A, Krestel S Kielsteg: Geklebte Hochleistungsbauteile aus Holz. In: *Internationales Holzbau-Forum IHF*. 2014. P 1–11. URL: https://events.forum-holzbau.com/pdf/50_IHF_2014_Trummer.pdf (дата обращения: 02.12.2025).
2. Крестель Ш. *Сборный строительный элемент в форме балки, а также способ и устройство для изготовления этого строительного элемента*. Патент РФ № 2391468. 2010.
Krestel Sh *Prefabricated Building Element in the Form of a Beam, as well as a Method and Device for Manufacturing this Building Element*. Russian Federation Patent № 2391468, 2010. (In Russ.)
3. Merli F, Belloni E, Buratti C Eco-Sustainable Wood Waste Panels for Building Applications: Influence of Different Species and Assembling Techniques on Thermal, Acoustic, and Environmental Performance. *Buildings*. 2021;11(8):2–18. <https://doi.org/10.3390/buildings11080361>
4. Zhong Y, Ren Y, Zhang J, Zhang Z Wooden Sandwich Panels with Auxetic Core for Furniture – Experimental and Numerical Analysis. *Journal of Sandwich Structures & Materials*. 2024;26(1):56–72. <https://doi.org/10.1177/10996362231201880>
5. Smardzewski J Experimental and Numerical Analysis of Wooden Sandwich Panels with an Auxetic Core and Oval Cells. *Materials and Design*. 2019;183(5):1–10. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108159>
6. Kawish K, Ando T, Samimi SAB A Study of the Distribution of Traditional Houses with Domical Vault Roofs in Iran and Afghanistan. *Journal of Architecture and Planning*. 2019;84(760):1509–1519. <https://doi.org/10.3130/aija.84.1509>
7. Kaldar-ool A-KhB, Opbul EK Stress Condition of Orthotropic Vault Structure with Cylindrical Anisotropy. *Magazine of Civil Engineering*. 2022;116(8):11605. <https://doi.org/10.34910/MCE.116.5>
8. Xia F, Durandet Y, Tan PJ, Ruan D Three-Point Bending Performance of Sandwich Panels with Various Types of Cores. *Thin-Walled Structures*. 2022;179:109723 <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109723>
9. Pradhan S, Mohammadabadi M, Entsminger ED, Ragon K, Khademibami L, Street J Development of a High-Performance Building Material Using Wood-based Corrugated Panels Manufactured via Cold-Forming Technique. *BioResources*. 2023;18(3):4666–4675. URL: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/development-of-a-high-performance-building-material-using-wood-based-corrugated-panels-manufactured-via-cold-forming-technique/> (дата обращения: 02.12.2025).
10. Pyatikrestovskiy KP, Sokolov BS The Economic Feasibility of Taking into Account the Joint Work of Load-Bearing and Enclosing Elements in Large-Span Wooden Spatial Structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021. 17(6): 664–678. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-6-664-678>
11. Buck D, Wang X, Hagman O, Gustafsson A Comparison of Different Assembling Techniques Regarding Cost, Durability, and Ecology — a Survey of Multi-Layer Wooden Panel Assembly Load-Bearing Construction Elements. *BioResources*. 2015;15(10):8378–8396. <https://doi.org/10.15376/biores.10.4.8378-8396>

Об авторе:

Вержбовский Геннадий Бернадович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлических, деревянных и пластмассовых конструкций Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), vergen2005@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Gennadiy B. Verzhbovskiy, Dr.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metal, Wood and Plastic Structures at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, Russian Federation, 344003), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), vergen2005@yandex.ru

Conflict of interest statement: the author does not have any conflict of interest.

The author has read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 03.12.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 21.12.2025

Принята к публикации / Accepted 10.01.2026

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES







Оригинальное эмпирическое исследование

УДК 693

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-40-47>

Оценка несущей способности цилиндрических каменных сводов с учетом их повреждений

С.С. Зимин¹  , Р.Б. Орлович², С.В. Данилов³ , Ю.Г. Москалькова³ 

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,

² ООО «ПИ Геореконструкция», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь

 zimin_serger@mail.ru



EDN: RVIBJI

Аннотация

Введение. Расчет цилиндрических каменных сводов исторических зданий, зачастую, выполняют в стержневой постановке. При этом доминирующее значение на несущую способность сводов имеет соотношение изгибающих моментов M и продольных сил N , а также наличие трещин. Последнее не позволяет вести анализ несущей способности сводов стандартными методами. Целью исследований является отработка методики оценки несущей способности цилиндрических каменных сводов с трещинами.

Материалы и методы. Выполненные авторами экспериментальные исследования подтверждают, что появление одной и даже нескольких трещин не всегда является признаком исчерпания несущей способности сводов. Верхняя граница несущей способности определяется наличием такого количества условных шарниров (трещин), которое переводит свод в кинематический механизм. Вести анализ работы сводов с трещинами вплоть до их физического разрушения возможно с использованием так называемых интеракционных зависимостей, отражающих предельные соотношения $M_{Rd}-N_{Rd}$.

Результаты исследования. Интеракционные зависимости $M_{Rd}-N_{Rd}$ определены авторами экспериментальным путем. Также в ходе проведенных экспериментов выявлены механизмы разрушения цилиндрического свода в зависимости от соотношения $M_{Rd}-N_{Rd}$. Так, при действии только изгибающего момента разрушение образца произошло по неперевязанному сечению каменной кладки; при действии только сжимающего усилия – в результате образования продольных трещин; при совместном действии сжимающей силы и изгибающего момента характер разрушения зависел от соотношения этих сил. Также выполнена верификация численной модели, с помощью которой возможно построение интеракционных зависимостей.

Обсуждение и заключение. Оработана методика оценки несущей способности цилиндрических каменных сводов с трещинами с использованием интеракционных зависимостей, отражающих предельные соотношения $M_{Rd}-N_{Rd}$. Показано, что непосредственно интеракционные зависимости возможно построить с помощью численных твердотельных моделей, предварительно «настроив» их на результаты ряда простейших испытаний кладки. Фактические значения M и N в сечениях определяются на стержневых моделях сводов. Оценка несущей способности сводов ведется путем сопоставления определенной комбинации $M-N$ с кривой интеракционной зависимости.

Ключевые слова: каменные своды, цилиндрические своды, трещины в каменных сводах, разрушение сводов, несущая способность, механизмы разрушения сводов

Для цитирования. Зимин С.С., Орлович Р.Б., Данилов С.В., Москалькова Ю.Г. Оценка несущей способности цилиндрических каменных сводов с учетом их повреждений. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2026;5(1):40–47. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-40-47>

Evaluation of the Load-Bearing Capacity of Cylindrical Stone Vaults Taking their Damage into Account

Sergej S. Zimin¹  , Roman B. Orlovich², Sergej V. Danilov³ , Yuliya G. Maskalkova³ 

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

²LLC PI Georekonstrukcia, St. Petersburg, Russian Federation

³Belarusian-Russian University, Mogilev, Republic of Belarus

 zimin_serгей@mail.ru

Abstract

Introduction. The calculation of cylindrical stone arches of historical buildings is often performed in a core setting. At the same time, the ratio of bending moments M and longitudinal forces N , as well as cracks has a major effect on the load-bearing capacity of arches. The latter does not allow the analysis of the load-bearing capacity of arches by means of the standard methods. The aim of the study is to develop a methodology for assessing the load-bearing capacity of cylindrical stone arches with cracks.

Materials and Methods. The experimental studies confirm that one or even a few cracks are not invariably a sign of exhaustion of the load-bearing capacity of arches. The upper limit of the load-bearing capacity is due to such a number of conditional hinges (cracks), which converts the arch into a kinematic mechanism. It is possible to analyze the operation of vaults with cracks up to their physical destruction by means of the so-called interaction dependencies reflecting the limiting ratios $M_{Rd}-N_{Rd}$.

Research Results. The interactive dependencies of $M_{Rd}-N_{Rd}$ were identified experimentally. The experiments also revealed the mechanisms of destruction of the cylindrical vault depending on the ratio $M_{Rd}-N_{Rd}$. Thus, under the action of only the bending moment, the destruction of the sample occurred along an unconnected section of the masonry; under the action of only the compressive force, as a result of the formation of longitudinal cracks; under the combined action of the compressive force and the bending moment, nature of the destruction depended on the ratio of these forces. The numerical model have been verified that can be used in order to design interactive dependencies.

Discussion and Conclusion. A methodology has been developed for assessing the load-bearing capacity of cylindrical stone arches with cracks using interactive dependencies reflecting the limiting ratios $M_{Rd}-N_{Rd}$. It is shown that it is possible to directly design interactive dependencies with numerical solid-state models, having previously "fine-tuned" them to the results of a number of simple masonry tests. The actual values of M and N in the cross sections are identified using the rod models of the arches. The load-bearing capacity of the arches is evaluated by comparing a certain combination of M-N with the interaction dependence curve.

Keywords: stone vaults, cylindrical vaults, cracks in stone vaults, destruction of vaults, load-bearing capacity, mechanisms of destruction of vaults.

For citation. Zimin SS, Orlovich RB, Danilov SV, Maskalkova YuG Evaluation of the Load-Bearing capacity of Cylindrical Stone Vaults Taking their Damage into Account. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(1):40–47. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-40-47>.

Введение. Каменные своды имеют более чем тысячелетнюю историю и являются одними из основных конструктивных элементов зданий исторической застройки. При этом анализ их работы до сих пор является актуальным при оценке технического состояния, ремонтах, реконструкции и модернизации зданий. Часто наблюдаемыми дефектами сводов являются трещины, деградация и расслоение кладки и даже вывалы ее отдельных фрагментов, причиной которых могут быть неравномерные осадки фундаментов, эксплуатационный износ, перегрузки, динамические воздействия, техногенные и другие факторы [1–6]. Особенно неблагоприятным является деградация растворных швов, которые в зданиях старой застройки обычно выполнялись из слабых известковых растворов. В результате нарушения сцепления между растворными швами и камнями снижается прочность кладки на растяжение и сдвиг по неперевязанным сечениям.

Несущая способность сводов зависит не только от механических характеристик кладки и накопившихся в них повреждений, но и от геометрии и характера нагружения, предопределяющих особенности напряженно-деформированного состояния и механизмов разрушения. В цилиндрических сводах доминирующее значение имеет соотношение изгибающих моментов M и продольных сил N . При этом оптимальным является очертание свода, совпадающее с кривой давления. Глубокие трещины, расчленяющие свод на несколько крупных соприкасающихся блоков, соответствуют шарнирам расчетных схем и образуют как устойчивые одно-, трехшарнирные, так

и мгновенно изменяемые многошарнирные схемы¹. Образование шарниров обусловлено выходом кривой давления за пределы ядра сечения и развитием трещин в растянутой зоне из-за низкого сцепления камней с раствором, в результате чего в ослабленных сечениях преобладают сжимающие напряжения (рис. 1). При этом высота растянутой зоны поперечного сечения высотой h увеличивается пропорционально уменьшению высоты сжатой зоны h_c , определяемой из следующего выражения: $h_c = 2 \cdot (0,5 \cdot h - M/N)$.

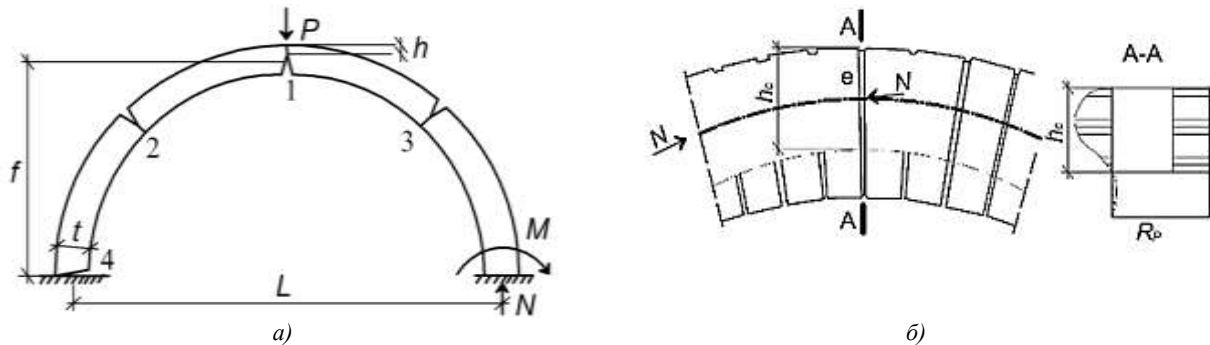


Рис. 1. Механизм разрушения цилиндрических сводов: а — схема образования шарниров в сечениях сводов с трещинами; б — напряженное состояние сечения с трещиной [10]

Материалы и методы. Следует отметить, что из-за изменчивости эксцентриситета $e = M/N$ вдоль кривой свода местоположение возможных шарниров, особенно при повреждениях в виде трещин, также является изменчивым. В связи с этим при оценке несущей способности исторических сводов существенным является правильный выбор их расчетной схемы, учитывающей не только граничные условия, но и повреждения. Проблема заключается в том, что детальная локализация повреждений и прежде всего трещин с определением их геометрических параметров возможна только с внутренней поверхности свода. Инвентаризация повреждений с внешней стороны сводов, как правило, затруднена, а иногда и невозможна, так как эта поверхность обычно недоступна для детального осмотра. Последнее связано с тем, что обследование сводов чаще всего начинается до начала их восстановления, когда внутренняя поверхность бывает оштукатуренной, а внешняя скрыта под существующим полом. Это значительно снижает достоверность обследований и уменьшает исходные данные для поверочных расчетов в соответствии с требованиями норм, таких как ГОСТ 31937-2024 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».

Следует отметить, что наличие трещин в сводах не всегда является признаком исчерпания их несущей способности. Подтверждением этому являются выполненные авторами экспериментальные исследования механизма разрушения образцов каменных арок с соотношением высоты к пролету $f/L = 0,5$. Опорные зоны образцов выполнены жесткими, исключая возможность их поворота. Испытания осуществлялись гидравлическими домкратами в виде сосредоточенной нагрузки, приложенной симметрично в середине пролета образцов (рис. 2). На всех этапах испытаний вплоть до разрушения процесс деформирования и трещинообразования фиксировался скоростной камерой высокого разрешения. Одновременно индукционными датчиками регистрировались вертикальные деформации и-образов. Кроме того, с помощью тензометрических датчиков регистрировались относительные деформации в характерных сечениях образцов. Показания всех измерительных приборов считывались с помощью одного тензометрического моста НВМ Hottinger MGCplus с частотой 10 Гц. Разрушение образцов носило хрупкий характер и сопровождалось образованием трещин, которые идентифицировались с образованием шарниров. На рис. 2 б приведена экспериментальная зависимость вертикальных деформаций и-замкового участка арки от величины нагрузки P . При этом можно выделить четыре характерных уровня нагрузки, при которых в связи с образованием шарниров происходило изменение статической схемы арки. На первом уровне при нагрузке $P = 6,7$ кН, составляющей около 45 % величины разрушающей нагрузки $P_p = 14,8$ кН, в средней замковой части арки образовался первый шарнир. Следующие два шарнира 2 и 3 образовались практически одновременно при уровнях испытательной нагрузки, составляющих соответственно 84 % и 90 % от разрушающей. Окончательное разрушение произошло при нагрузке $P_p = 14,8$ кН в результате образования четвертого шарнира в правой опорной пяте арки, после чего она превратилась в мгновенно изменяемую систему (рис. 2 а).

¹ Исследование деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем: методические рекомендации. М.: Росреставрация; 1989. 164 с. URL: <https://www.restsouz.ru/upload/guidelines/003-BessonovGB-Issledovanie-deformacij-raschyot-nesushchej-sposobnosti-i-konstruktivnoe-ukreplenie-drevnih-raspornyh-sistem.pdf> (дата обращения: 03.02.2026).

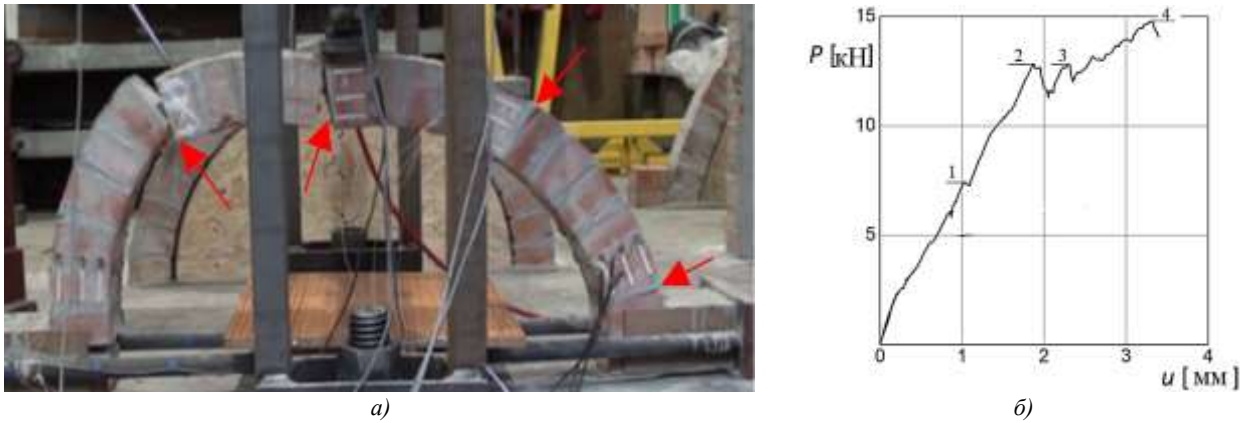


Рис. 2. Механизм разрушения: *a* — каменная арка; *б* — экспериментальная зависимость между величиной нагрузки P и прогибом u -замкового участка [10]

Из приведенных экспериментальных данных следует, что наличие одной трещины в цилиндрических сводах не является признаком исчерпания их несущей способности. Это обстоятельство следует учитывать при обследовании сводов и расчетной проверке их действительной несущей способности в соответствии с требованиями норм. Решение этой задачи возможно численным методом, позволяющим моделировать процесс развития трещин в наиболее напряженных сечениях сводов (рис. 3).

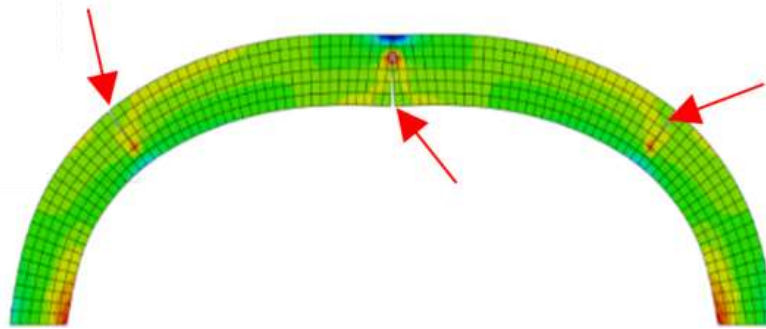


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние арки в стадии образования трещин (указано стрелками) при моделировании методом конечных элементов [10]

Однако в этом случае возникают трудности с учетом геометрической и физической нелинейности, связанные с процессом образования трещин и переходом материала каменной кладки в сжатой зоне сечений с трещинами в пластическое состояние. В связи с этим более предпочтительным может быть кинематический метод, позволяющий оценивать верхнюю границу несущей способности сводов [7–9]. С этой целью используются интеракционные зависимости между изгибающими моментами M_{Rd} и сжимающими усилиями N_{Rd} , при которых наступает переход сечения в предельное состояние (рис. 4).

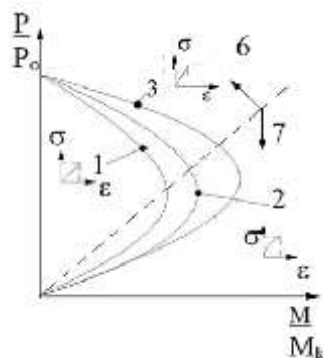


Рис. 4. Кривые интеракции между сжимающим усилием N_{Rd} и изгибающим моментом M_{Rd} в сжато-изгибаемых каменных конструкциях при линейной (1), параболической (2) и идеально пластической (3) зависимостях σ - ϵ каменной кладки [9]

Применительно к оценке несущей способности сводов суть этого метода заключается в реализации следующих процедур. На первом этапе с помощью аналитических методов расчета криволинейных стержней определяются нормальные усилия N и изгибающие моменты M в каждом из сечений свода. При этом выявленные в процессе обследований сводов трещины моделируются в виде шарниров. На следующем этапе полученные значения M и N сравниваются с интеракционными зависимостями предельных значений изгибающих моментов M_{Rd} и продольных сил N_{Rd} , превышение которых означает образование шарнира, который вводится в расчетную схему. Процесс продолжается вплоть до образования последнего шарнира, при котором арочная система трансформируется в механизм (рис. 1 а).

Результаты исследования. Определение интеракционных зависимостей $M_{Rd}-N_{Rd}$ возможно экспериментальным либо численным методами, примером чего являются выполненные авторами исследования. Экспериментальные исследования проводились на 5 образцах кладки размерами $12 \times 25 \times 105$ см из полнотелого кирпича (размер кирпича $12 \times 25 \times 6,5$ см) марки М250 на цементном растворе марки М50. Нагружение образцов осуществлялось с помощью двух независимых гидравлических домкратов, создающих осевое сжатие N и поперечную нагрузку P , вызывающую изгибающий момент (рис. 5).

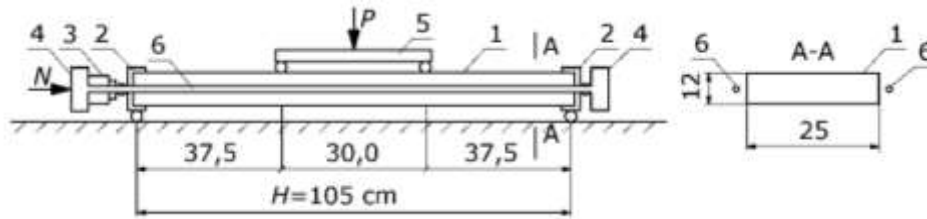


Рис. 5. Схема испытаний опытных каменных образцов на сжатие с изгибом: 1 — испытуемый образец; 2 — стальные оголовки с шарнирами; 3 — гидравлический домкрат, создающий усилие N ; 4 — траверсы для крепления стальных затяжек и гидравлического домкрата; 5 — распределительная балка; 6 — стальные затяжки с силомером [10]

Первый образец был испытан на центральное сжатие осевым усилием N , второй — на изгиб, а остальные образцы испытывались на сжатие с изгибом, причем в процессе их нагружения уровень усилия N сохранялся постоянным, а усилие P было переменным вплоть до разрушения. Установлено, что при действии только изгибающего момента разрушение образца произошло по неперевязанному сечению каменной кладки при величине $M_{Rd} = 1,0$ кН·м (рис. 6 б). При действии только сжимающего усилия разрушение произошло в результате образования продольных трещин при значении $N_{Rd} = 690$ кН (рис. 6 в). При совместном действии сжимающей силы и изгибающего момента характер разрушения зависел от соотношения этих сил и чаще всего сопровождался раздроблением наиболее сжатой зоны образцов (рис. 6 г).



а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Испытание образца кирпичной кладки: а — вид испытательного стенда; б — характер разрушения образцов при изгибе; в — характер разрушения образцов при сжатии; г — характер разрушения образцов при сжатии с изгибом [10]

Численный анализ осуществлялся с использованием комплекса конечно-элементного моделирования высокого уровня. При этом расчетная схема модели (рис. 7) соответствовала схеме лабораторных испытаний образцов (рис. 5).

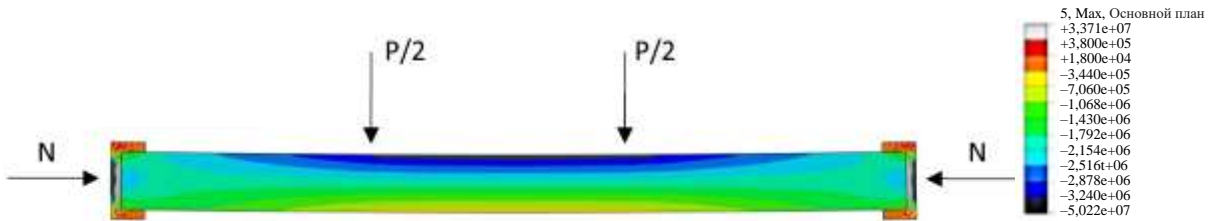


Рис. 7. Расчетное напряженное состояние образца при одновременном действии сжимающего усилия $N = 120$ кН и изгибающего момента $M = 1,24$ кНм [10]

Расчетная модель предусматривала возможность образования трещины в зоне наибольших растягивающих напряжений и их развития по высоте сечения. Кроме того, учитывалось развитие пластических деформаций каменной кладки в сжатой зоне сечения над трещиной. В ходе решения задачи для каждого уровня нагружения, составляющего $N = 10$ кН и $P = 0,05$ кН, корректировались модуль деформаций материала и высота развития трещины. Модуль деформаций кладки назначался в соответствии с экспериментальной зависимостью σ – ε , полученной в результате испытаний стандартных образцов на сжатие вплоть до разрушения (рис. 8 а, б). Прочность на разрыв перпендикулярно растворным швам кладки определялась путем испытаний на растяжение образцов из двух кирпичей, соединенных между собой раствором швом (рис. 8 в).

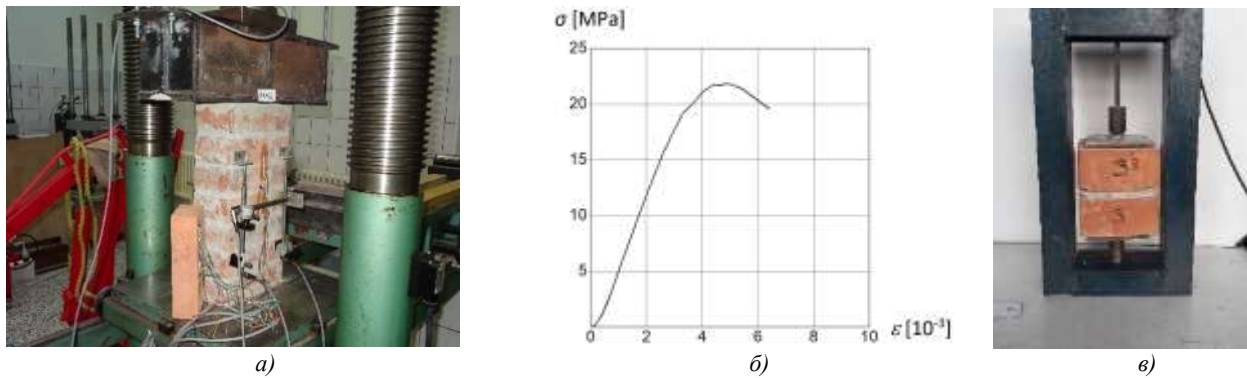


Рис. 8. Испытание образцов каменной кладки: а, б — на сжатие; в — на растяжение поперек растворных швов [10]

Интеракционная зависимость между экспериментальными значениями M_{Rd} и N_{Rd} представлена на рис. 9 в виде аппроксимирующей кривой 1. На этом же рисунке в виде кривой 2 представлена аппроксимация результатов численных исследований.

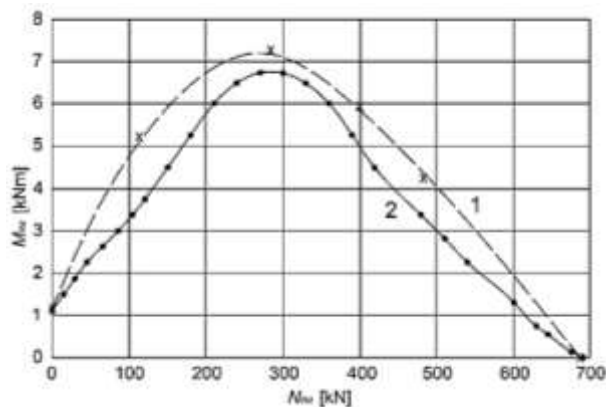


Рис. 9. Интеракционные зависимости M_{Rd} – N_{Rd} образцов каменной кладки при сжатии с изгибом: 1 — экспериментальные; 2 — теоретические [10]

Из приведенных исследований следует, что значения несущей способности экспериментальных образцов оказались на 10–25 % выше результатов численного моделирования. Это связано с неучетом в расчетной модели объемного напряженного состояния сжатой зоны сечения с трещиной при его пластическом деформировании.

Из анализа зависимости $M_{Rd}-N_{Rd}$ следует, что увеличение сжимающего усилия до уровня $N < 0,4N_{Rd}$ нейтрализует отрицательное влияние изгибающего момента, вызывающего образование трещин по неперевязанному сечению каменной кладки. При значениях $N > 0,4N_{Rd}$ доминирующими являются сжимающие напряжения, концентрация которых в наиболее сжатой зоне сечения приводит к раздроблению кладки в этой зоне.

Обсуждение и заключение. Выполненный комплекс исследований позволяет сделать вывод, что интеракционный метод может применяться для оценки несущей способности сводчатых конструкций при их расчете в стержневой постановке и при наличии в них трещин. Саму интеракционную зависимость возможно получить на численной твердотельной модели (прямолинейная призма с возможностью комбинирования значений M и N), что подтверждается результатами ее экспериментальной верификации.

Алгоритм оценки несущей способности свода следующий. Предварительно выполняется ряд относительно несложных испытаний кладки, по результатам которых «настраивается» численная твердотельная модель. Далее в модели варьируются значения продольной и поперечной сил и, опираясь на результаты испытаний, строится интеракционная зависимость $M_{Rd}-N_{Rd}$. Отдельно строится модель свода в стержневой постановке. Определенная расчетная ситуация дает комбинации значений $M-N$ по длине дуги свода. Оценка несущей способности свода вплоть до его физического разрушения ведется путем сопоставления определенной комбинации $M-N$ с кривой интеракционной зависимости $M_{Rd}-N_{Rd}$.

Список литературы / References

1. Пашкин Е.М., Бессонов Г.Б. *Диагностика деформации памятников архитектуры*. Москва: Стройиздат; 1984. 150 с. URL: <https://www.restsouz.ru/upload/biblio/Pashkin-E-M-Bessonov-G-B-Diagnostika-deformacii-pamyatnikov-arhitektury.pdf> (дата обращения: 03.02.2026).
1. Pashkin EM, Bessonov GB *Diagnostics of Deformation of Architectural Monuments*. Moscow: Stroyizdat; 1984. 150 p. (In Russ.) URL: <https://www.restsouz.ru/upload/biblio/Pashkin-E-M-Bessonov-G-B-Diagnostika-deformacii-pamyatnikov-arhitektury.pdf> (accessed: 03.02.2026)
2. Орлович Р.Б., Зимин С.С. Резервы несущей способности каменных распорных конструкций. *Строительные материалы*. 2023;9:32–37. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-32-37>
2. Orlovich RB, Zimin SS Reserves of Load-Bearing Capacity of Stone Spacer Structures. *Building Materials*. 2023;9:32–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-32-37>
3. Физдель И.А. *Дефекты в конструкциях, сооружениях и методы их устранения*. М.: Стройиздат; 1987.
3. Fizdel IA *Defects in Constructions, Structures and Methods of their Elimination*. Moscow: Stroyizdat; 1987. (In Russ.)
4. Павлов В.В., Харьков Е.В. Восстановление работоспособности каменных арок и сводов. *Вестник гражданских инженеров*. 2017;6(65):65–70. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-6-65-70>
4. Pavlov VV, Khor'kov EV Structural Rehabilitation of Masonry Arches and Vaults. *Bulletin of Civil Engineers*. 2017;6(65):65–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-6-65-70>
5. Jasińko J, Tomasz Ł, Rapp P *Naprawa, konserwacja i wzmacnianie wybranych, zabytkowych konstrukcji ceglanych*. Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne; 2006. (In Polish)
5. Nowak R, Orłowicz R Selected Problems of Failures and Repairs of Historic Masonry Vaults. *MATEC Web of Conferences*. 2019;284:05008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928405008>
6. Furtado A, Rodrigues H, Arêde A, Varum H Experimental Characterization of the In-Plane and Out-of-Plane Behaviour of Infill Masonry Walls. *Procedia Engineering*. 2015;114:862–869. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.041>
7. Hendry AW, Sinha BP, Davies SR *Design of Masonry Structures*. London: EFN Spon; 1997. 279 p. URL: <https://thearchiblog.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/02/architecture-ebook-design-of-masonry-structures.pdf> (accessed: 03.02.2026)
8. Dunjic V, Rudisch A, Wittner V, Malcher B, Kolbitsch F *Traglast von historischen gemauerten Gewölben des Hochbaus unter Anwendung der Exzentrizitätsdiagramme*. Mauerwerk; 2017. (in German)
9. Орлович Р.Б., Зимин С.С. Оценка технического состояния исторических каменных зданий. С-Пб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС; 2024.
9. Orlovich RB, Zimin SS Assessment of the Technical Condition of Historical Stone Buildings. S-Pb: POLYTECH-PRESS; 2024. (In Russ.)

Об авторах:

Зимин Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. (195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29), [ORCID](https://orcid.org/), zimin_sergei@mail.ru

Орлович Роман Болеславович, доктор технических наук, профессор, научный консультант ООО «ПИ Геореконструкция» (190005, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Измайловский пр., 4), orlowicz@mail.ru

Данилов Сергей Васильевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства Белорусско-Российского университета. (212000, Беларусь, г. Могилев, пр-т Мира, 43), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9142-1000), danilov2901@mail.ru

Москалькова Юлия Георгиевна, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства Белорусско-Российского университета. (212000, Беларусь, г. Могилев, пр-т Мира, 43), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9142-1000), julia43@tut.by

Заявленный вклад соавторов:

С.С. Зимин: проведение расчетов, подготовка текста и графических материалов;

Р.Б. Орлович: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство;

С.В. Данилов: анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов;

Ю.Г. Москалькова: анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Sergej S. Zimin – Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Institute of Civil Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. (29 Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg, 195251, Russian Federation), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9142-1000), zimin_serger@mail.ru

Roman B. Orlovich – Dr.Sc. (Eng.), Professor, Scientific consultant of the company LLC «PI Georekonstrukciya». (4 Izmailovskiy Ave., St. Petersburg, 195251, Russian Federation) orlowicz@mail.ru

Sergei V. Danilov – Cand.Sci. (Eng.), Head of the Department of Industrial and Civil Construction of the Belarusian-Russian University (43 Mira Ave., Mogilev, 212000, Belarus) [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9142-1000), danilov2901@mail.ru

Yuliya G. Maskalkova – Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Construction of the Belarusian-Russian University (43 Mira Ave., Mogilev, 212000, Belarus) [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9142-1000), julia43@tut.by

Claimed contributorship:

SS Zimin: carrying out the calculations, preparing the manuscript and graphic materials;

RB Orlovich: formation of the basic concept, aims of the research, scientific supervision;

SV Danilov: analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions;

YuG Maskalkova: analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 04.02.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 19.02.2026

Принята к публикации / Accepted 06.03.2026

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 699.841

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-48-67>

Обеспечение прочности, жёсткости и устойчивости несущих конструкций многоэтажного здания сложной формы при сейсмических воздействиях



EDN: ARCPKU

Х.Н. Мажиев¹ ✉, К.Х. Мажиев¹, Ю.В. Панасенко², А.Х. Мажиева¹,
А.Х. Мажиев^{1,3}, А.Х. Мажиев³

¹ Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, г. Грозный, Российская Федерация

² Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, Российская Федерация

³ Академия наук Чеченской Республики, г. Грозный, Российская Федерация

✉ seismofund@mail.ru

Аннотация

Введение. С целью обеспечения сейсмостойкости и снижения сейсмических нагрузок выполнен пространственный расчет несущих конструкций многоэтажного здания сложной формы. В настоящей статье анализируются конструктивная система и расчетно-динамическая модель с учетом основных и особых сочетаний нагрузок.

Материалы и методы. Расчеты проводились аналитическим методом и методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе STARK ES.

Результаты исследования. Получены результаты динамического расчета при основных и особых сочетаниях нагрузок и соответствующих сочетаниях внутренних усилий в рассматриваемых конструкциях многоэтажного здания сложной формы. Всего было использовано 53 нагружения.

Обсуждение и заключение. Результаты расчета многоэтажного здания сложной формы показали, что обеспечивается требуемая прочность, жёсткость и устойчивость несущих конструкций при рассматриваемой расчетной ситуации.

Ключевые слова: здание, сейсмическое воздействие, расчет, нагрузка, конструктивная система, сейсмостойкость, расчетно-динамическая модель, прочность, жёсткость, устойчивость

Для цитирования. Мажиев Х.Н., Мажиев К.Х., Панасенко Ю.В., Мажиева А.Х., Мажиев А.Х., Мажиев А.Х. Обеспечение прочности, жёсткости и устойчивости несущих конструкций многоэтажного здания сложной формы при сейсмических воздействиях. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2026;5(1):48–67. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-48-67>

Original Empirical Research

Ensuring the Strength, Rigidity and Stability of Load-Bearing Structures of a Multi-Story Building of Complex Shape under Seismic Impacts

Khasan N. Mazhiev¹ ✉, Kazbek Kh. Mazhiev¹, Yuri V. Panasenko², Amina Kh. Mazhieva¹,
Aslan Kh. Mazhiev^{1,3}, Adam Kh. Mazhiev³

¹ Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russian Federation

² Central Research Institute of Building Structures named after V.A. Kucherenko JSC "Research Center of Construction", Moscow, Russian Federation

³ Academy of Sciences of the Chechen Republic, Grozny, Russian Federation

✉ seismofund@mail.ru

Abstract

Introduction. In order to ensure earthquake resistance and to reduce seismic loads, a spatial calculation of the load-bearing structures of a multi-storey building of complex shape was performed. This article analyzes the design system, computational and dynamic model taking the main and special combinations of loads into account.

Materials and Methods. The calculations were performed by means of the analytical method and the finite element method (FEM) in the STARK ES software package.

Research Results. The results of dynamic calculation are obtained for basic and special combinations of loads and corresponding combinations of internal forces in the calculated structures of a multi-storey building of complex shape. A total of 53 loadings were used.

Discussion and Conclusion. The results of the calculation of a multi-storey building of complex shape have shown that the required strength, rigidity and stability of load-bearing structures are ensured in the design situation in question.

Keywords: building, seismic impact, calculation, load, structural system, seismic resistance, calculation dynamic model, strength, rigidity, stability

For citation. Mazhiev KhN, Mazhiev KKh, Panasenko YuV, Mazhieva AH, Mazhiev AH, Mazhiev AH Ensuring the Strength, Rigidity and Stability of Load-Bearing Structures of a Multi-Storey Building of Complex Shape under Seismic Influences. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(1):48–67. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-48-67>

Введение. Проектирование высотных зданий сопряжено со сложностью оценки напряженно-деформированного состояния основных несущих конструкций во время сейсмических воздействий.

С целью анализа надежности, прочности, жёсткости и устойчивости несущих строительных конструкций при основных и особых сочетаниях расчетных нагрузок был выполнен пространственный расчет многоэтажного здания сложной формы. Здание возводится на площадке, на которой возможны интенсивные сейсмические воздействия [1–6, 15].

Дана научно-техническая оценка соответствия проектных решений по обеспечению безопасности зданий требованиям нормативных документов Республики Азербайджан, на территории которой возводится здание.

Материалы и методы. Исследуемая конструктивная система представляет собой 29-этажное здание сложной формы высотой 150,70 м с 4-этажной конструкцией в стилобатной части и двумя подземными уровнями. Многоэтажное здание расположено на осушенных землях Каспийского моря на участке строительства размерами 160×80 м и связано с береговой линией через мост и туннель.

Здание запроектировано по схеме рамно-связевого каркаса. Основные несущие конструкции (колонны и балки перекрытий, ядра жесткости, плиты перекрытий и конструкции подвала) запроектированы из монолитного железобетона; стальные колонны и балки — для верха здания.

Система структурной устойчивости состоит из ядер жесткости, проходящих от фундаментной плиты до верхней части здания. В ядрах жесткости расположены восемь лифтов. Ядра также обеспечивают доступ к лестнице. Ядра состоят из стен, которые передают вертикальные и горизонтальные усилия на фундамент [1–6, 15]. Помимо стен, перекрытия поддерживаются вертикальными и наклонными колоннами. Основные ядра имеют размеры в плане 17,40×14,40 м образуют прямоугольную форму. Толщина наружных стен 800 мм, внутренних стен — 300 мм.

Фундамент здания представляет собой сплошную монолитную плиту, опирающуюся на свайное основание. Толщина плиты 2650 мм, 2900 мм под башнями и 750 мм, 1000 мм и 2350 мм для остальной части здания. Сваи диаметром 1,5 м под фундаментом башен и 2,0 м — под фундаментом стилобата/подвала.

Крыша стилобата состоит из стальной конструкции и ее облицовки — стеклянного фасада.

Два железобетонных ядра жесткости с каждой стороны здания на уровне 27 этажа соединены стальной каркасной конструкцией — мега-фермой длиной 90 м, образующей форму полумесяца. В месте соединения высота мега-фермы составляет 7,6 м, в центре — 20,45 м. Крыша над верхним уровнем представляет округлую форму. Соединительные балки в основном представляют собой стальные профили, заключенные в бетон. Соединение фермы с железобетонными ядрами обеспечивается стальными пластинами. Эти железобетонные ядра жесткости являются основными элементами, обеспечивающими устойчивость, прочность и жесткость здания. Элементы фермы были разработаны так, чтобы воспринимать вертикальные и горизонтальные нагрузки. Следует отметить, что главные стальные балки мега-фермы будут подвергаться значительным осевым усилиям из-за общей деформации здания и из-за горизонтальных и вертикальных нагрузок, действующих на здание [7–12].

Предполагается, что часть мега-фермы будет собрана на плите перекрытия стилобата и затем установлена в проектное положение. Схема подъема предполагает, что части мега-фермы и стены железобетонных ядер жесткости будут построены в первую очередь, образуя жестко связанный каркас. Эта консольная рама будет поддерживать подъемную платформу и гидравлические домкраты с целью монтажа средней секции фермы.

Предлагаемая последовательность строительства разделена на следующие этапы:

– Строительство подземной части и стилобата. Первый этап включает в себя устройство конструкций основания. Затем монтируются стены ядер жесткости, после — колонны подвала. После завершения возведения стилобата и крыши подвала предполагается монтаж основных конструкций стальной крыши.

- Возведение башен. Основные стены, колонны и плиты до уровня 27 этажа.
- Монтаж и подъем фермы. Предполагается, что часть стальной фермы будет собрана на уровне земли и затем установлена в проектное положение.

Верхняя часть здания. После завершения железобетонных ядер жесткости и элементов вокруг мега-ферма будет поднята в проектное положение и соединена с ядрами жесткости на уровне 27 этажа. После между уровнями 21–26 этажей будут установлены домкраты. Небольшие стальные части на уровне 18, 19 и 20 этажей будут возведены с помощью башенного крана. Остальные этажи фермы (28 и 29 этажи) могут быть возведены затем с помощью башенного крана.

Для оценки надежности принятых в проекте конструктивных решений был выполнен расчет пространственной модели здания на проектные нагрузки и воздействия. Расчет выполнен с использованием программного комплекса STARK ES [12–16].

В качестве расчетной модели использована пространственная оболочечно-стержневая модель, в которой несущие колонны, ригели и элементы ферм представлены стержневыми элементами общего вида, оболочка покрытия, плиты перекрытий и стены — элементами плоской оболочки (рис. 1).

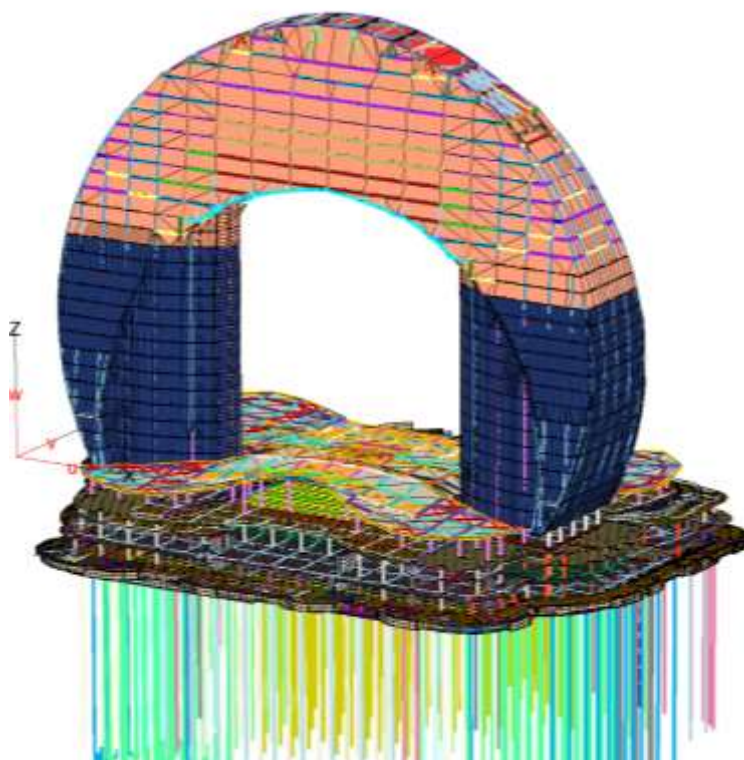


Рис. 1. Конечно-элементная модель многоэтажного здания сложной формы [15]

Уровень ответственности здания в соответствии с ГОСТ 27751-88 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету» — повышенный. Значение коэффициента надёжности по ответственности в соответствии с ГОСТ 27751-88:

- при расчете усилий и напряжений (по первой группе предельных состояний) в строительных конструкциях, основании и фундаментах здания принято равным $\gamma_n = 1,1$;
- при определении перемещений (по второй группе предельных состояний) конструкций и деформаций основания принято равным $\gamma_n = 1,0$;
- при расчете на аварийные воздействия («прогрессирующее» разрушение) и сейсмические воздействия — равным $\gamma_n = 1,0$.

Равномерно распределенные временные нагрузки на плиты пола приняты в соответствии с назначением помещений. Коэффициенты надежности по нагрузке γ_f и коэффициенты сочетаний нагрузок Ψ_i приняты в соответствии с требованиями AzDTN 2.1-1.

При расчете здания учтены следующие нагрузки и воздействия:

- вертикальные постоянные нагрузки от собственного веса несущих и ограждающих конструкций здания;
- длительные нагрузки от инженерного оборудования;
- температурные нагрузки;
- снеговая нагрузка;

- средняя и пульсационные составляющие ветровой нагрузки (тип местности А);
- сейсмическое воздействие для 8-балльного района.

Снеговой район — I. Расчетное значение веса снегового покрова на 1 м² горизонтальной поверхности составляет 0,8 кПа. В расчетной модели приложение снеговой нагрузки выполнено равномерной нагрузкой по всей поверхности покрытия здания. Также учтены снеговые мешки.

Ветровой район — VI. Тип местности А. Нормативное значение ветрового давления $\omega_0 = 0,73 \text{ кН/м}^2$.

Сейсмичность площадки строительства принята равной 8 баллов (повторяемость 1000 лет). Класс грунта по сейсмическим свойствам — III. На рис. 2–3 приведены коэффициент динамичности и значения параметров для расчета на сейсмическое воздействие.

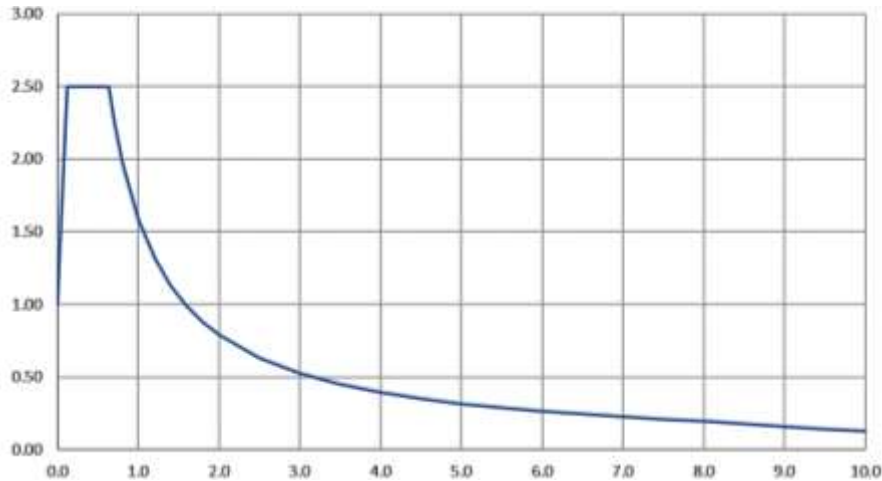


Рис. 2. Коэффициент динамичности $\beta(T)$

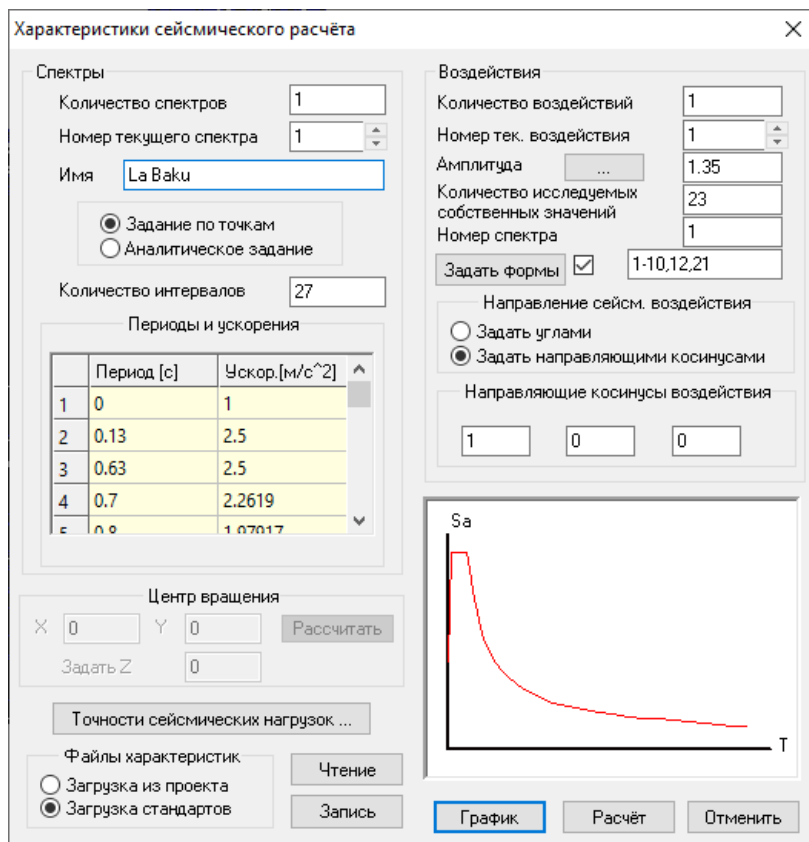
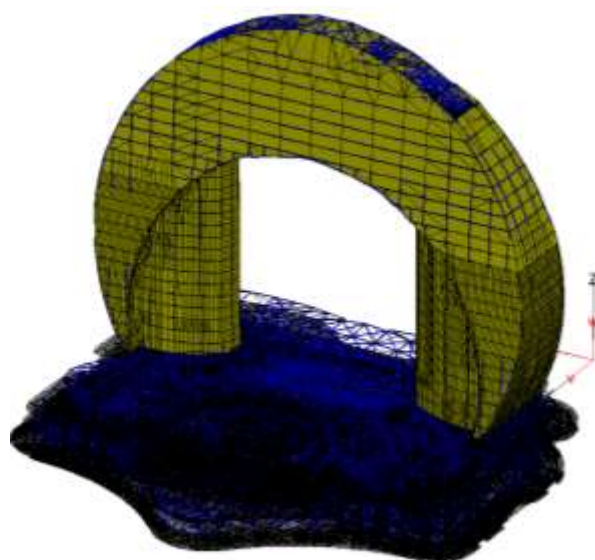


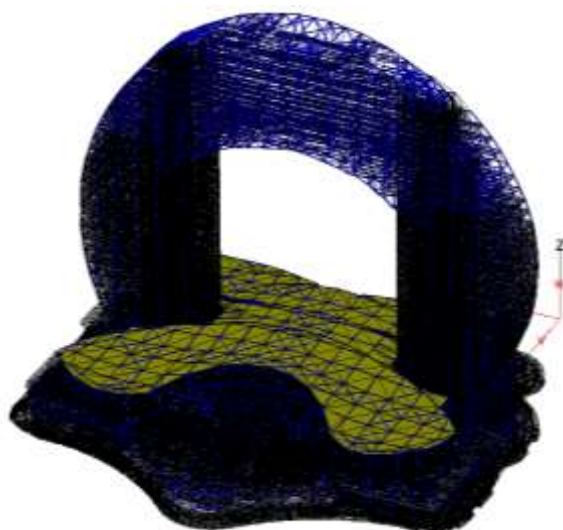
Рис. 3. Характеристики сейсмического расчёта

Нагрузки на расчетную схему были приняты в соответствии с AzDTN 2.1-1 и согласно исходным данным. Всего в расчетной модели многоэтажного здания сложной формы было использовано 53 загрузки для учета всех нагрузок. Схемы приложения некоторых нагрузок показаны на рис. 4–7.



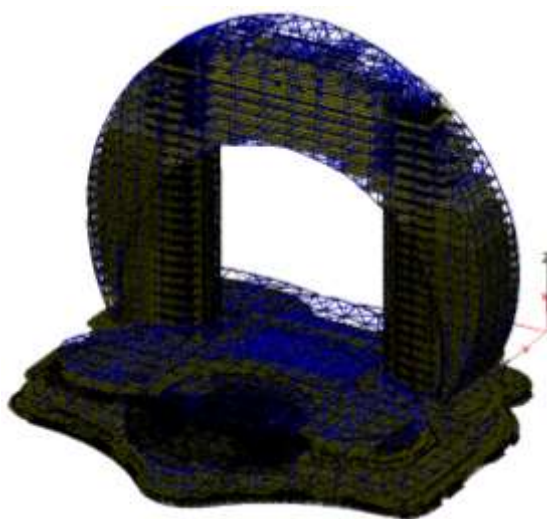
-1.300

Рис. 4. Схема приложения нагрузки от веса конструкций фасадов, kH/m^2 [15]



-0.660

Рис. 5. Схема приложения нагрузки от веса конструкций крыши стилобата, kH/m^2 [15]



-1.950

Рис. 6. Схема приложения нагрузки от веса перегородок, kH/m^2 [15]



Рис. 7. Схема приложения снеговой нагрузки, кН/м^2 [15]

Результаты исследования. Осадка фундамента оценивалась для основных сочетаний полных значений нормативных нагрузок. Картина осадок фундамента представлена на рис. 8. Максимальная осадка составила 50,2 мм.

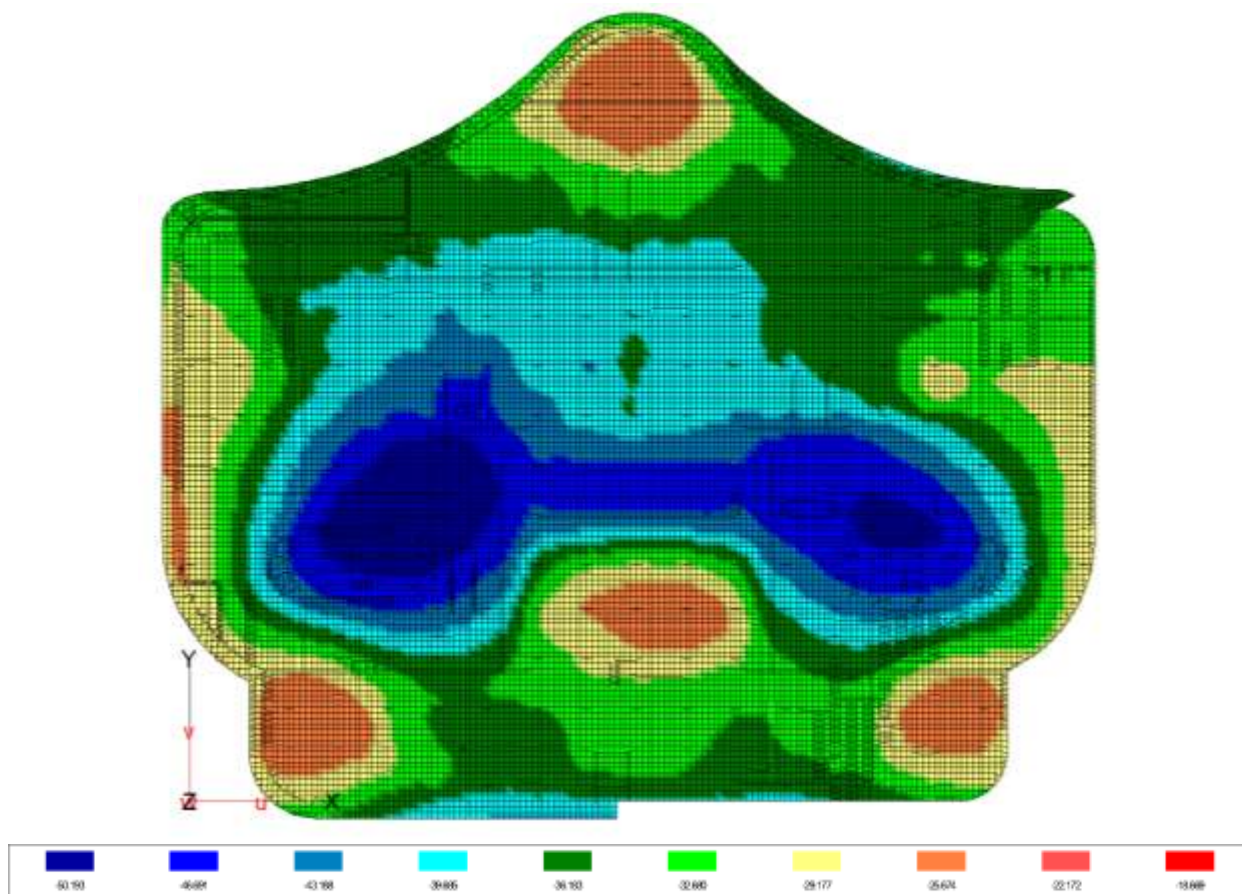


Рис. 8. Картина осадок фундамента, U_z [15]

Максимальное значение относительной разницы осадок от основных сочетаний нагрузок составляет $\Delta s/L = 0,00016$, что не превышает предельного значения, равного 0,005.

Горизонтальные отклонения верха здания оценивались для основных сочетаний полных значений нормативных нагрузок (рис. 9).

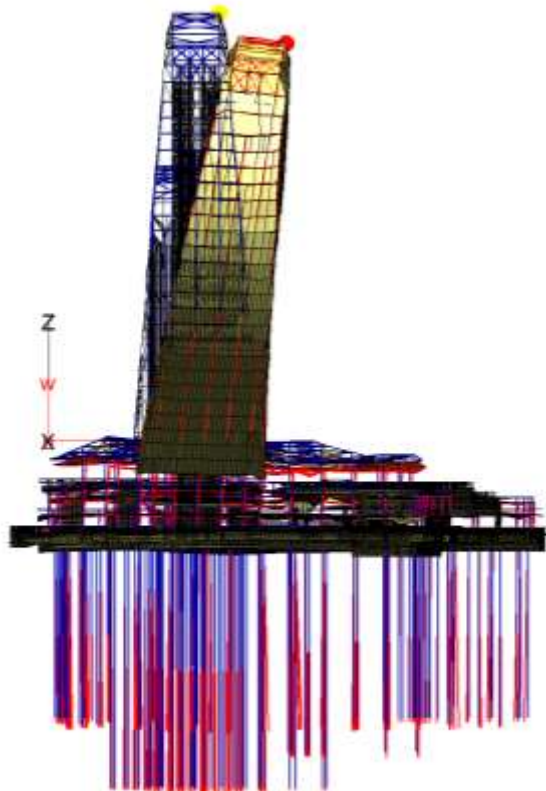


Рис. 9. Горизонтальные перемещения верха здания [15]

Максимальные горизонтальные перемещения верха здания от нормативных величин нагрузок составляют 163,4 мм, что не превышает предельно допустимое значение, равное 300 мм.

Результаты расчета первой формы потери устойчивости приведены на рис. 10.

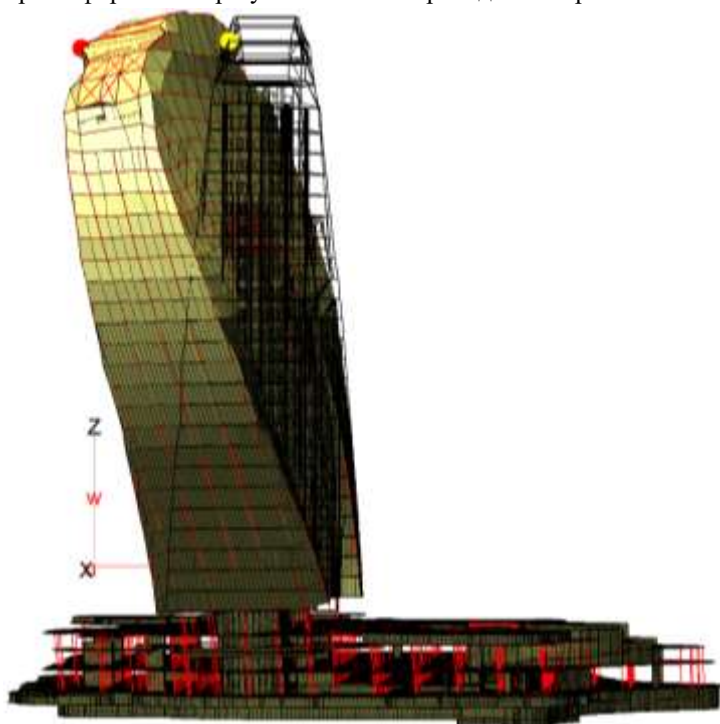


Рис. 10. Форма 1 потери устойчивости [15]

Наименьший критический параметр нагрузки (запас устойчивости) с учетом коэффициента надежности по ответственности равен 10,4. Общая устойчивость несущих конструкций здания обеспечена.

На рис. 11–13 показаны первые формы собственных колебаний многоэтажного здания сложной формы.

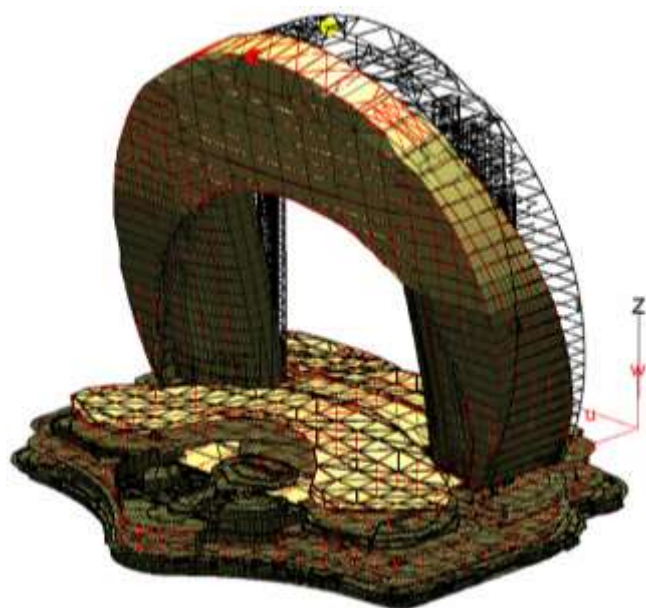


Рис. 11. Первая форма собственных колебаний, $f_1 = 0,340$ Гц [15]



Рис. 12. Вторая форма собственных колебаний, $f_2 = 0,459$ Гц [15]

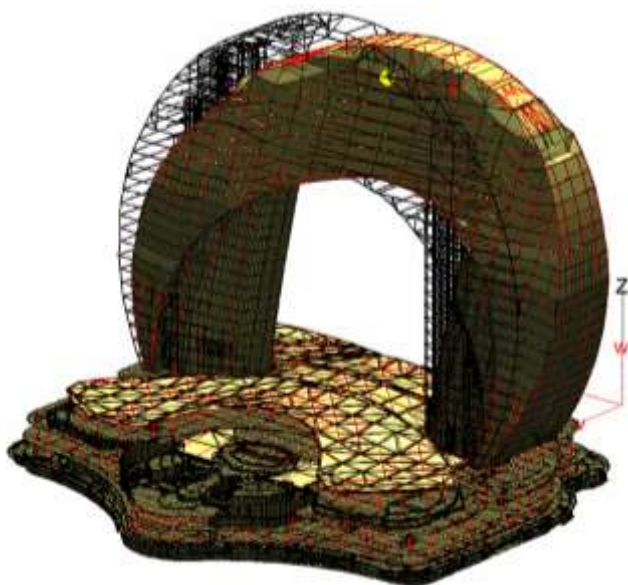


Рис. 13. Третья форма собственных колебаний, $f_3 = 0,484$ Гц [15]

Вертикальные прогибы плит перекрытий западной и восточной башни многоэтажного здания сложной формы на разных отметках показаны на рис. 14–17.

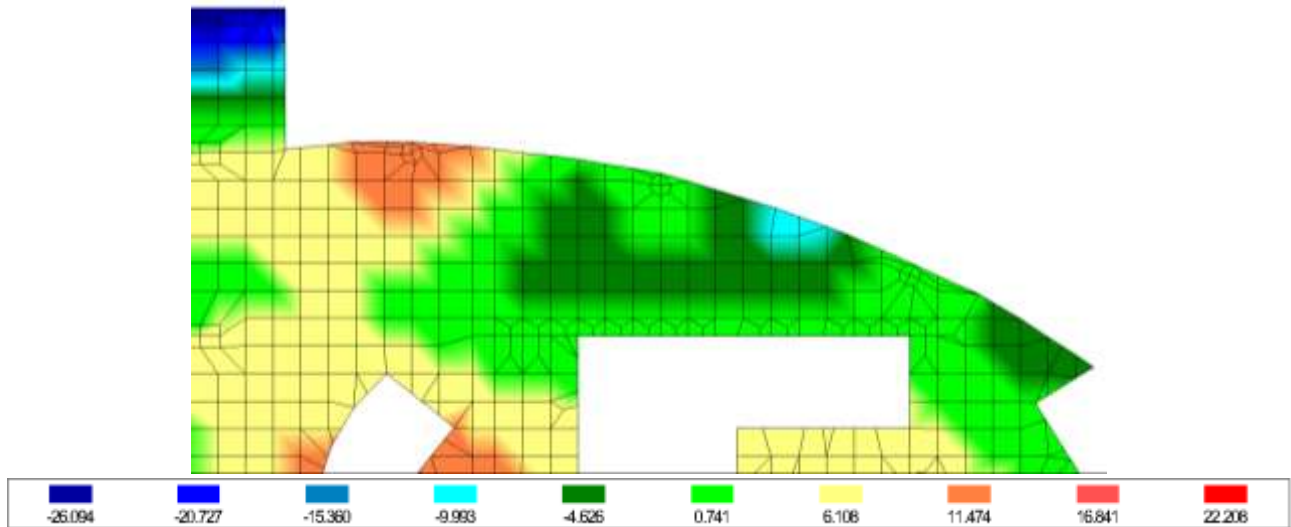


Рис. 14. Максимальные относительные вертикальные перемещения западной башни на отметке $-6,7$ м [15]

Максимальный вертикальный прогиб плиты перекрытия от постоянных и длительных нагрузок составил $11,47$ мм при вылете консоли $4,9$ м, что не превышает предельного значения, равного $l/200 = 49$ мм.

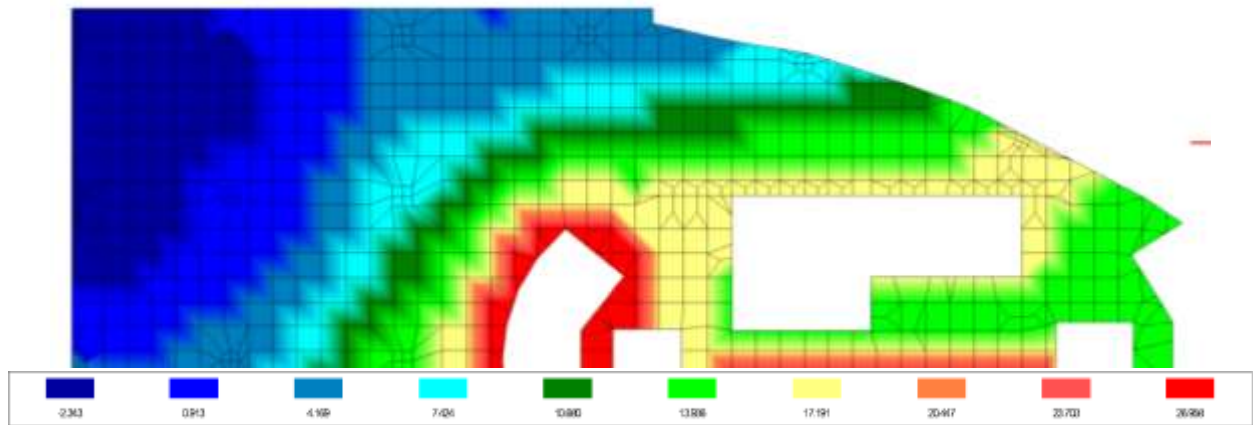


Рис. 15. Максимальные относительные вертикальные перемещения западной башни на отметке $+42,8$ м [15]

Максимальный вертикальный прогиб плиты перекрытия от постоянных и длительных нагрузок составил $1,30$ мм при пролете $6,6$ м, что не превышает предельное значение, равное $l/200 = 33$ мм.

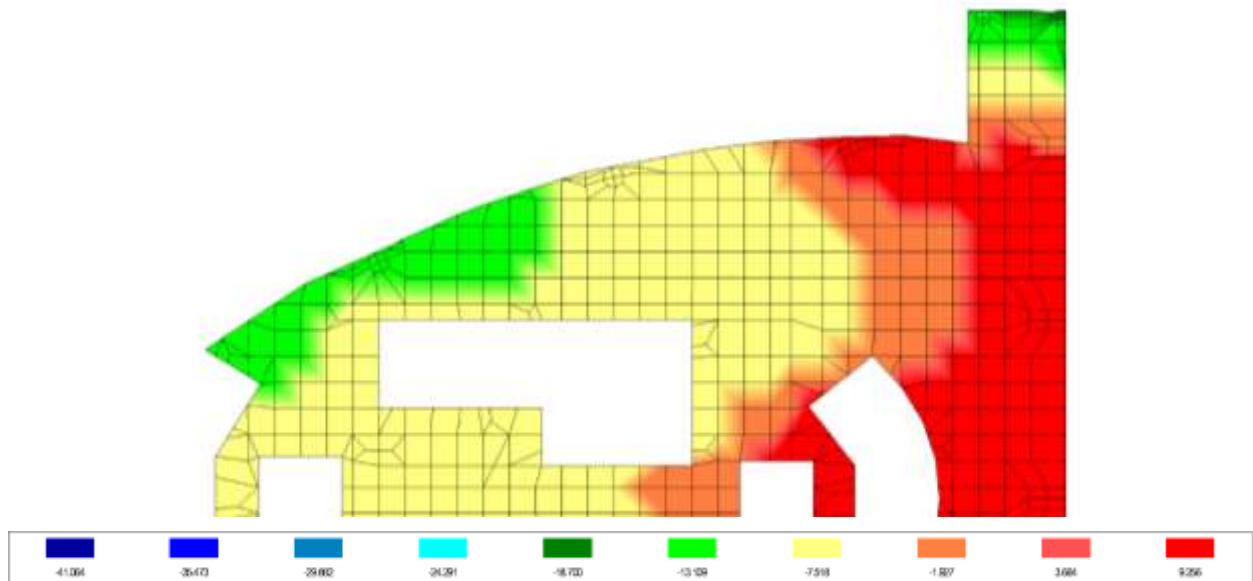


Рис. 16. Максимальные относительные вертикальные перемещения восточной башни на отметке $-6,7$ м [15]

Максимальный вертикальный прогиб плиты перекрытия от постоянных и длительных нагрузок составил 13,8 мм при вылете консоли 4,9 м, что не превышает предельного значения, равного $l/200 = 49$ мм.

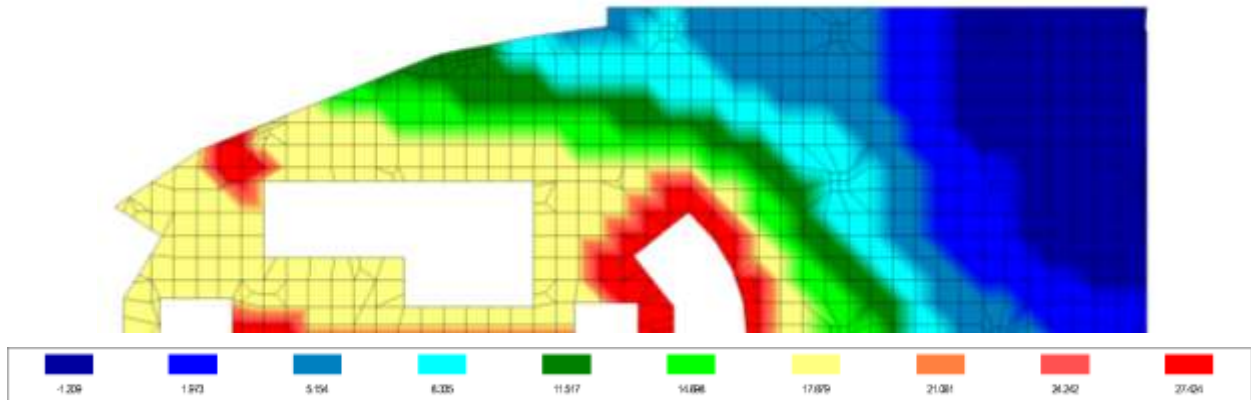


Рис. 17. Максимальные относительные вертикальные перемещения восточной башни на отметке +42,8 м [15]

Максимальный вертикальный прогиб плиты перекрытия от постоянных и длительных нагрузок составил 1,21 мм при пролете 6,6 м, что не превышает предельное значение, равное $l/200 = 33$ мм.

Расчет количества арматуры выполнен при основных и особых, включая сейсмические воздействия, сочетаниях нагрузок с учетом условий прочности и трещиностойкости. Характеристики материалов железобетонных конструкций приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики материалов конструкций

Конструкция	Класс бетона	Класс продольной арматуры	Класс поперечной арматуры	Толщина защитного слоя			
				SO, мм	SU, мм	RO, мм	RU, мм
Фундамент, 750 мм	B45	A500C	A500C	60	90	160	200
Плиты перекрытий	B45	A500C	A500C	35	45	35	45
Стены	B70	A500C	A500C	35	45	35	45
Колонны	B70	A500C	A500C	50	50	50	50

На рис. 18–29 приведены результаты подбора необходимого армирования при особом сочетании нагрузок для некоторых конструкций — части фундаментной плиты многоэтажного здания сложной формы толщиной 750 мм, плит перекрытий западной и восточной башен на отм. +42,80 м.

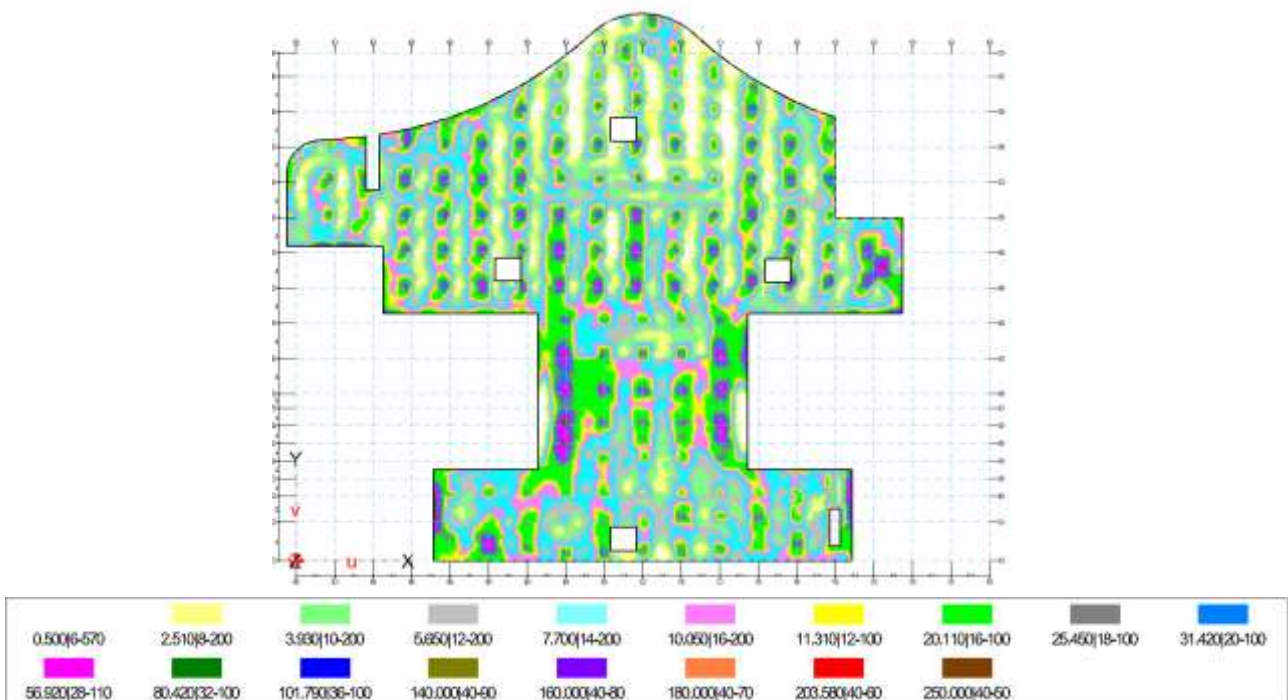


Рис. 18. Армирование фундаментной плиты. Верхняя продольная арматура в направлении оси R, $\text{см}^2/\text{м}$ [15]

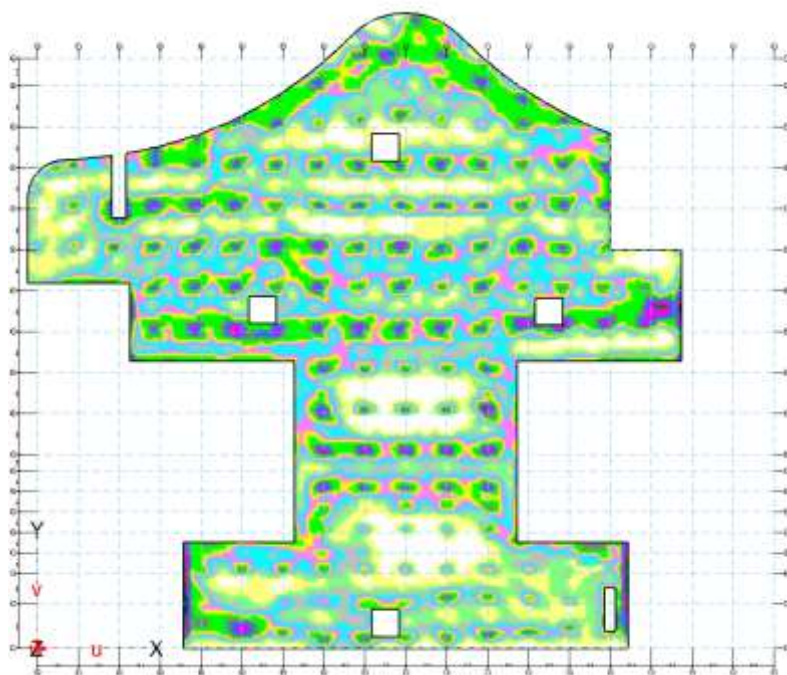


Рис. 19. Армирование фундаментной плиты. Верхняя продольная арматура в направлении оси S , $\text{см}^2/\text{м}$ [15]

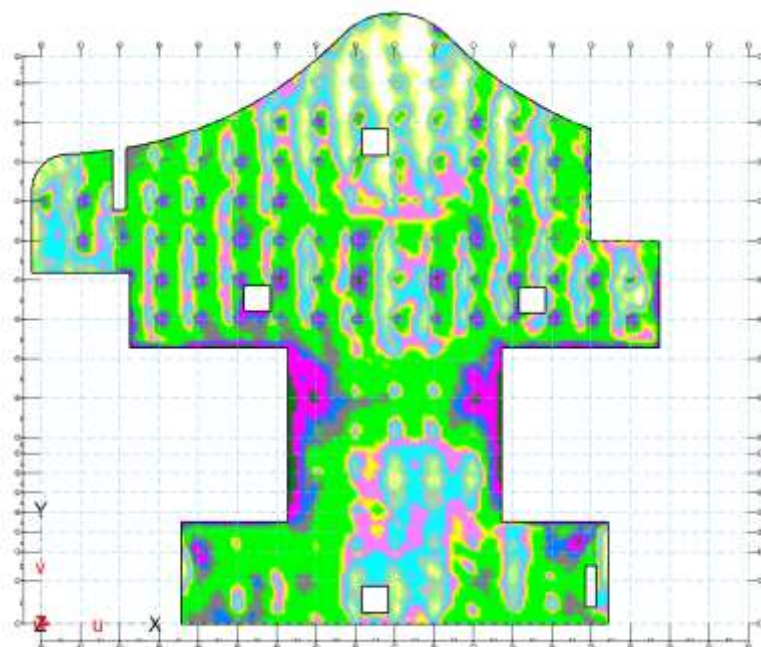


Рис. 20. Армирование фундаментной плиты. Нижняя продольная арматура в направлении оси R , $\text{см}^2/\text{м}$ [15]

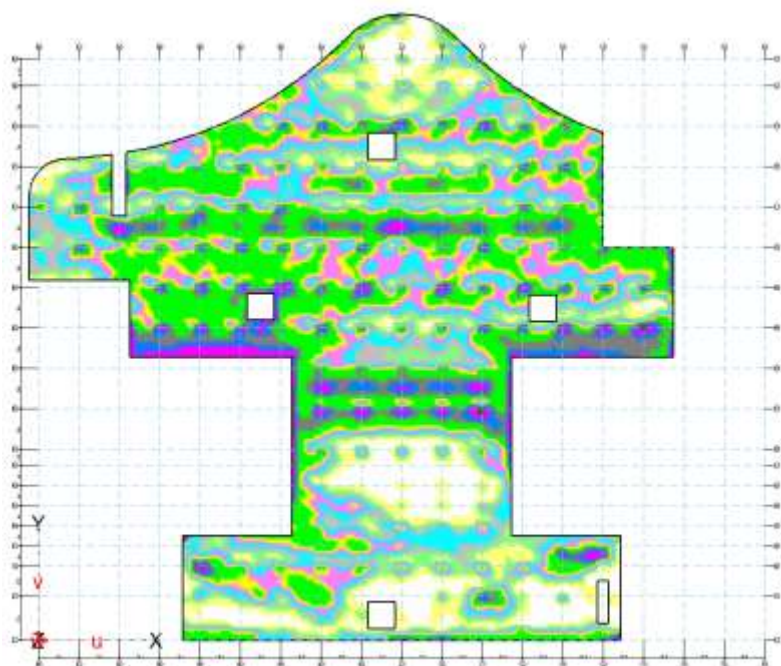


Рис. 21. Армирование фундаментной плиты. Нижняя продольная арматура в направлении оси S, см²/м [15]

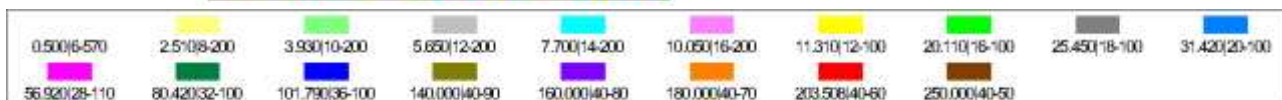
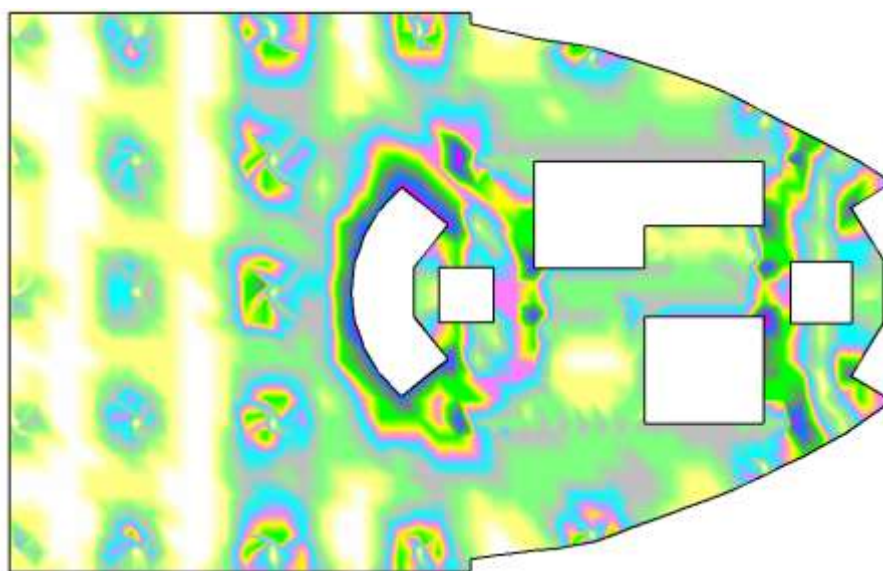


Рис. 22. Армирование плиты перекрытия западной башни на отм. +42,80 м. Верхняя продольная арматура в направлении оси R, см²/м [15]

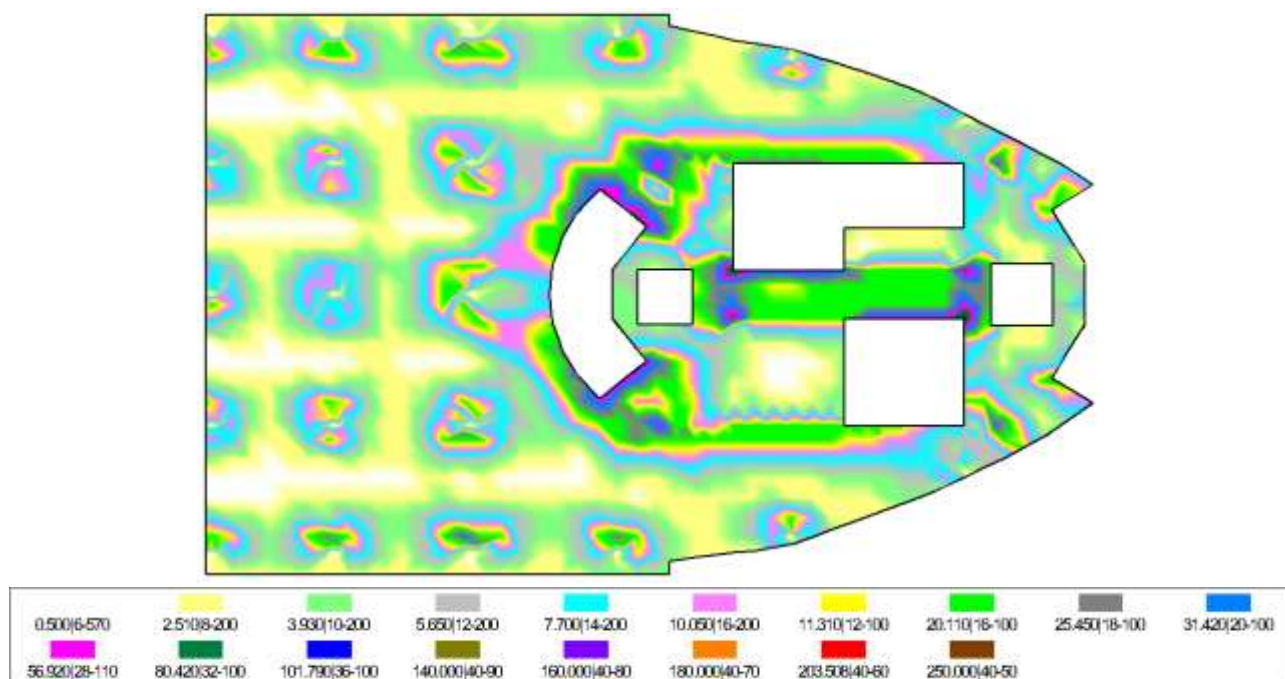


Рис. 23. Армирование плиты перекрытия западной башни на отм. +42,80 м. Верхняя продольная арматура в направлении оси S, см²/м [15]

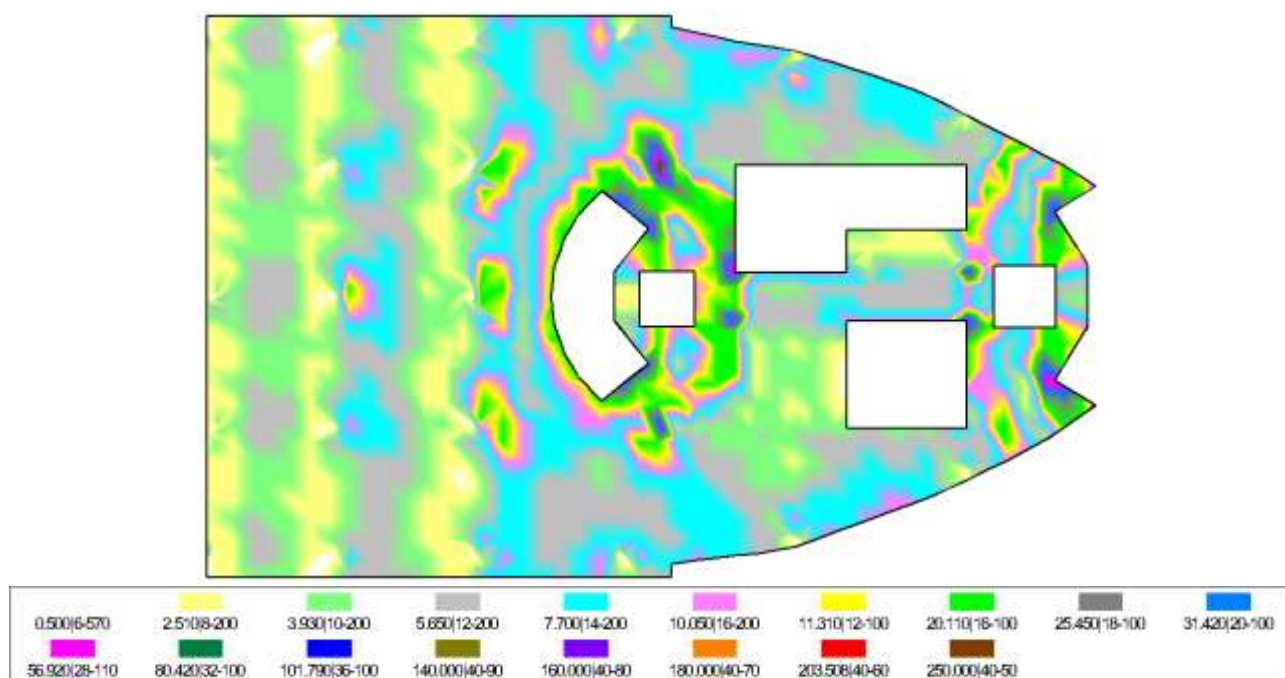


Рис. 24. Армирование плиты перекрытия западной башни на отм. +42,80 м. Нижняя продольная арматура в направлении оси R, см²/м [15]

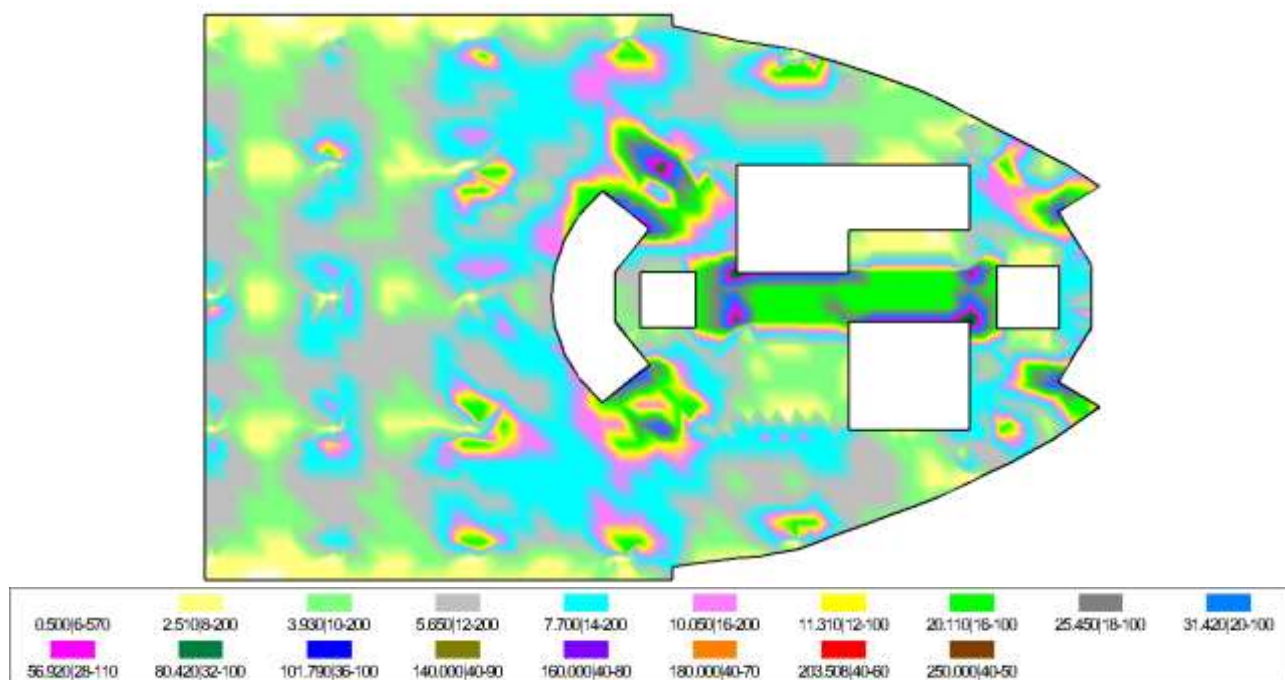


Рис. 25. Армирование плиты перекрытия западной башни на отм. +42,80 м. Нижняя продольная арматура в направлении оси S, см²/м [15]

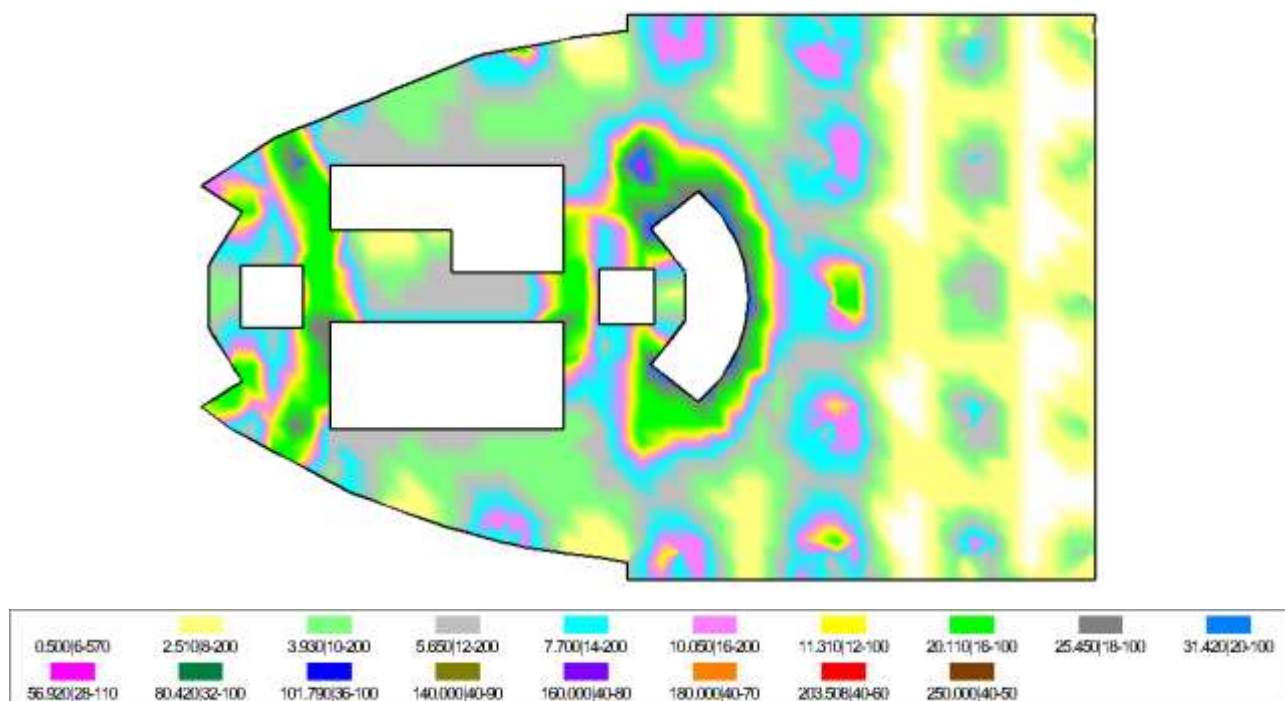


Рис. 26. Армирование плиты перекрытия восточной башни на отм. +42,80 м. Верхняя продольная арматура в направлении оси R, см²/м [15]

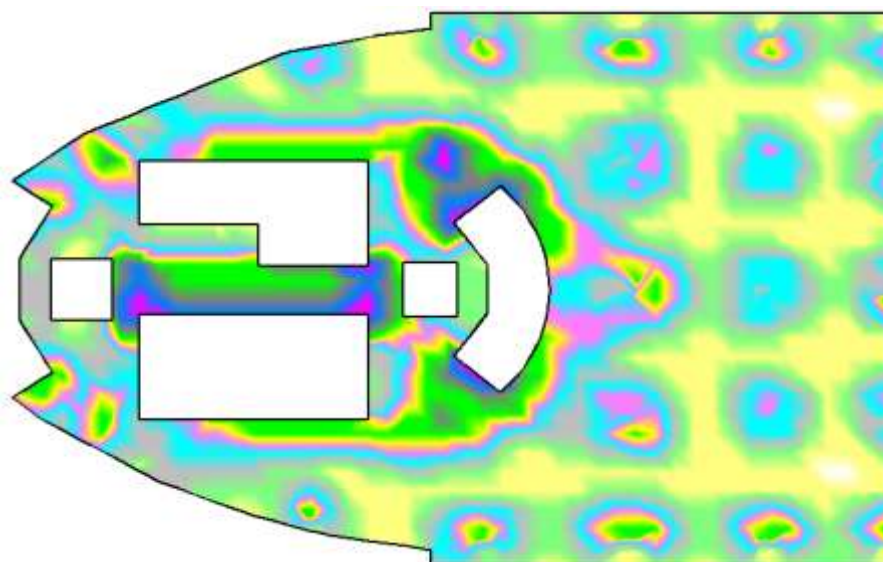


Рис. 27. Армирование плиты перекрытия восточной башни на отм. +42,80 м. Верхняя продольная арматура в направлении оси S, см²/м [15]

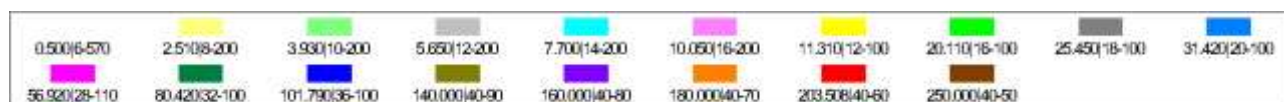
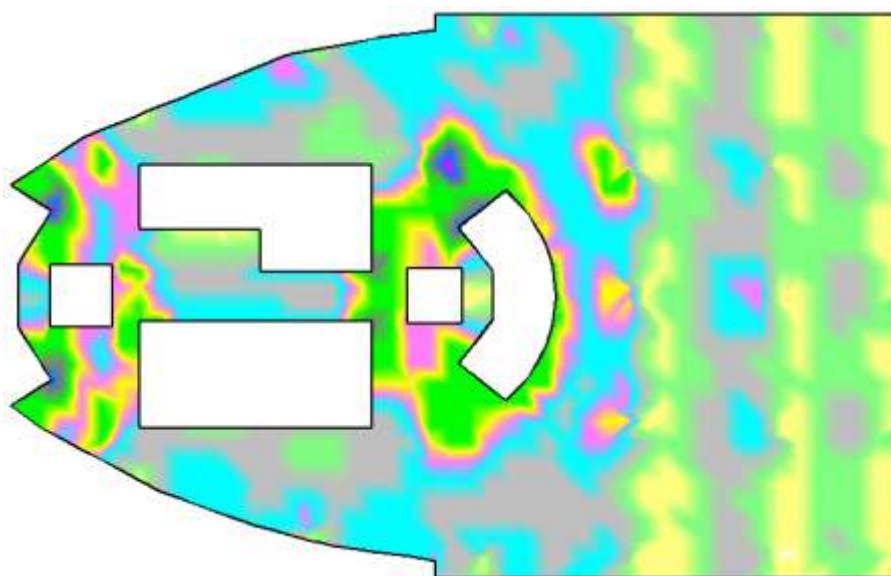


Рис. 28. Армирование плиты перекрытия восточной башни на отм. +42,80 м. Нижняя продольная арматура в направлении оси R, см²/м [15]

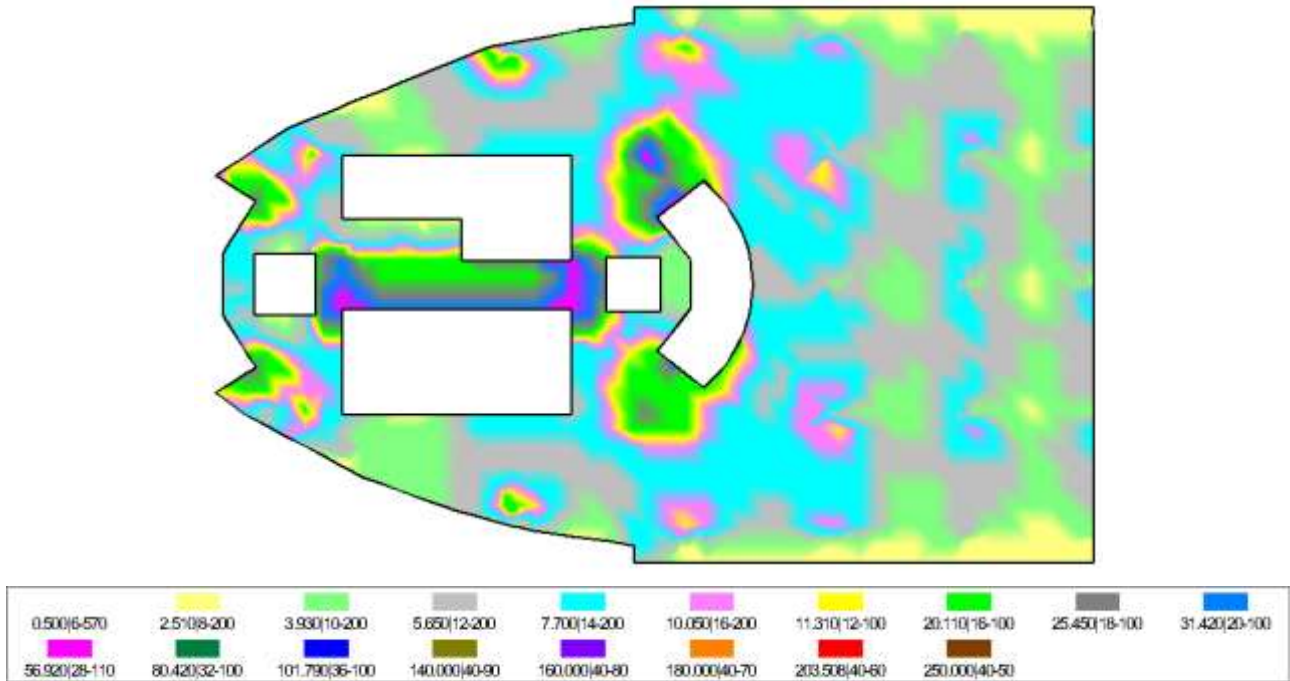


Рис. 29. Армирование плиты перекрытия восточной башни на отм. +42,80 м. Нижняя продольная арматура в направлении оси S, см²/м [15]

В рамках расчетов несущих конструкций многоэтажного здания сложной формы были выполнены следующие работы:

1. Анализ проектной документации, материалов исследований. пространственной расчетной схемы с учетом конструкций свайного фундамента.
2. Сбор нагрузок на конструкции с учетом требований норм Республики Азербайджан, рекомендаций по назначению снеговых и ветровых нагрузок.
3. Расчеты напряженно-деформированного состояния и собственных колебаний пространственных расчетных схем МКЭ, включая верификационные (проверочные) расчеты, в том числе на особое сочетание нагрузок с учетом сейсмического воздействия.
4. Проверка общей жесткости несущей системы здания, осадок фундамента, вертикальных прогибов плит при основных сочетаниях нагрузок и воздействий.
5. Расчет основных элементов несущих конструкций по предельным состояниям.

Обсуждение и заключение. Анализ результатов пространственного расчёта несущих конструкций 29-этажного здания сложной формы с рамно-связевым каркасом, ядрами жёсткости и уникальной мега-фермой подтвердил работоспособность принятых проектных решений в условиях сейсмического воздействия интенсивностью 8 баллов. Расчёты проводились методом конечных элементов в ПК STARK ES с учётом 53 загрузений, включая особые сочетания нагрузок.

Теоретическая значимость исследования заключается в комплексной оценке напряжённо-деформированного состояния комбинированной конструктивной системы, объединяющей монолитные железобетонные ядра жёсткости и стальную мега-ферму длиной 90 м. Полученные результаты подтверждают эффективность использования пространственных конечно-элементных моделей для прогнозирования динамических характеристик зданий сложной геометрической формы. Результаты модального анализа (первые три частоты собственных колебаний: 0,340 Гц, 0,459 Гц и 0,484 Гц) могут служить реперными точками для верификации аналогичных расчётных моделей и уточнения нормативных подходов к определению динамических параметров высотных зданий на слабых грунтах прибрежных территорий.

Практическая значимость работы определяется возможностью непосредственного применения полученных результатов при проектировании многофункциональных комплексов в сейсмоопасных районах, в том числе на осушенных землях Каспийского моря. Ключевые выводы, важные для инженерной практики:

- Максимальная осадка фундамента (50,2 мм) и относительная разность осадок (0,00016) не превышают нормативных пределов, что подтверждает надёжность свайного основания и жёсткость фундаментной плиты.
- Горизонтальные перемещения верха здания (163,4 мм) значительно ниже допускаемых 300 мм, что гарантирует комфортность эксплуатации и сохранность фасадных систем.

- Прогнбы плит перекрытий (от 1,2 до 13,8 мм) соответствуют требованиям второй группы предельных состояний.
- Критический параметр устойчивости (10,4) свидетельствует о высоком запасе общей устойчивости системы.
- Подбранное армирование (рис. 18–29) достаточно для выполнения требований AzDTN 2.3-1, AzDTN 2.16-1 и обеспечивает несущую способность и трещиностойкость железобетонных плит перекрытий, стен ядер жесткости при основном и особом сочетаниях нагрузок, включая сейсмическую.
- Прочность металлических балок удовлетворяет требованиям AzDTN 2.18-1.
- Усилия в сваях не превышают допустимые значения.

Предложенные конструктивные решения — ядра жёсткости, объединённые на уровне 27-го этажа стальной мега-фермой, — могут быть рекомендованы для высотных зданий сложной формы как эффективный способ восприятия горизонтальных сейсмических нагрузок и обеспечения пространственной жёсткости.

Таким образом, принятые в проекте многоэтажного здания сложной формы конструктивные решения обеспечивают надежность, прочность, жёсткость и устойчивость несущих строительных конструкций при основных и особых сочетаниях расчетных нагрузок и воздействий, а полученные результаты могут служить основой для оптимизации проектирования подобных уникальных сооружений.

Список литературы / References

1. Themelis S. *Pushover Analysis for Seismic Assessment and Design of Structures*. Heriot-Watt University: School of the Built Environment; 2008. 287 p. URL: <https://www.ros.hw.ac.uk/items/3f1bb983-8b51-46b4-aa5c-90669fb1b514> (дата обращения: 04.12.2025).

2. Wilson EL. *Static & Dynamic Analysis of Structures: a Physical Approach with Em-Phasis on Earthquake Engineering*. Computers and Structures; 2004. 394 p.

3. Маилян Л.Р., Зубрицкий М.А., Ушаков О.Ю., Сабитов Л.С. Расчет высотных сооружений при сейсмическом воздействии уровня «контрольное землетрясение» нелинейным статическим методом на примере Адыгейской ВЭС. *Строительные материалы и изделия*. 2020;3(1):14–20. <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2020-3-1-14-20>

Mailyan LR, Zubritsky MA, Ushakov OYu, Sabitov LS Calculation of High-Rise Structures under Seismic Effect of the “Controlling Earthquake” Level by Nonlinear Static Method on the Example of Adyghe Wind Power Plant. *Construction Materials and Products*. 2020; 3 (1): 14–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2020-3-1-14-20>

4. Маилян Д.Р., Мурадян В.А. К методике расчета железобетонных внецентренно сжатых колонн. *Инженерный вестник Дона*. 2012;4(2):182. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1333> (дата обращения: 04.12.2025).

Mailyan DR, Muradyan VA. The Method of Calculating Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Columns. *Engineering Journal of Don*. 2012; 4–2 (23): 182. (In Russ.) URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1333> (accessed: 04.12.2025)

5. Муселемов Х.М., Маилян Д.Р., Муселемов Д.У. Напряжённо-деформированное состояние трехслойной трубчатой конструкции при воздействии равномерно распределенной импульсной нагрузки. *Инженерный вестник Дона*. 2023;11(107):386–400. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n11y2023/8786> (дата обращения: 04.12.2025).

Muselemov HM, Mailyan DR, Muselemov DU Stress-Strain State of a Three-Layer Tubular Structure under the Influence of a Uniformly Distributed Pulse Load. *Engineering Journal of Don*. 2023; 11 (107): 386–400. (In Russ.) URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n11y2023/8786> (accessed: 04.12.2025)

6. Пшеничкина В.А., Дроздов В.В., Чаускин А.Ю. *Сейсмическая надежность зданий повышенной этажности*. Волгоград: ВолгГТУ; 2022. 180 с.

Pshenichkina VA, Drozdov VV, Chauskin AY *Seismic Reliability of High-Rise Buildings*. Volgograd: Publishing house of Volgograd State Technical University; 2022. 180 p. (In Russ.)

7. Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Щербань Е.М. Расчет и проектирование строительных конструкций с учетом вариатропии структуры, сечений и дифференциации конструктивных характеристик материалов. *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2021;2(62):27–48. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.62.2.002>

Mailyan LR, Stel'makh SA, Shcherban' EM Calculation and Design of Building Structures Taking into Account the Variotropy of the Structure, Sections and Differentiation of Constructive Characteristics of the Materials. *Scientific Journal of Construction and Architecture*. 2021; 2 (62): 27–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.62.2.002>

8. Маилян Л.Р., Зубрицкий М.А., Ушаков О.Ю., Сабитов Л.С., Бамбулевич М.Д. Оценка сейсмостойкости существующих фундаментов паротурбинных установок при сейсмических воздействиях. *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*. 2020;4(47):79–83. <https://doi.org/10.25628/UNIIP.2020.47.4.013>

Mailyan LR, Zubritsky MA, Ushakov OYu, Sabitov LS, Bambulevich MD Seismic Resistance Estimation of Existing Turbogenerator Foundation Structures under Ductility Level Earthquake Impact by Nonlinear Static Method. *Academic Bulletin of UralNIIProekt RAASN*. 2020; 4 (47): 79–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.25628/UNIIP.2020.47.4.013>

9. Маилиян Л.Р., Языев С.Б., Сабитов Л.С., Коноплёв Ю.Г., Радайкин О.В. Напряженно-деформированное состояние системы «комбинированная башня — железобетонный фундамент — грунт основания» высотных сооружений. *Строительные материалы и изделия*. 2019;2(6):29–37. <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2019-2-6-29-37>

Mailyan LR, Yazyev SB, Sabitov LS, Konoplev YuG, Radaykin OV Stress-Strain State of the System "Combined Tower-Reinforced Concrete Foundation-Foundation Soil" of High-Rise Structures. *Construction Materials and Products*. 2019;2(6):29–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2019-2-6-29-37>

10. Абаканов Т., Кусайнов А.А., Теплых А.В., Бондарев Д.Е. *Сейсмология и сейсмостойкость сооружений*. М.: СКАД СОФТ, АСВ; 2024. 624 с. URL: <https://iasv.ru/sejsmologiya-i-sejstmostojkost-sooruzhenij.html> (дата обращения: 04.12.2025).

Abakanov T, Kusainov AA, Teplykh AV, Bondarev DE *Seismology and Seismic Resistance of Structures*. Moscow: SKAD SOFT Publishing House, ASV Publishing House; 2024. 624 p. (In Russ.) URL: <https://iasv.ru/sejsmologiya-i-sejstmostojkost-sooruzhenij.html> (accessed: 04.12.2025)

11. Мажиев Х.Н., Батаев Д.К.-С., Газиев М.А., Мажиев К.Х., Мажиева А.Х. *Материалы и конструкции для строительства и восстановления зданий и сооружений в сейсмических районах*. Грозный: КНИИ им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук; 2014. 652 с.

Mazhiev KhN, Bataev DKS, Gaziev MA, Mazhiev KKh, Mazhieva AKh *Materials and Structures for the Construction and Restoration of Buildings and Structures in Seismic Areas*. Grozny: Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences; 2014. 652 p. (In Russ.)

12. Мажиев Х.Н., Мажиев К.Х., Панасенко Ю.В., Мажиева А.Х., Мажиев А.Х., Мажиев А.Х. Учет нормативных требований при расчете конструкций бизнесберегающих зданий на сейсмические воздействия. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(4):17–29. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-17-29>

Mazhiev KhN, Mazhiev KKh, Panasenko YuV, Mazhieva AKh, Mazhiev AKh, Mazhiev AKh Adhering to Regulatory Requirements in Calculation of Earthquake Resistance of the Structures of Life-Saving Buildings. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(4):17-29. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-17-29>

13. Мажиев Х.Н., Мажиев К.Х., Мажиева А.Х., Семенов С.Ю., Мажиев А.Х., Мажиев А.Х. Конструктивная система и расчетно-динамическая модель бизнесберегающего многоэтажного здания с кинематической системой сейсмоизоляции. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(3):71–82. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-3-71-82>

Mazhiev KhN, Mazhiev KKh, Mazhieva AKh, Semenov SYu, Mazhiev AKh, Mazhiev AKh Structural System and Computational Dynamic Model of a Life-Saving Multi-Storey Building with a Kinematic Seismic Isolation System. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(3):71-82. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-3-71-82>

14. Мажиев Х.Н., Мажиев К.Х., Панасенко Ю.В., Мажиева А.Х., Мажиев А.Х., Мажиев А.Х. Оценка надежности конструктивных решений при реконструкции объекта культурного наследия с учетом сейсмических воздействий. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(2):21–37. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-21-37>

Mazhiev KhN, Mazhiev KKh, Panasenko YuV, Mazhieva AKh, Mazhiev AKh, Mazhiev AKh Evaluation of the Reliability of Design Solutions during the Reconstruction of a Cultural Heritage Site Taking into Account Seismic Impacts. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(2):21–37. (In Russ.) <http://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-21-37>

15. *Научно-техническое заключение по теме: «Выполнение проверочных расчетов и выдача заключения об обеспечении прочности, жёсткости и устойчивости несущих конструкций по проекту Crescent Development Баку в соответствии со строительными нормами Республики Азербайджан»*. Москва: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»; 2020. 142 с.

Scientific and Technical Conclusion on the Topic: "Performing Verification Calculations and Issuing an Opinion on Ensuring the Strength, Rigidity and Stability of Load-Bearing Structures for the Crescent Development Baku Project in Accordance with the Building Regulations of the Republic of Azerbaijan". Moscow: Central Research Institute of Building Structures named after V.A. Kucherenko, JSC "Research Center "Construction"; 2020. 142 p. (In Russ.)

16. *Рекомендации по учёту волнового характера сейсмического воздействия и защите от аварийных ситуаций*. Москва: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко; 2024.

Recommendations for Taking into Account the Wave Nature of Seismic Impact and Protection against Emergency Situations. Moscow, V.A. Kucherenko Central Research Institute of Structures, 2024. (In Russ.)

Об авторах:

Мажиев Хасан Нажоевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций Грозненского государственного нефтяного технического университета имени академика М.Д. Миллионщикова (364051, Российская Федерация, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100), [ORCID](#), seismofund@mail.ru

Мажиев Казбек Хасанович, кандидат технических наук, лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых, научный руководитель Научно-технического центра «Безопасность зданий и сооружений при природных и техногенных воздействиях», доцент кафедры строительных конструкций Грозненского государственного нефтяного технического университета имени академика М.Д. Миллионщикова (364051, Российская Федерация, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100), [ORCID](#), seismofund@mail.ru

Панасенко Юрий Вячеславович, руководитель группы экспертных расчетов лаборатории автоматизации исследований и проектирования сооружений Центрального научно-исследовательского института строительных конструкций имени В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» (109428, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6), [ORCID](#), panyuriy@eurosoft.ru

Мажиева Амина Хасановна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций Грозненского государственного нефтяного технического университета (364051, Российская Федерация, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100), [ORCID](#), seismofund@mail.ru

Мажиев Аслан Хасанович, научный сотрудник отдела физико-математических и технических наук Центра проблем материаловедения Академии наук Чеченской Республики (364043, РФ, Чеченская Республика, г. Грозный, ул. В. Алиева, 19а); старший преподаватель кафедры строительных конструкций Грозненского государственного нефтяного технического университета имени академика М.Д. Миллионщикова» (364051, Российская Федерация, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100), [ORCID](#), seismofund@mail.ru

Мажиев Адам Хасанович, научный сотрудник отдела физико-математических и технических наук Центра проблем материаловедения Академии наук Чеченской Республики (364043, Российская Федерация, Чеченская Республика, г. Грозный, ул. В.Алиева, 19а), [ORCID](#), seismofund@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Х.Н. Мажиев: научное руководство, формирование основной концепции, цели, задач исследования и его общее планирование, участие в реализации исследования, анализ его результатов, доработка и развитие выводов, корректировка рукописи.

К.Х. Мажиев: участие в реализации исследования, анализ полученных результатов, корректировка рукописи, формулирование выводов.

А.Х. Мажиева: участие в реализации исследования, в разработке расчетно-динамической модели здания, анализ полученных результатов, формулирование выводов.

Ю.В. Панасенко: разработка расчетно-динамической модели здания, проведение расчетов, реализация основных этапов исследования, обработка и анализ полученных результатов, формулирование выводов.

А.Х. Мажиев: участие в проведении расчетов, реализация основных этапов исследования, обработка и анализ полученных результатов, формулирование выводов, подготовка иллюстраций, первоначального текста и общее оформление рукописи.

А.Х. Мажиев: участие в проведении расчетов, реализация основных этапов исследования, обработка и анализ полученных результатов, формулирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the authors:

Khasan N. Mazhiev, Dr.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Building Structures of Millionshchikov Grozny State Oil Technological University (100 Kh.A. Isaev Ave., Grozny, Chechen Republic, 364051, Russian Federation), [ORCID](#), seismofund@mail.ru

Kazbek Kh. Mazhiev, Cand.Sci. (Eng.), Winner of the Prize of the Government of the Russian Federation in Science and Technology for Young Scientists, Scientific Director of the Scientific and Technical Center "Safety of Buildings and Structures under Natural and Man-Made Impacts", Associate Professor of the Department of Building Structures of Millionshchikov Grozny State Oil Technological University (100 Kh.A. Isaev Ave., Grozny, Chechen Republic, 364051, Russian Federation), [ORCID](#), seismofund@mail.ru

Yuri V. Panasenko, Head of the Expert Calculations Group at the Laboratory for Automation of Research and Design of Structures at the Central Research Institute of Building Structures named after V.A. Kucherenko, JSC "Research Center of Construction" (6 2nd Institutskaya Str., Moscow, 109428, Russian Federation), [ORCID](#), panyuriy@eurosoft.ru

Amina Kh. Mazhieva, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Building Structures of Million-shchikov Grozny State Oil Technical University (100 Kh.A. Isaev Ave., Grozny, Chechen Republic, 364051, Russian Federation), [ORCID](#), seismofund@mail.ru

Aslan Kh. Mazhiev, Researcher at the Department of Physical, Mathematical and Technical Sciences of the Center for Materials Science Problems of the Academy of Sciences of the Chechen Republic (19a Vahi Aliev Str., Grozny, Chechen Republic, 364043, Russian Federation); Senior Lecturer at the Department of Building Structures of Million-shchikov Grozny State Oil Technological University (100 Kh.A. Isaev Ave., Grozny, Chechen Republic, 364051, Russian Federation), [ORCID](#), seismofund@mail.ru

Adam Kh. Mazhiev, Researcher at the Department of Physical, Mathematical and Technical Sciences of the Center for Materials Science Problems of the Academy of Sciences of the Chechen Republic (19a Vahi Aliev Str., Grozny, Chechen Republic, 364043, Russian Federation), [ORCID](#), seismofund@mail.ru

Claimed contributorship:

KhN Mazhiev: scientific supervision, formation of the main concept, aims of the study and its general planning, participation in the implementation of the study, analysis of its results, revision and development of the conclusions, correction of the manuscript.

KKh Mazhiev: participation in the implementation of the study, analysis of the results, correction of the manuscript, formulation of the conclusions.

AKh Mazhieva: participation in the implementation of the study, in the development of a computational and dynamic model of the building, analysis of the results, formulation of the conclusions.

YuV Panasenko: development of a computational and dynamic model of the building, calculations, implementation of the main stages of the study, processing and analysis of the results, formulation of the conclusions.

AKh Mazhiev: participation in calculations, implementation of the main stages of the research, processing and analysis of the results, formulation of the conclusions, preparation of the illustrations, original manuscript and general design of the manuscript.

AKh Mazhiev: participation in calculations, implementation of the main stages of the study, processing and analysis of the results, formulation of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

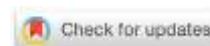
Поступила в редакцию / Received 15.12.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 29.12.2025

Принята к публикации / Accepted 12.01.2026

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION



УДК 69.07:693

Обзор предметного поля

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-68-78>

Общие тенденции развития строительных технологий

А.Х. Байбурин  , А.А. Мельник , А.Р. Лебедь 

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

 abayburin@mail.ru



EDN: HSTYXP

Аннотация

Введение. Развитие строительного комплекса происходит, главным образом, по законам рынка без глубокого анализа тенденций его развития как системы. Государственное регулирование отрасли не в полной мере использует прогнозный анализ на научной основе, а чаще ориентируется на мировой опыт в виде мало связанных данных. Цель работы – восполнить этот пробел общим обзором исследований с привязкой к общим закономерностям развития строительных технологий.

Материалы и методы. Исследование включало в себя поиск информации из открытых источников, её анализ и обобщение с целью определения общих тенденций развития строительных технологий. Использовались материалы авторских исследований и практического опыта строительства. Анализ проводился с использованием законов развития технических систем.

Результаты исследования. Определены этапы эволюции технологий – сборных, литевых (монолитных) и сборно-монолитных) – и пути совершенствования строительных материалов с повышением их физико-механических свойств и одновременным снижением массы, вредных выбросов, стоимости. Выявлено, что совершенствование материалов за счет прямой взаимосвязи в системе с конструкциями приводит также к их динамичному развитию, они становятся более прочными, легкими, многофункциональными и влияют на архитектурно-планировочные решения, увеличивая полезное продаваемое пространство. Отмечены проблемные вопросы, сдерживающие развитие цифровых технологий изготовления конструкций: контроль ранней гидратации 3D-печатного бетона и связь с реологией, обеспечение межслойного сцепления, прочности, внедрение автоматизированного армирования и, в целом, связь между технологией, материалом и эксплуатационными характеристиками как с точки зрения структурной прочности, так и долговечности. Сформулированы основные требования к разработке проектов зданий и сооружений и их частей: экономия пространства, материалов и энергии за счет комплексного проектирования, включающего объединение всех систем здания (структурных, механических, гидравлических, воздушных и электрических) в единую систему. Рассмотрено развитие технологии крупноблочного (модульного) строительства, в том числе и научные исследования сотрудников ЮУрГУ по технологии опускающегося бетона. Уделено внимание мировому опыту модульного строительства и направлению развития модульных комплексных систем.

Обсуждение и заключение. Сделаны выводы о том, что к общим тенденциям развития строительных технологий можно отнести: ускорение крупноблочного (модульного) и монолитного строительства за счет совершенствования материалов (высокофункциональных бетонов, укрупненных армокаркасов, фибры), применения автоматизированных эффективных механизмов, префаб-элементов, оснащения модулей инженерными сетями; уменьшение трудоемкости и повышение управляемости строительного производства за счет снижения трудозатрат в предлагаемых строительных технологиях, автоматизации и цифровизации ведущих процессов; использование в комплексном проектировании технологий информационного моделирования, нейронных сетей, рациональной компоновки внутреннего пространства здания; повышение функциональности и эстетичности фасадных технологий.

Ключевые слова: строительные технологии, монолитное строительство, 3D-печать, модульное строительство, высокофункциональные бетоны, цифровизация строительных проектов, энергосбережение зданий, префаб-конструкции, роботизация строительства.

Благодарности. Статья подготовлена при поддержке девелоперской компании «Брусника». Авторы благодарят коллектив кафедры строительного производства и теории сооружений Южно-Уральского государственного университета, участвовавший в научных исследованиях технологии опускающегося бетона совместно с авторами статьи.

Для цитирования. Байбурин А.Х., Мельник А.А., Лебедь А.Р. Общие тенденции развития строительных технологий. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2026;5(1):68–78. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-68-78>

Subject Field Overview

General Trends in the Development of Construction Technologies

Albert Kh. Baiburin  , Andrey A. Melnik , Anna R. Lebed 

South Ural State University, 76 Lenin Ave., Chelyabinsk, Russian Federation

 abayburin@mail.ru

Abstract

Introduction. The construction industry depends largely in compliance with the laws of the market with no in-depth analysis of its development trends as a system. Government regulation of the industry fails to make a full use of an evidence-based predictive analysis, but rather is more frequently guided by international experience in the form of small data. The aim of the study is to bridge this gap by means of a general overview of the research related to the general patterns of the development of construction technologies.

Materials and Methods. The research included the search for information from open sources, its analysis and synthesis in order to identify the general trends in the development of construction technologies. Materials from the authors' research were employed. The analysis was conducted using the laws of the development of technical systems.

Research Results. The stages of the evolution of building technologies including prefabricated, monolithic, and precast-monolithic methods are discussed. Ways of improving building materials by means of increasing their physical and mechanical properties, reducing weight, and lowering harmful emissions and costs are also identified. It is noteworthy that the improvement of these materials by their direct relationship with structures results in their dynamic development. It is found that the improvement of materials due to the direct relationship in the system with structures also leads to their dynamic development, they become more durable, lightweight, multifunctional and influence architectural and planning solutions increasing useful selling space. Issues hindering the development of digital technologies for the manufacture of structures are noted: control of early hydration of 3D-printed concrete and a relationship with rheology, ensuring inter-layer adhesion, strength, introduction of automated reinforcement and generally the relationship between technology, material and performance characteristics in terms of both structural strength and durability. The basic requirements for the design of buildings and structures and their parts are designed: saving space, materials and energy through integrated design, which includes the integration of all the building systems (structural, mechanical, hydraulic, air and electrical) into a single system. The development of the technology of large-block (modular) construction is considered including the research of SUSU employees on the technology of sinking concrete. Attention is paid to the global experience of modular construction and the direction of development of modular integrated systems.

Discussion and Conclusion. It is concluded that the general trends in the development of construction technologies include: acceleration of large-block (modular) and monolithic construction by improving materials (high-functional concretes, enlarged reinforced frames, fibers), use of automated efficient mechanisms, prefab elements, equipping modules with engineering networks; reducing the complexity and increasing the manageability of construction production by reducing labor costs in the proposed construction technologies, automation and digitalization of the major processes; use of information modeling technologies, neural networks, and rational layout of the interior of a building in complex design; improving the functionality and aesthetics of facade technologies.

Keywords: construction technologies, monolithic construction, 3D printing, modular construction, high-functional concretes, digitalization of construction projects, energy saving of buildings, prefab structures, robotization of construction.

Acknowledgments. The article was prepared with the support of the development company "Brusnika". The authors would like to thank the staff of the Department of Construction Production and Theory of Structures at South Ural State University who participated in the research on the technology of sinking concrete along with the authors of the article.

For citation. Baiburin AKh, Melnik AA, Lebed AR General Trends in the Development of Cconstruction Technologies. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(1):68–78. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-68-78>

Введение. Развитие строительных технологий происходит по общим закономерностям развития технических систем: S-образное развитие; полнота частей системы; «энергетическая проводимость» системы; согласование ритмики частей системы; неравномерность развития частей системы; переход в надсистему; вытеснение человека и повышение уровня управляемости; динамизация. Указанные закономерности имеют мультипликативный характер, то есть реализация одного закона происходит через действие других. Эти тенденции прослеживаются и в строительстве при исследовании взаимодействия системы «материалы — конструкции — параметры здания». Целью данного литературного обзора является выявление связей и закономерностей взаимодействия элементов системы для фокусирования на наиболее важных и перспективных направлениях развития строительной отрасли, что будет полезно для использования участниками строительного комплекса и обучения студентов.

Материалы и методы. В данном исследовании применен классический метод обзора научной литературы с анализом различных факторов и признаков, выявлением связей элементов в системе строительства, перспективных направлений развития, нежелательных эффектов и возможных путей их минимизации. На основе рассмотренных информационных источников выполнена систематизация и обобщение данных исследований, выдвинуты гипотезы. Из рассмотренных источников были выбраны наиболее важные и информативные, в том числе иностранные и отечественные, а также описывающие собственные разработки авторов данной статьи.

Результаты исследования. На основе анализа мирового опыта, приведенного в информационных ресурсах, в строительной сфере можно отметить эволюцию основных вариантов технологии производства строительных конструкций (сборных, литевых (монолитных) и сборно-монолитных):

- ручная кладка из мелких и крупных блоков, деревянных изделий;
- механизированный монтаж из укрупненных изделий (щитов, панелей, модулей, блоков большепролетных покрытий);
- механизированный монтаж укрупненных изделий повышенной или полной заводской готовности (с окнами, отделкой, инженерными системами) — так называемых префаб-элементов;
- автоматизированный и роботизированный монтаж сборных изделий.

Эволюционируют не только материалы для сборного строительства, но и способы соединения сборных элементов: от мокрых процессов и трудоемкой сварки переходят к сухим и технологичным соединениям (болтовым, штыревым, муфтовым, петлевым и т.д.).

В литевой технологии с применением растворов бетонов и других строительных смесей наблюдаются те же этапы с вытеснением человека и повышением управляемости:

- ручная литевая технология;
- механизированное изготовление, транспортирование и укладка смесей;
- применение опалубочных агрегатов и армоопалубочных блоков;
- роботизированная технология 3D-печати и монтажа зданий из предварительно напечатанных 3D-блоков.

Одновременно происходит совершенствование материалов с повышением их физико-механических свойств и снижением массы, вредных выбросов, стоимости. Причем развитие материалов движется с макро- на микро- и далее на наноуровень. Прогнозирование и проектирование свойств материала сначала происходит на уровне макроструктур, затем молекул, атомов и элементарных частиц. Традиционные бетоны заменяются высокофункциональными, высокопрочными, самоуплотняющимися с широким применением минеральных и химических добавок. Появляются новые функции материалов, например самоочистение за счет регулирования микроструктуры применением фотокаталитических добавок.

Теплоэффективные пустотелые кирпичи и камни приходят на смену полнотелым. Согласно линии развития технических систем следующим шагом должен быть капиллярно-пористый материал (КПМ) с определенной структурой, например повышающей паропроницаемость материала от внутренней поверхности к наружной за счет величины пор. Поры могут быть заполнены другим веществом, например клеем, который будет выделяться из поверхностного слоя стеновых блоков, скрепляя их. За счет управляемой микроструктуры может быть осуществлен принцип самообновления красок на фасаде.

Широко применяют различные строительные композиты со специальными свойствами: самоочистение; заλείвание трещин; поглощение парниковых газов. Простое армирование литых конструкций заменяется регулируемым предварительно напряженным либо ферромагнитной фиброй с возможностью управления магнитным и тепловым полем.

Эволюция материалов является основой совершенствования конструкций. Конструкции оценивают по удельным показателям отношения: массы к пролету, высоте или перекрываемой площади; эксплуатационной характеристики (прочности, теплосопротивления, звукоизоляции, долговечности и пр.) к собственному весу, стоимости производства и монтажа. Эти простые отношения, выражающие закон увеличения степени идеальности, показывают, как со временем происходят прогрессивные изменения в строительных материалах, конструкциях и сооружениях.

В последнее время появился термин «цифровое производство бетона» [1]. Цифровые методы производства бетона и вяжущих материалов стали объектом многочисленных исследований и промышленной активности, а индустриализация таких технологий, как 3D-печать, становится всё более реальной. Потенциал революционных изменений в строительстве нарастает не только за счёт снижения затрат, но и за счёт повышения экологической устойчивости и функциональности. Проблемы, связанные с материалами для печатного бетона, значительны. Главными из них являются контроль ранней гидратации и связь с реологией, обеспечение межслойного сцепления, прочности, внедрение автоматизированного армирования и в целом связь между технологией, материалом и эксплуатационными характеристиками как с точки зрения структурной прочности, так и долговечности. Междисциплинарный подход здесь имеет решающее значение, поскольку эта область объединяет множество разрозненных направлений и до сих пор была движима только такими областями, как архитектура и строительство.

Новые конструкции, становясь все более прочными, легкими, многофункциональными влияют на архитектурно-планировочные решения, увеличивая полезное продаваемое пространство. Простой пример такого решения очевиден при замене каркаса с выступающими за плоскость потолка ригелями на каркас с «потайными» ригелями, образующими вместе с перекрытиями плоский потолок (например, дома конструкции МКТ, построенные в г. Миассе Челябинской области). Так, если ригель выступает за плоскость потолка на 30 см, то в 10-этажном здании при устройстве гладких потолков теряется полноценный этаж. В офисных, торговых, спортивных зданиях потеря пространства связана с устройством габаритных инженерных систем в уровне потолка или пола. Уменьшение толщины наружных ограждающих конструкций за счет применения инноваций обеспечивает существенную экономию полезной площади в многоэтажных зданиях.

Концепция «3 for 2» (3 этажа за 2) нацелена на экономию пространства, материалов и энергии за счет комплексного проектирования [2]. Поскольку мир адаптируется к двойной тенденции изменения климата и урбанизации, высотные офисные здания в зонах с жарким и влажным климатом являются одними из главных кандидатов на существенное изменение подхода к проектированию. Комплексный подход в проектировании уделяет особое внимание сокращению размеров инженерных коммуникаций, представляя новую парадигму оптимизации использования пространства, материалов и энергии в зданиях: комплексная интеграция всех систем здания — структурных, механических, гидравлических, воздушных и электрических — на протяжении всего жизненного цикла здания от раннего проектирования до строительства и эксплуатации.

Концепция «3 for 2» реализована в пилотном проекте некоммерческой международной школы в Сингапуре¹. В новых коммерческих зданиях Сингапура до трети закрытых объемов обычно занимают технические системы и конструктивные элементы, занимая ценное пространство, которое в противном случае могло бы быть отведено для жильцов. Стандартные централизованные системы кондиционирования воздуха, используемые в настоящее время, являются одними из основных потребителей этого пространства. В проекте «3 for 2» демонстрируются технологии кондиционирования воздуха, ранее редко применявшиеся в коммерческих зданиях Юго-Восточной Азии, такие как пассивные охлаждающие балки и системы распределительной вентиляции.

В обзоре «Наука о бетоне: прошлое, настоящее и будущее инноваций» [3] отмечается, что бетон, как самый применяемый строительный материал, стремительно эволюционирует, но одновременно сталкивается с проблемами с точки зрения воздействия на окружающую среду, финансовых потребностей, общественного признания и имиджа. Актуальны исследования радикальных изменений в трёх ключевых аспектах использования бетона: армировании, содержании связующего и методах изготовления. Предполагается, что параллельно с внедрением роботизированных методов производства цифровые технологии могут стать ключом к внедрению ряда инноваций: армирование без арматуры с использованием невыпуклых зернистых сред; бетонные конструкции, оптимизированные для работы на сжатие, с использованием оптимизации топологии, архитектурной геометрии и 3D-печати или опалубки в стиле оригами; по-настоящему цифровой бетон благодаря сочетанию массового сбора данных и глубокого обучения.

Для печатного бетона, впрочем, как и для традиционного, большое значение имеет межслойное сцепление. Прочность сцепления при многослойной укладке самоуплотняющегося бетона изучалась в работе [4]. Исследования ЮУрГУ [5, 6] показали положительное влияние акустической обработки бетона на его водопоглощение, что увеличивает сцепление со старым бетоном, а также позволяет улучшить качество технологических швов применением печатных матриц, различных клеев, добавок и шлакощелочных бетонов.

Для 3D-печати бетона проблема сцепления решается установкой арматуры или введением в смесь фибры. Поскольку использование стальной арматуры является обязательным в большинстве строительных конструкций, существует острая необходимость в развитии технологии армирования 3D-печатных конструктивных элементов.

¹ United World College, Singapore. URL: <http://www.systems.arch.ethz.ch/de/research/synergistic-buildings/3for2-beyond-efficiency.html> (дата обращения: 18.07.2025).

В исследовании [7] проведено обоснование 3D-печати стальной арматуры с использованием дуговой сварки металлическим электродом в среде защитного газа. Механические характеристики напечатанных стержней продемонстрировали сопоставимые механические свойства с обычной стальной арматурой того же диаметра.

Логически более технологичным является, по нашему мнению, использование дополнительного манипулятора 3D-принтера, разматывающего и нарезающего на нужные отрезки проволочную арматуру, либо использование фибры из различных материалов. Итоги подобных разработок докладывались на Первой международной конференции RILEM 2018 года по цифровому бетону.

На конференции отмечалось, что большинство исследований печатного бетона проведено на мелких моделях и не учитывает масштабных эффектов. В настоящее время среди крупномасштабных конструкций из цифрового бетона (DFC) реализованы мосты (например, в Китае, Нидерландах, Испании), а также двухэтажные дома, напечатанные за 22 дня в Китае. Масштабные испытания элементов, изготовленных по технологии DFC, показали [8], что требуется осторожность, поскольку испытания материалов, связанные с DFC, находятся в стадии разработки, а масштабные эффекты DFC практически не изучены. Поэтому рекомендуется проводить крупномасштабные испытания в диапазоне от 1:5 до 1:1, если DFC применяется к ответственным конструкциям.

Другой существенный недостаток печатного бетона заключается в низкой производительности цифрового производства DFAB в строительстве. В исследовании [9] произведен анализ затрат и времени на роботизированное возведение стены. В данном примере было обнаружено, что производительность выше при использовании роботизированного метода строительства для сложных стен (например, наружных и декоративных), что указывает на возможность получения значительной экономической выгоды от использования аддитивного DFAB именно для возведения сложных конструкций.

Однако для высотных зданий технология DFC неприменима. Но это не значит, что традиционная технология сборного и монолитного домостроения не будет автоматизироваться и роботизироваться. Еще в 1995 году на конференции в Бельгии была представлена всепогодная автоматизированная система строительства высотных железобетонных зданий [10]. Впервые в мире она была применена при строительстве 15-этажного железобетонного здания в префектуре Тиба в 1995 году (рис. 1).

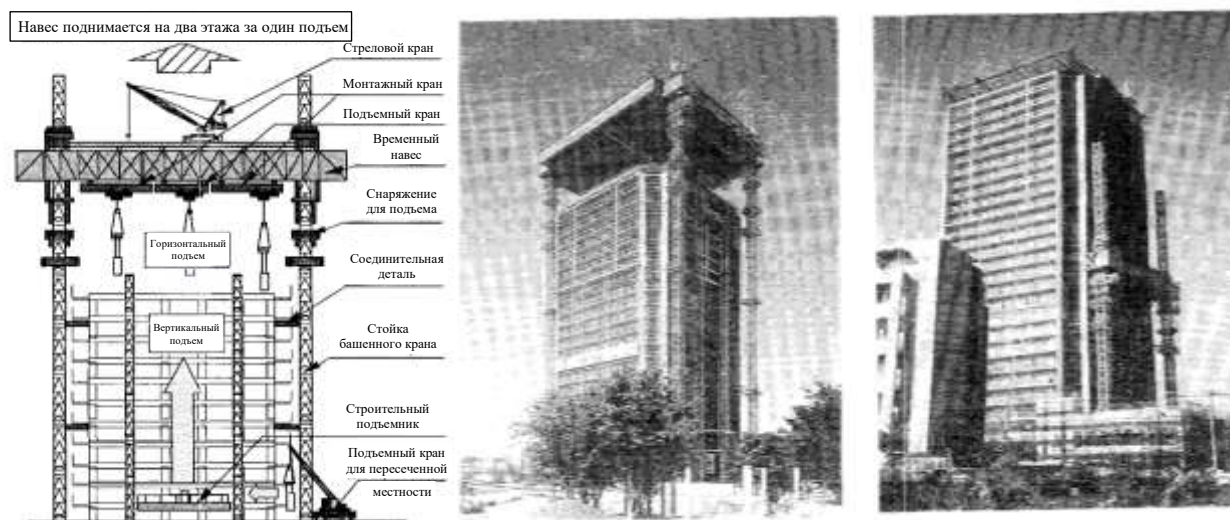


Рис. 1. Автоматизированная система строительства высотных зданий [10]

Эта система включает в себя четыре основных элемента:

- 1) синхронно поднимающееся всепогодное временное сооружение;
- 2) параллельная система подачи материалов;
- 3) заводское изготовление и унификация строительных материалов;
- 4) система управления материалами.

Она обеспечивает высокое качество, улучшает условия труда, сокращает сроки строительства, рабочую силу и количество отходов, а также повышает общую производительность. В проекте BIG CANOPY, как показано на рис. 1, установили параллельную систему подачи элементов на монтаж с тремя автоматизированными мостовыми кранами и одним большим строительным подъемником под всепогодной поднимающейся временной монтажной траверсой.

В проекте применяется система управления материалами, использующая базу данных, связанную с системой CAD, выполнена унификация строительных материалов, заводское изготовление, а также параллельный монтаж.

Основные преимущества технологии: повышение производительности и качества; сокращение сроков строительства; улучшение условий производства (рабочие могут безопасно и комфортно работать под временной крышей); сокращение количества мусора.

Подобная технология (только относящаяся не к сборным, а литевым конструкциям) запатентована и разрабатывается на кафедре строительного производства и теории сооружений ЮУрГУ [11–13]. Опалубочная система представляет собой две вертикальные палубы с минимальным уширением внизу. Вертикальные палубы неподвижны. Находящаяся между ними горизонтальная палуба опускается или поднимается посредством гидродомкратов. Горизонтальная палуба соединена с механизмами подъема или опускания посредством металлического вертикального стержня. Новая технология представляет собой своего рода антисистему скользящей опалубки, перемещаемой вверх.

Процесс осуществляется следующим образом: в исходном состоянии горизонтальная палуба опалубки опущена относительно верха вертикальной палубы. Композитный материал (бетонная смесь) подается в опалубочную систему, где смесь укладывается в пространство между горизонтальной и вертикальной палубой. Между системой «бетон–палуба» находится пленка, которая перемещается вместе со смесью вниз. Данным способом снимаются такие воздействия, как адгезия и когезия, оставляя только минимальное трение между пленкой и вертикальной палубой, а также обеспечивается защита от преждевременного высыхания бетона. Первый слой бетонной смеси набирает заданную прочность с возможностью термообработки, акустического и другого воздействия на рабочие швы. Горизонтальная палуба опускается при помощи домкратов вместе с первым слоем вниз. Затем на первый слой укладывается второй слой и, набирая прочность, опускается. Укладывается третий слой (рис. 2). Затем нижние достаточно отвердевшие слои выходят за пределы вертикальной палубы и т.д.

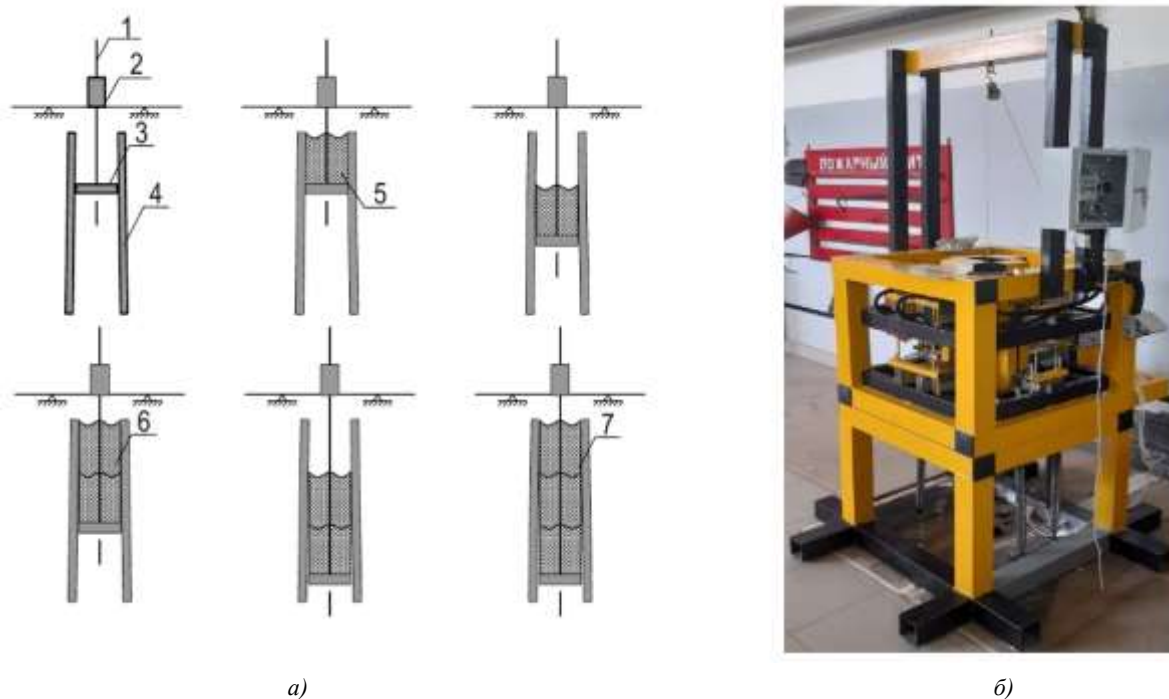


Рис. 2. а) способ формирования железобетонных конструкций посредством опускающегося бетона (патент 2566540):

1 — металлический стержень или трос; 2 — подъемно-опускающее оборудование (гидродомкрат);
3 — горизонтальная палуба; 4 — вертикальная палуба; 5 — первый слой бетона; 6 — второй слой бетона; 7 — третий слой бетона; б) экспериментальная установка ЮУрГУ для отработки технологии

Технология опускающегося бетона может быть применена для возведения глубоких подземных сооружений (шахт, хранилищ опасных отходов, подземных военных сооружений и пр.), подводных сооружений на шельфе, изготовления блок-комнат в мобильных цехах для модульного строительства и пр. Опускаемые методом противовеса конструкции могут обеспечить подъем надземных конструкций, реализуя технологию строительства top-down (вверх и вниз). Преимущество новой монолитной технологии заключается в неподвижности опалубочной системы и возможности оснащения сложными системами обработки и контроля состояния бетонной смеси и бетона под защитой от внешних воздействий, вплоть до полной автоматизации производственных процессов.

Автоматизация монтажа многоэтажных зданий предлагалась еще в СССР путем замены свободного монтажа кранами на принудительный монтаж кранами-манипуляторами² [14]. Традиционный монтажный кран обеспечивает лишь одну из 16–20 операций процесса монтажа сборных конструкций, а остальные выполняются рабочими вручную, трудозатраты которых в 4–5 раз превышают затраты времени работы крана. Эксперименты проводились с краном-автоматом, созданным на базе башенного крана БКСМ-5-5А, но была получена низкая точность позиционирования ± 20 см, что не позволило перейти к промышленному освоению.

В Японии применяется двухстадийная система, управляемая одним оператором и состоящая из свободной подачи сборного элемента обычным башенным краном и робота (манипулятора), устанавливающего элемент на проектное место.

В России были разработаны три варианта принудительного монтажа. Сущность нового способа заключается в том, что с целью повышения производительности и точности монтажа монтируемый элемент захватывается жестко и подается в проектное положение с регистрацией линейных и угловых смещений по трем осям X, Y, Z (по шести координатам). При этом возникает задача обеспечения устойчивости элементов после их установки и отцепления захвата крана-манипулятора. Это достигается использованием метода пространственной самофиксации с применением фиксаторов-ловителей различной конструкции, что одновременно позволяет снизить требования к точности позиционирования. Был разработан кран-манипулятор с жесткой связью рабочего органа и устройством транспортировки, обладающий минимально необходимым количеством степеней свободы устройства передвижения, а значит и минимальным количеством приводных механизмов.

Однако предложенные малолюдные технологии не нашли широкого применения в СССР в виду отсутствия цифрового проектирования, усложнения конструкции кранов, захватных устройств, необходимости дооснащения сборных элементов устройствами самофиксации. А поскольку остальные операции (устройство швов, сварка связей, герметизация) производятся вручную традиционным способом, то имеет место закон неравномерного развития частей системы и рассогласования. Как показало дальнейшее развитие строительной отрасли, полная роботизация была достигнута не в сборной, а в литевой технологии 3D-печати, и причем только тогда, когда мощность вычислительных комплексов позволила выполнять цифровые проекты зданий [15], и были достигнуты успехи в управлении реологией бетонных композитов [3].

Рекорд китайских строителей, построивших сборное 10-этажное здание за 29 часов, подтвердил способ самого быстрого строительства из крупных блоков (префаб-блоков, модулей). Строительство из блок-комнат велось в нескольких городах СССР (Краснодар, Минск, Верхняя Салда и др.), но было ограничено грузоподъемностью монтажных кранов и транспортными габаритами. Стимулом к развитию этого вида домостроения явился ряд преимуществ этих домов перед крупнопанельными [16, 17]: изготовление объемных блоков полной заводской готовности в условиях заводского производства со встроенной мебелью, сантехническим и электротехническим оборудованием; перенесение на завод или домостроительный комбинат (ДСК) 85 % трудовых затрат; сокращение затрат труда на строительной площадке до 25 %; уменьшение количества монтажных элементов в 4–5 раз; сокращение сроков строительства в 3–4 раза; уменьшение трудоемкости в 2,5–2,8 раза; снижение расхода бетона на 25–28 %; существенное снижение накладных расходов и затрат на временные сооружения и др.

Размеры и вес железобетонных блоков были невелики. На Краснодарском ДСК выпускали блоки в виде ребристой коробки типа «лежащий стакан» размером 3×5 м и весом 5–9 тонн в зависимости от оснащения. Сегодня модульный продукт АО СЗ «ОБД» г. Краснодара значительно усовершенствован и достигает по массе 20 тонн и позволяет за 4 месяца построить 16-этажный дом (16000 м²). Минские блоки типа «колпак» примерно таких же размеров и веса применялись для объемно-блочных домов серии 3А-ОПБ. В Воронеже с 2012 года действует завод блочного домостроения «Выбор–ОБД» по производству железобетонных модулей типа «колпак» [18].

Развитие строительной индустрии позволило в настоящее время значительно увеличить размеры и вес модулей для блочного строительства. Московский завод ООО «Концерн МонАрх» (рис. 3) выпускает самые большие в мире блоки-комнаты габаритами до 15,5×7,5×3,75 м площадью свыше 100 м² и весом до 40 тонн в базисном каркасе и 55–58 тонн — с полной отделкой.

Технология позволяет монтировать 25 модулей (1800 м²) в сутки, 450 тысяч квадратных метров готового жилья в год. Впервые в мире освоено изготовление трехэтажных модулей лестничных клеток и лифтовых шахт. За счет максимальной роботизации и автоматизации заводских процессов изготовления модулей достигнуто значительное сокращение сроков строительства домов. Первая очередь завода во Внуково запустилась в июле 2023 года.

² Вильман Ю.А. Технология строительных процессов и возведения зданий. *Современные прогрессивные методы: учебное пособие*. М.: АСВ; 2011. 336 с.

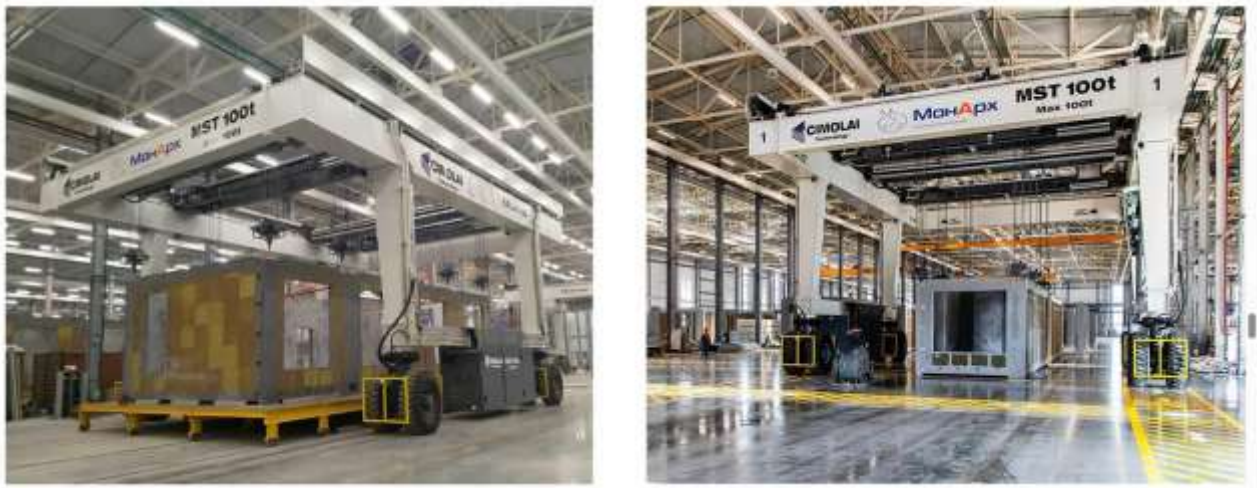


Рис. 3. Технологический порталный транспортер ($Q=100$ т) конвейерной сборки модулей группы компаний «МонАрх»

Среди главных трудностей технологии модульного строительства концерна «МонАрх» следует отметить сложную логистику ночной доставки модулей с использованием двух полос движения и потребность в мощных кранах (как правило, производства Германии или Китая).

В настоящее время концерн «МонАрх» выпускает около 2000 модулей в год и участвует в программе реновации. В 2025 году на Сиреневом бульваре в Москве из 114 крупногабаритных модулей за две недели построен детский сад на 300 мест.

Зарубежные системы модульного строительства известны со времен ЖК «Хабитат 67» (1967) и башни Накагин в Токио (1972), используют в основном блоки с металлическим каркасом, такие как ADK Modulraum (Германия), Vision Modular, Assael (Англия) и др. Металлический каркас применяют также для производства блок-кают для круизных туристических лайнеров.

В блочном исполнении могут поставляться и специальные MEP-модули [19]. Модульные инженерные системы — «механические, электрические и сантехнические системы» (MEP) — подразумевают предварительное изготовление и сборку компонентов инженерных систем в контролируемых заводских условиях перед их доставкой на строительную площадку для установки. Такой подход обеспечивает множество преимуществ, включая повышение эффективности, экономию средств, ускорение сроков реализации проекта и улучшенный контроль качества.

Эти модули объединяют различные компоненты MEP, такие как трубопроводы, воздуховоды, электропроводку и оборудование, в единый блок. Оборудование, монтируемое в блоках MEP: рамы с теплообменниками, насосами или другим инженерным оборудованием со встроенными трубопроводами и электрическими системами; полностью оборудованные ванные комнаты с сантехническими, электрическими и HVAC компонентами (Heating, ventilation, and air conditioning); подвесные механические стойки с трубопроводами, воздуховодами и электрическими системами для эффективного распределения в здании или сооружении.

Проблемы, связанные с экологичностью, альтернативными источниками энергии и изменением образа жизни (например, в связи с пандемией), привели к резкому росту производства зданий с использованием современных методов строительства, особенно в жилищном строительстве. Эти методы предполагают использование новых технологий в качестве альтернативы традиционному строительству в интеллектуальных зданиях. На фоне развития индустрии 4.0 существует острая необходимость в комплексном проектировании с использованием машинного обучения, нейросетевых и генеративных алгоритмов [20].

Кроме того, важно обратить внимание на результаты исследований, в которых инструменты оптимизации использовались для разработки энергоэффективных и рациональных графиков строительства [21]. С ростом глобальной осведомленности о проблемах охраны окружающей среды строительная индустрия вынуждена применять инновационные материалы и методы, позволяющие сделать процесс строительства более энергоэффективным и экологичным. Руководители проектов должны использовать инструменты оптимизации в своих процедурах планирования для решения этих проблем на ранних стадиях обоснования проектов.

Обсуждение и заключение. Таким образом, среди основных тенденций развития строительных технологий следует выделить следующие:

- быстрая эволюция материалов для строительства с акцентом на высокофункциональные бетоны, новые композиты, капиллярно-пористые материалы и экологичные материалы из отходов с возможностью их переработки и повторного использования;
- цифровизация проектов и технологии: BIM-проектирование (с развитием 3D, 4D, 5D...); переход к электронному документообороту (ГОСТ 70108-2025 «Документация исполнительная. Формирование и ведение в электронном виде»); 3D-печать конструкций и опалубки; автоматизация процессов поставок, строительного контроля, организации и управления; точное позиционирование и автоматизация работы строительных машин;
- повышение заводской готовности, размеров и архитектурного и конструктивного качества сборных элементов (так называемые прекаст- и префаб-технологии);
- развитие модульного строительства в России из каркасных и железобетонных крупногабаритных блоков с частичной и полной отделкой;
- повышение функциональности и эстетичности фасадных технологий: архитектурно-конструктивные фасадные панели; самоочищение и самовосстановление фасадных материалов; интеллектуальные фасады;
- развитие монолитного строительства с использованием высокофункциональных бетонов, укрупненных арматурных каркасов, фибры, высокопроизводительных механизмов, а также префаб-элементов для сложных многодельных элементов здания с целью ускорения строительства;
- полная роботизация некоторых процессов отделки;
- внедрение энергосберегающих и «зеленых» решений в инженерные системы зданий (не только уникальных);
- повышение качества благоустройства, инфраструктуры, индекса качества городской среды.

В результате обзора мирового опыта сформулированы общие тенденции развития технологий в строительстве, на которые стоит обратить внимание строительным компаниям, ориентированным на непрерывное развитие и нацеленным на лидирующие позиции в отрасли.

Список литературы / References

1. Wangler T, Roussel N, Bos FP, Salet TAM, Flatt RJ Digital Concrete: A Review. *Cement and Concrete Research*. 2019;123:105780. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105780>
2. Schlueter A, Rysanek A, Miller C, Pantelic J, Meggers F, Mast M, Bruelisauer M, Wee CK 3for2 Realizing Spatial Material and Energy Savings through Integrated Design. *CTBUH Journal*. 2016;2:40–45 URL: https://www.researchgate.net/publication/303650422_3for2_realizing_spatial_material_and_energy_savings_through_integrated_design (accessed: 22.07.2025)
3. Damme HV Concrete Material Science: Past, Present, and Future Innovations. *Cement and Concrete Research*. 2018;112:5–24. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.002>
4. Megid WA, Khayat KH Bond Strength in Multilayer Casting of Self-Consolidating Concrete. *Mater. J*. 2017;114:467–476. <https://doi.org/10.14359/51689597>
5. Kagan MN, Baiburin AH, Sapozhnikov SB Research the Influence of Acoustical Treatment of Concrete on its Water Absorption. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;451:012087. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012087>
6. Koval SB, Kagan MN Analysis of Various Media Concrete Penetrating Ability Depending on Different Factors Affecting Water Absorption. *Procedia Engineering*. 2017;206:819–825. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.557>
7. Mechtcherine V, Grafe J, Nerella VN, Spaniol E, Hertel M, Füssel U 3D-Printed Steel Reinforcement for Digital Concrete Construction – Manufacture, Mechanical Properties and Bond Behavior. *Construction and Building Materials*. 2018;179:125–137. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.202>
8. Bos F, Wolfs R, Ahmed Z, Salet T Large Scale Testing of Digitally Fabricated Concrete (DFC) Elements. *T. Wangler, R.J. Flatt (Eds.), First RILEM Int. Conf. Concr. Digit. Fabr. – Digit. Concr. 2018*. Springer International Publishing; 2019:129–147. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99519-9_12
9. de Soto BG, Agustí-Juan I, Hunhevicz J, Joss S, Graser K, Habert G, Adey BT Productivity of Digital Fabrication in Construction: Cost and Time Analysis of a Robotically Built Wall. *Automation in Construction*. 2018;92:297–311. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.004>
10. Hamada K, Furuya N, Inoue Y, Wakisaka T Development of Automated Construction System for High-Rise Reinforced Concrete Buildings. *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat No98CH36146), Leuven, Belgium*, 1998;3:2428–2433. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1998.680704>
11. Хафизов Т.М., Байбуринов А.Х., Денисов С.Е., Овчинников А.Д. Способ совмещенного строительства зданий и сооружений посредством опускающегося бетона. *Вестник ЮУрГУ*. 2023;23(1):37–47. <https://doi.org/10.14529/build230105>

Khafizov TM, Baiburin AKh, Denisov SE, Ovchinnikov AD A Method of Combined Construction of Underground and Aboveground Structures by Means of Descending Concrete. *Bulletin the South Ural State University. Series "Construction Engineering and Architecture"*. 2023; 23(1): 37–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/build230105>.

12 Хафизов Т.М., Байбурин А.Х. Строительство подземного многоэтажного сооружения методом опускающегося бетона. *Промышленное и гражданское строительство*. 2020;6:57–63. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.06.57-63>

Khafizov TM, Baiburin AKh Building of an Underground Multi-Storey Structure Using the Method of Sinking Concrete. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; (6): 57–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.06.57-63>.

13 Хафизов Т.М., Байбурин А.Х., Денисов С.Е., Сулейманов Р.М., Хафизов Г.Т. Способ совмещенного строительства подземной и надземной части каркаса сооружения. Патент РФ № RU 2657565 C1. 2018.

Khafizov TM, Baiburin AH, Denisov SE, Suleymanov RM, Khafizov GT Method of Combined Construction of the Underground and Aboveground Parts of the Frame of the Structure. *Patent RU 2657565 C1 Russian Federation, IPK7 E 02 D 29/045 (2018.02)*. No. 2017115160/03; Issue 17, 2018. (In Russ.)

14 Булгаков А.Г., Воробьев В.А., Евтушенко С.И., Паршин Д.Я. Автоматизация и роботизация строительства. М.: ИНФРА-М; 2013. 452 с.

Bulgakov AG, Vorobyov VA, Yevtushenko SI, Parshin DYa *Automation and Robotics in Construction*. Moscow: INFRA-M, 2013. 452 p. (In Russ.)

15 Сюй Пэйфу. Проектирование современных высотных зданий. М.: АСВ; 2008. 467 с.

Peifu X. *Design of Modern High-Rise Buildings* / Moscow: Publishing House of the DIA, 2008. 467 p. (In Russ.)

16. Staib G, Dörrhöfer A, Rosenthal M *Components and Systems: Modular Construction: Design, Structure, New Technologies*. Institut für international Architektur-Dokumentation. München, 2008.

17. Sychev SA, Sharipova D Monitoring and Logistics of Erection of Prefabricated Modular Buildings. *Indian Journal of Science and Technology*. 2015;8(29):1–6. <https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i1/84114>.

18. Сауков Д.А., Гинзберг Л.А. Современное модульное строительство. В: *Сборник статей VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием и XVIII школы молодых ученых «Безопасность критических инфраструктур и территорий. Проблемы безопасности строительных критических инфраструктур SAFETY2018»*. Екатеринбург: НИЦ «Нир БСМ» УрО РАН, УрФУ; 2018. С. 69–82. URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/66309> (дата обращения: 22.07.2025).

Saukov DA, Ginsberg LA Modern Modular Construction. *SAFETY2018*, Yekaterinburg, October 4–5; 2018: 69–82. (In Russ.) URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/66309> (accessed: 22.07.2025)

19. Иванов П.В., Яковлев А.П. Современное модульное строительство и его значимость в настоящее время. *Вестник науки*. 2025;5(86):1047–1055. URL: <https://www.xn----8sbempclcw3bmt.xn--p1ai/article/22956> (дата обращения: 22.07.2025).

Ivanov PV, Yakovlev AP Modern Modular Construction and its Significance at the Present Time. *Bulletin of Science*. 2025;2.5(86):1047–1055. (In Russ.) URL: <https://www.xn----8sbempclcw3bmt.xn--p1ai/article/22956> (accessed: 22.07.2025)

20. Sánchez-Garrido AJ, Navarro IJ, García J, Yepes V A Systematic Literature Review on Modern Methods of Construction in Building: An Integrated Approach Using Machine Learning. *Journal of Building Engineering*. 2023;73:106725. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.106725>

21. Dasović B, Klanšek U A Review of Energy-Efficient and Sustainable Construction Scheduling Supported with Optimization Tools. *Energies*. 2022;15(7):2330. <https://doi.org/10.3390/en15072330>

Об авторах:

Байбурин Альберт Халитович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительного производства и теории сооружений Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), abayburin@mail.ru

Мельник Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства и теории сооружений Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76), [ScopusID](#), [ORCID](#), melnikaa@susu.ru

Лебедь Анна Рафиковна, старший преподаватель кафедры строительного производства и теории сооружений Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76), [ScopusID](#), [ORCID](#), lebedar@susu.ru

Заявленный вклад соавторов:

А.Х. Байбурин: формирование основной концепции исследования, постановка цели и задач, проведение анализа информации, выявление связей и путей развития, подготовка текста, формирование выводов;

А.А. Мельник: анализ информационных источников, поиск путей развития строительства, систематизация и обобщение обзора, доработка текста, корректировка выводов;

А.Р. Лебедь: поиск и анализ информационных источников.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Albert Kh. Baiburin, DrSc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Building Technologies and Structural Engineering at the South Ural State University (76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), abayburin@mail.ru

Andrey A. Melnik, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Building Technologies and Structural Engineering at the South Ural State University (76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), melnikaa@susu.ru.

Anna R. Lebed, Senior Lecturer at the Department of Building Technologies and Structural Engineering at the South Ural State University (76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), lebedar@susu.ru.

Claimed contributorship:

AKh Baiburin: forming the basic concept of the research, setting aims of the research, analyzing information, identifying connections and ways of development, preparing the manuscript, forming the conclusions;

AA Melnik: analysis of information sources, search for ways to develop the construction industry, systematization and generalization of the review, revision of the manuscript, correction of the conclusions;

AR Lebed: search and analysis of information sources.

Conflict of Interest Statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 12.08.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 10.09.2025

Принята к публикации / Accepted 01.10.2025

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION



УДК 693.546

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-79-88>

Анализ результатов хронометража при непрерывном бетонировании массивной фундаментной плиты



EDN: LBZJTQ

Г.В. Несветаев¹  , Ю.И. Корянова¹ , В.В. Шуть² 

¹ Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

² ИП «Шуть Владимир Валерьевич», п. Водопадный, Российская Федерация

 nesgrin@yandex.ru

Аннотация

Введение. Оценка риска раннего трещинообразования при возведении массивных монолитных железобетонных фундаментных плит вследствие температурных градиентов предопределяет актуальность исследований многочисленных факторов, связанных с технологией бетонирования, с учетом технических возможностей производителей работ и поставщиков бетонных смесей, а также погодных условий. При разработке технологических регламентов бетонирования с расчетом термонапряженного состояния в ранний период с целью уменьшения экзотермии и управления кинетикой тепловыделения актуальными являются исследования в области назначения и регулирования временных параметров процесса формирования тела фундаментной плиты с учетом рецептурных особенностей бетонных смесей и погодных условий, а также расчет термонапряженного состояния в ранний период. Цель исследования: получение новых данных для расчетов временных параметров бетонирования массивных конструкций с использованием автобетононасосов с техническими характеристиками, данные о которых отсутствуют в нормативной базе.

Материалы и методы. Приведены результаты хронометража технологических параметров непрерывного бетонирования массивной фундаментной плиты объемом 1642 м³ за 13,6 ч. Получены численные значения скорости перекачивания бетонной смеси, времени маневрирования автобетононасосов, коэффициентов перехода от технической к эксплуатационной производительности автобетононасосов с технической производительностью 170 и 180 м³/ч. Использование автобетононасосов с такой производительностью при фактической скорости разгрузки автобетононасосов до 2,3 м³/мин обеспечивает коэффициент фактической производительности при перекачивании до 0,81, что в принципе соответствует нормальной эксплуатации.

Результаты исследования. Получены значения коэффициента использования автобетононасосов по времени от 0,478 до 0,841 при среднем значении $\approx 0,66$. Фактическая средняя производительность одного автобетононасоса за период бетонирования составила ≈ 61 м³/ч.

Обсуждение и заключение. При расстоянии от автобетононасоса до площадки ожидания автобетононасосов в пределах 25–50 м время маневрирования мало зависит от расстояния, составляет с обеспеченностью 0,95 по данным 69 замеров не более 5,76 мин и определяется удобством площадки для маневрирования автобетононасосов и подъездных путей. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических регламентов на непрерывное бетонирование аналогичных массивных конструкций.

Ключевые слова: фундаментная плита, непрерывное бетонирование, скорость перекачивания, параметры рабочего цикла, автобетононасос

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00164, <https://rscf.ru/project/25-19-00164/> (дата обращения: 31.01.2026).

Для цитирования. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Шуть В.В. Анализ результатов хронометража при непрерывном бетонировании массивной фундаментной плиты. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2026;5(1):79–88. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-79-88>

Analysis of Timing Results during Continuous Concreting of a Massive Foundation Slab

Grigory V. Nesvetaev¹  , Julia I. Koryanova¹ , Vladimir V. Shut² 

¹ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation,

² IE "Shut Vladimir Valeryevich", Vodopadny, Russian Federation

 nesgrin@yandex.ru

Abstract

Introduction. Risk assessment of early cracking during hardening of massive monolithic reinforced concrete foundation slabs due to temperature gradients enhances the relevance of studies of a host of factors related to a concreting technology given the technical capabilities of workers and suppliers of concrete mixtures, as well as weather conditions. While developing technological regulations for concreting with a calculation of the thermal stress state in the early period in order to reduce and control heat dissipation, studies in the field of assignment and regulation of time parameters of the process of forming the body of the foundation slab taking into account the prescription features of concrete mixtures and weather conditions are relevant. The aim of the study is to obtain new data for calculating the time parameters of concreting massive structures using concrete pumps with technical characteristics that are not available in the regulatory framework.

Materials and Methods. The paper presents the results of timing the process parameters of continuous concreting of a massive foundation slab with a volume of 1642 m³ in 13.6 h. The numerical values of the concrete mixture pumping speed, maneuvering time of concrete mixer trucks as well as the coefficients of transition from technical to operational performance of concrete pump trucks with a technical capacity of 170 and 180 m³/h are obtained. The use of concrete pumps with such a capacity at an actual unloading speed of concrete mixer trucks of up to 2.3 m³/min ensures an actual pumping performance coefficient of up to 0.81, which basically corresponds to normal operation.

Research Results. The values of the concrete pump utilization coefficient over a time period ranging from 0.478 to 0.841 with an average value of ≈ 0.66 were obtained. The actual average productivity of one concrete pump during the concreting period was ≈ 61 m³/h.

Discussion and Conclusion. With a distance from the concrete pump truck to the concrete mixer truck waiting area within 25–50 m, the maneuvering time does not depend greatly on the distance, according to 69 measurements, it is no more than 5.76 min with a reliability of 0.95 and is identified by the convenience of an area for maneuvering concrete mixer and access roads. The results can be used in developing process regulations for continuous concreting of similar massive structures.

Keywords: foundation slab, continuous concreting, pumping speed, operating cycle parameters, concrete pump

Funding. The research was carried out with support of a grant of the Russian Science Foundation No. 25-19-00164, <https://rscf.ru/project/25-19-00164/> (accessed: 31.01.2026).

For citation: Nesvetaev GV, Koryanova JI, Shut VV Analysis of Timing Results during Continuous Concreting of a Massive Foundation Slab. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(1):79–88. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-79-88>

Введение. В последние годы отмечается рост этажности возводимых жилых зданий, особенно в крупных городах в условиях плотной городской застройки. По данным [1] в 2019 г. средняя этажность жилищного строительства составила 17,7 этажа на 1 м² возводимого здания, а в Ростовской области средняя этажность составила 19,7. В 2022–2025 гг. в Ростове-на-Дону возводятся здания до 32 этажей, рассматривается вопрос о возведении объектов до 45 этажей. В качестве фундаментов под подобные объекты часто используются плоские фундаментные плиты (ФП) либо плитные ростверки по свайному полю. Рекомендуемая толщина ФП составляет от 0,5 до 2 м согласно п. 7.10 СП 52-103-2007 «Железобетонные монолитные конструкции зданий» и до 3 м — согласно п. 5.2.7 СП 430.13225800.2018 «Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования». В СП 430.13225800.2018 в п. 5.2.7 допускается в «первом приближении толщину плоской фундаментной плиты на естественном основании назначать равной $1/65 \div 1/50$ строительной высоты здания», в связи с этим ФП для зданий средней и более этажности для Ростовской области будут относиться к массивным монолитным железобетонным конструкциям. СП 435.1325800.2018 указывает: в п. 9.3.4 — «способ укладки бетонной смеси должен обеспечивать монолитность конструкции»; в п. 5.12 — «способ подачи бетонной смеси следует выбирать по расчетному значению интенсивности бетонирования»; в п. 6.2.8 — «темпы поступления бетонной смеси на объект и перекачивания насосом должны обеспечивать непрерывность подачи бетонной смеси. Технологические перемены не должны превышать 20 мин».

Согласно [2, 3], на качество массивных монолитных ФП оказывают влияние многочисленные факторы, связанные с технологией бетонирования, с учетом технических возможностей производителей работ и поставщиков бетонных смесей, а также погодных условий. Многочисленность факторов предопределяет актуальность проработки вопросов, необходимых для разработки технологических регламентов (ТР), при этом в нормативных документах не всегда представлены необходимые данные и указания.

Серьезную проблему представляют температурные градиенты, вызывающие формирование растягивающих напряжений и угрозу раннего трещинообразования вследствие тепловыделения твердеющего бетона. СТО НОСТРОЙ 2.30.214-2016 «Конструкции монолитные бетонные и железобетонные. Требования к производству работ. Правила и методы контроля» предписывает регулировать тепловыделение уменьшением экзотермии и управлением кинетикой, что при расчетах риска раннего трещинообразования [4–6] требует точного назначения временных параметров процесса формирования тела ФП с учетом рецептурных особенностей бетонных смесей [7] и погодных условий, в связи с чем являются актуальными исследования в области назначения и регулирования временных параметров процесса бетонирования при разработке ТР с расчетом термонапряженного состояния в ранний период. Необходимость четкого алгоритма технологических расчетов при разработке ТР обусловлена в том числе важностью определения рационального времени перекрытия слоев, которое зависит от сохраняемости бетонной смеси, температурно-влажностных условий, технических возможностей производителя (темп бетонирования) и может существенно различаться [8, 9]. Особенно важно правильно определить предельное время перекрытия слоев и темп бетонирования в условиях сухой жаркой погоды [10].

По данным [11, 12] интенсивность непрерывного бетонирования конструкции может составлять до 226 м³/ч, а согласно [7] — даже до 450 м³/ч в зависимости от количества автобетононасосов (АБН), а общая продолжительность непрерывного бетонирования может составлять до 35 ч и даже до 3 сут. В связи с этим обоснованный показатель «интенсивность бетонирования», в первую очередь в расчете на один АБН, является одним из важнейших параметров, необходимых при разработке ТР и формирования бетоноукладочного комплекса [10]. При рационально организованной поставке бетонной смеси на объект интенсивность бетонирования будет определяться технической производительностью автобетоносмесителя (АБС) при разгрузке (скорость выгрузки), технической производительностью бетононасоса либо АБН (скорость перекачивания) и эффективностью организации процесса (коэффициент использования АБН по времени). Для определения требуемого числа АБН и АБС необходимы данные об их эксплуатационной производительности, зависящие от скорости перекачивания и коэффициента использования АБН по времени. Техническая производительность АБС при разгрузке, согласно инструкции по транспортировке и укладке бетонной смеси в монолитные конструкции с помощью АБС и АБН, составляет от 0,5 до 2 м³/мин или до 120 м³/ч, а скорость разгрузки, согласно рекомендациям по доставке бетонных смесей автотранспортными средствами, может составлять до 2,5 м³/мин или до 150 м³/ч [13]. По данным [14] техническая производительность АБН составляет до 200 м³/ч. Эксплуатационная производительность АБН, определяющая интенсивность бетонирования, зависит от многих факторов и в общем случае определяется коэффициентом перехода от технической производительности бетононасоса к эксплуатационной [15, 16], а также коэффициентом использования АБН по времени [13].

По данным [10] при бетонировании ФП общим объемом около 1500 м³ непосредственно подача 10 м³ бетонной смеси автобетононасосом с технической производительностью 120 м³/ч при дальности подачи до 50 м в среднем осуществлялась за 7,5 минут, что составляет примерно 80 м³/ч и соответствует коэффициенту перехода от технической производительности к эксплуатационной $80/120 \approx 0,67$. В технологических картах значение коэффициента, учитывающего организацию процесса (коэффициент использования АБН по времени), часто принимается равным 0,65 [10, 13].

Целью настоящего исследования является получение новых данных для расчетов временных параметров бетонирования массивных конструкций с использованием технологического оборудования (автобетононасосов) с техническими характеристиками, данные о которых отсутствуют в нормативной базе, в частности, ГЭСН. В настоящей работе приводятся результаты определения и анализ некоторых параметров технологического процесса, в т.ч. интенсивности бетонирования, при непрерывном бетонировании ФП объемом 1642 м³ на одном из объектов г. Ростова-на-Дону.

Материалы и методы. Хронометраж в процессе непрерывного бетонирования ФП толщиной 2 м объемом 1642 м³ с использованием бетонной смеси (БС) с маркой по удобоукладываемости П4 по ГОСТ 7473-2010 «Смеси бетонные. Технические условия», АБН Zomlion 59X-6RZ (АБН 1) и КСР58ZX170 (АБН 2) с технической производительностью соответственно 180 и 170 м³/ч при поставке БС в АБС объемом от 7 до 16 м³. Средневзвешенный объем АБС 12,6 м³, при расчетах параметров в ТР принималось значение 14 м³. Фиксировались: время перекачивания БС на расстояние до 50 м, $\tau_{п.}$, как время от начала разгрузки АБС до окончания перекачивания (по сигналу

АБН); общее время рабочего цикла АБН, $\tau_{\text{ц}}$, как время от начала разгрузки предыдущего АБС до начала разгрузки последующего АБС; время маневрирования АБС при расстоянии от 15 до 25 м, $\tau_{\text{м}}$, как разность общего времени рабочего цикла и времени перекачивания БС. Бетонирование произведено в сухую ясную погоду при температуре 15–20 °С. Всего произведено 35 замеров по АБН 1 и 34 замера по АБН 2. Скорость разгрузки АБС и скорость перекачивания БС принимались равными и определялись по формуле:

$$v_p = v_{\text{п}} = \frac{V_{\text{АБС}}}{\tau_p},$$

где $V_{\text{АБС}}$ — объем АБС, м³.

Результаты исследования. В таблице 1 представлены результаты замеров продолжительности технологических операций. В таблице 2 представлены результаты расчетов скорости разгрузки АБС (время перекачивания БС).

Таблица 1

Результаты замеров параметров рабочего цикла, мин

АБН	Параметры цикла					
	$\tau_{\text{ц}}$		$\tau_{\text{п}}$		$\tau_{\text{м}}$	
	диапазон	среднее	диапазон	среднее	диапазон	среднее
1	6,73–13,06	9,68	4,58–8,4	6,11	2,15–6,08	3,56
2	6,42–17,2	10,11	4,03–10,95	7,09	1,37–8,83	3,22
по ТР		15,0		9,0		6,0

Таблица 2

Результаты замеров скорости разгрузки АБС (скорости перекачивания БС), м³/мин

Объем АБС, м ³	Скорость разгрузки (скорость перекачивания)	
	Диапазон	Средняя
7	1,615–1,736	1,675
10	<u>1,709–2,182</u> 1,36–1,77*	<u>1,936</u> 1,565*
11	1,688–2,115	2,11
12	<u>1,503–2,278</u> 1,568*	<u>1,917</u> 1,568*
13	1,866–1,984	1,925
14	<u>1,278–2,227</u> 1,49–1,83*	<u>1,959</u> 1,61*
15	1,731–2,284	1,898
16	1,72–2,02	1,834
По ТР		1,6

Примечание: * — по данным [10]

Общее время продолжительности разгрузки АБС (время перекачивания БС), строго говоря, не подчиняется закону нормального распределения (рис. 1). Для АБН 1 имеет место распределение с положительной асимметрией, для АБН 2 имеется наличие двух пиков, что можно объяснить, помимо технических, влиянием технологических и организационных моментов, например производительность бетонщиков при укладке и уплотнении.

Скорость разгрузки АБС в нашем случае изменялась в довольно широком диапазоне — от 1,28 до 2,28 м³/мин (рис. 2). Скорость разгрузки практически не зависела от объема АБС.

Средняя скорость перекачивания БС составила для АБН 1 2,04 м³/мин при диапазоне от 1,69 до 2,222 м³/мин, для АБН 2 — 1,78 м³/мин при диапазоне от 1,278 до 2,284 м³/мин. Скорость перекачивания БС с обеспеченностью 0,95 составила для АБН 1 1,815 м³/мин, для АБН 2 — 1,422 м³/мин (рис. 3), среднее по АБН 1 и АБН 2 значение 1,62 м³/мин практически совпало со значением 1,6 м³/мин, принятом при разработке ТР. Скорость перекачивания БС не зависит от объема АБС.

В нашем случае средний коэффициент перехода от технической производительности к эксплуатационной составил для АБН 1

$$k = \frac{v_{\text{п,ф}}}{v_{\text{п,т}}} = \frac{2,04}{3} = 0,68,$$

а для АБН 2 — 0,63.

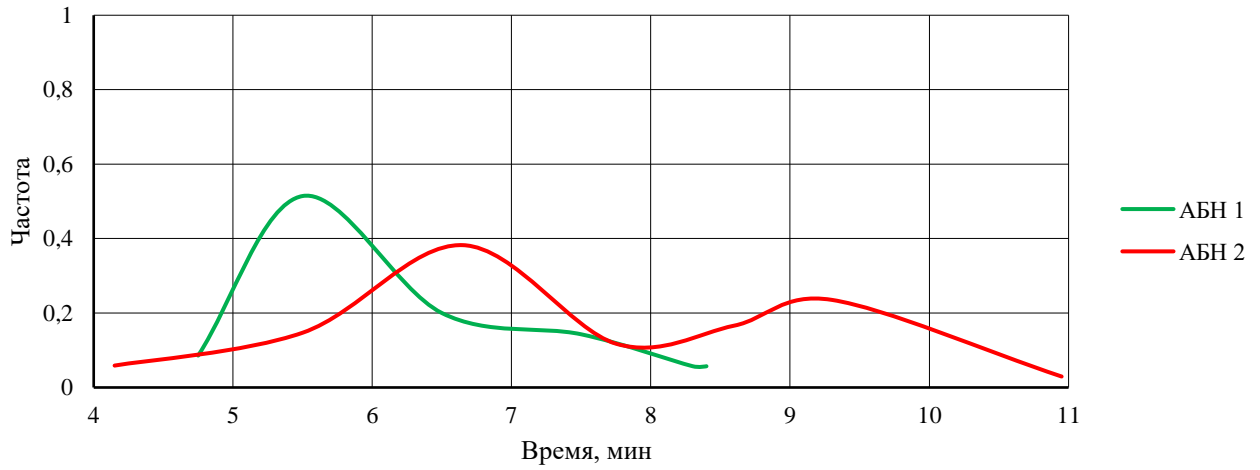


Рис. 1. Частотность продолжительности перекачивания БС

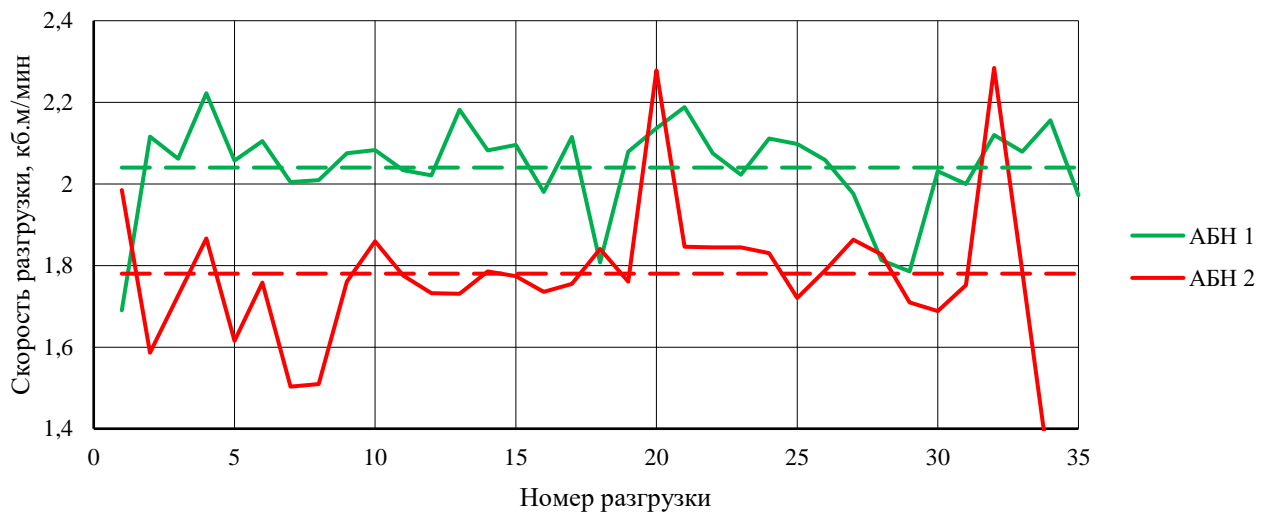


Рис. 2. Скорость разгрузки АБС

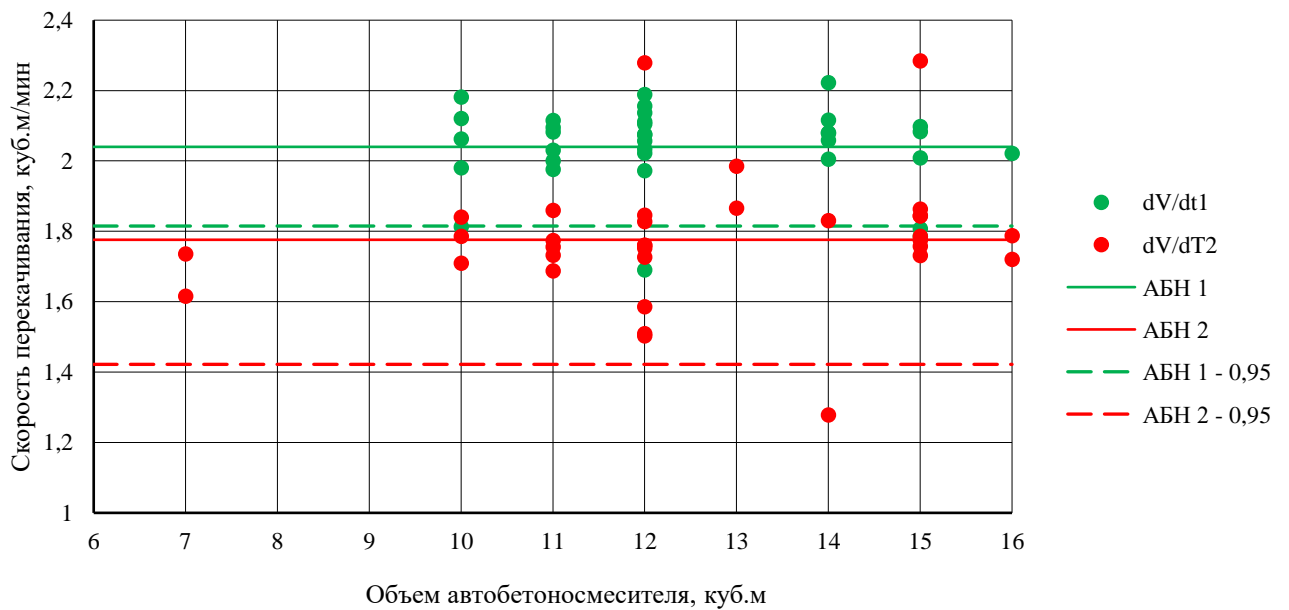


Рис. 3. Зависимость скорости перекачивания БС от объема АБС

Не следует связывать коэффициент перехода от технической производительности к эксплуатационной с технической производительностью АБН. В нашем случае целесообразность использования АБН с технической производительностью более $2,83 \text{ м}^3/\text{мин}$ (170 и $180 \text{ м}^3/\text{ч}$) обоснована пиковыми значениями коэффициента производительности при перекачивании не более $0,85$.

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента β , учитывающего организацию процесса (коэффициент использования АБН по времени) и объем АБС. Коэффициент рассчитывался по формуле:

$$\beta = \frac{\tau_{\Pi}}{\tau_{\Sigma}} = \frac{\tau_{\Sigma} - \tau_{\text{М}}}{\tau_{\Sigma}}$$

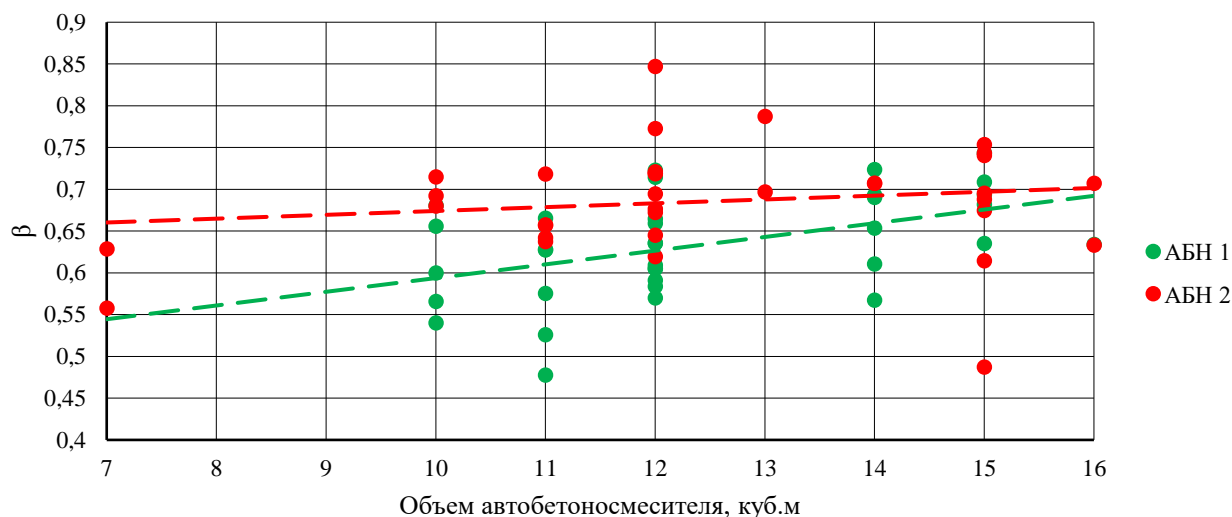


Рис. 4. Зависимость коэффициента использования АБН по времени (организация процесса) от объема АБС

Диапазон значений коэффициента β составил для АБН 1 от $0,478$ до $0,744$ при среднем значении $0,634$. Диапазон значений коэффициента β составил для АБН 2 от $0,487$ до $0,847$ при среднем значении $0,685$. Среднее значение по обоим АБН составило $0,659$. На зависимость коэффициента β от объема АБС закономерно значительное влияние оказывает ритмичность смены АБС.

Значение коэффициента фактической эффективности АБН в период «стабилизации» процесса в среднем составило:

$$k_3 = k\beta = \frac{0,659 \cdot (0,68 + 0,63)}{2} = 0,43$$

По данным [10] эта величина составила $0,41$.

Время маневрирования АБС, обеспечивающих АБН 1 и АБН 2, составило в среднем $3,56$ минуты и $3,22$ минуты (лучшие условия площадки для маневрирования) соответственно, а с обеспеченностью $0,95$ — не более $5,28$ и $5,76$ минуты. По данным [10] среднее время маневрирования АБС составляло $3,38$ минуты при диапазоне от $2,8$ минуты до $4,45$ минуты при лучших в сравнении с рассматриваемыми условиями для маневрирования. Можно сделать вывод, что при расстоянии от АБН до площадки ожидания АБС в пределах 25 – 50 м время маневрирования мало зависит от расстояния, а более определяется удобством площадки для маневрирования АБС и подъездных путей. Стесненные условия при производстве работ являются основным фактором, определяющим временные параметры бетонирования (рис. 5).

На рис. 6 представлена зависимость производительности АБН по часам бетонирования и данные о среднем темпе бетонирования.

Зависимость (пунктир на рис. 6) среднего темпа бетонирования, $\text{м}^3/\text{ч}$, от времени в течение процесса с показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0,977$ описывается уравнением:

$$\text{ТБ} = 93\tau - 19\tau^2 + 1,6\tau^3 - 0,05\tau^4$$

Четко прослеживаются периоды развертывания и свертывания процесса — порядка 2 ч каждый. По данным [17] при бетонировании нижней плиты коробчатого фундамента башни комплекса «Лахта Центр» выход на темп бетонирования $440 \text{ м}^3/\text{ч}$ был обеспечен примерно через 4 ч. В нашем случае в период «стабилизации» пиковая производительность «максимум/минимум» различалась до $2,5$ раз. Общее время бетонирования ФП фактически составило $13,58$ ч, расчетное по ТР — 15 ч. Средняя производительность: фактическая — $122 \text{ м}^3/\text{ч}$; расчетная по ТР — $112 \text{ м}^3/\text{ч}$. Средний коэффициент производительности АБН с учетом периодов развертывания и свертывания процесса составил $\approx 0,35$. По данным [10] такое значение заложено в ГЭСН.



Рис. 5. Рабочая площадка АБН 2

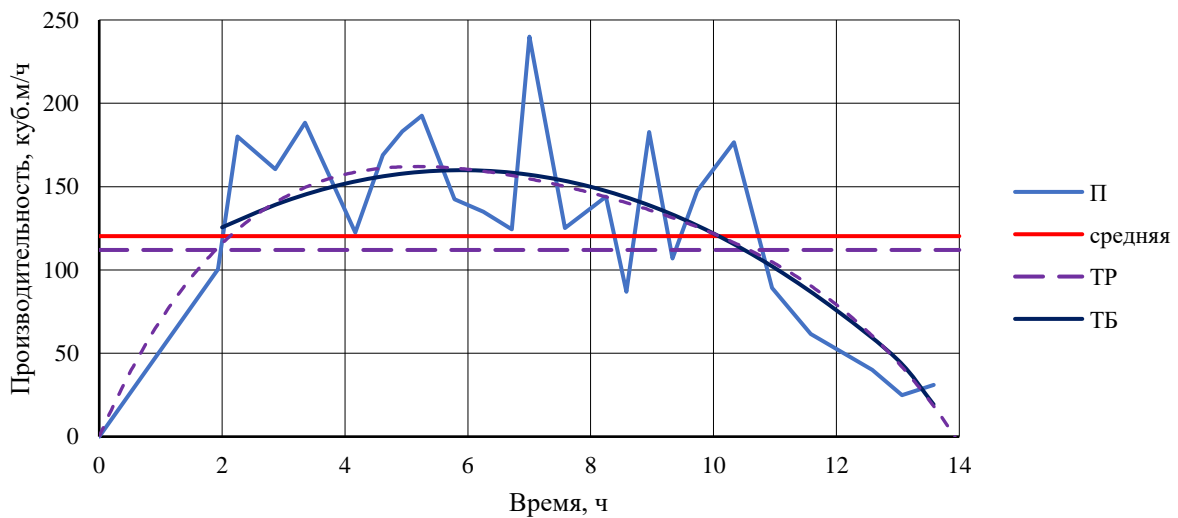


Рис. 6. Производительность АБН по часам бетонирования (П) и средний темп бетонирования (ТБ)

При средней технической производительности обоих АБН $175 \text{ м}^3/\text{ч}$ фактическая средняя производительность за период бетонирования составила $\approx 61 \text{ м}^3/\text{ч}$. По данным [10] в период «стабилизации» процесса при значении среднего коэффициента производительности АБН 0,41 и технической производительности АБН $120 \text{ м}^3/\text{ч}$ фактическая средняя производительность за период бетонирования составила $\approx 49 \text{ м}^3/\text{ч}$. По данным [17] при бетонировании нижней плиты коробчатого фундамента башни комплекса «Лахта Центр» объемом около $20,3 \text{ тыс. м}^3$ за 49 ч средняя интенсивность бетонирования составила $\approx 414 \text{ м}^3/\text{ч}$ или $\approx 23 \text{ м}^3/\text{ч}$ на один АБН (параметры АБН не приводятся).

Обсуждение и заключение. Получены новые данные для расчетов временных параметров бетонирования массивных конструкций с использованием технологического оборудования (автобетононасосов) с техническими характеристиками, данные о которых отсутствуют в нормативной базе, в частности, ГЭСН. В результате хронометража при бетонировании ФП толщиной 2 м и объемом 1642 м^3 получены значения скорости разгрузки и скорости перекачивания БС: средняя составила для АБН 1 $2,04 \text{ м}^3/\text{мин}$ при диапазоне от $1,69$ до $2,222 \text{ м}^3/\text{мин}$, для АБН 2 — $1,78 \text{ м}^3/\text{мин}$ при диапазоне от $1,278$ до $2,284 \text{ м}^3/\text{мин}$. С обеспеченностью 0,95 скорость перекачивания БС составила для АБН 1 $1,815 \text{ м}^3/\text{мин}$, для АБН 2 — $1,422 \text{ м}^3/\text{мин}$. Средний коэффициент перехода от технической производительности к эксплуатационной составил $\approx 0,68$ для АБН 1 и $\approx 0,63$ для АБН 2. Целесообразность использования АБН с технической производительностью более $2,83 \text{ м}^3/\text{мин}$ или $170 \text{ м}^3/\text{ч}$ обусловлена необходимостью

стью нормальной работы машины даже при пиковых нагрузках. Коэффициент использования АБН по времени составил от 0,478 до 0,847 при среднем значении по обоим АБН $\approx 0,66$. При средней технической производительности 175 м³/ч обоих АБН фактическая средняя производительность за период бетонирования составила ≈ 61 м³/ч.

Время маневрирования АБС при расстоянии до 25 м составило в среднем 3,22...3,56 минуты в зависимости от удобства площадок, с обеспеченностью 0,95 — не более 5,28...5,76 минуты. При расстоянии от АБН до площадки ожидания АБС в пределах 25–50 м время маневрирования мало зависит от расстояния, определяется удобством площадки для маневрирования АБС и подъездных путей.

Представленные результаты позволяют обоснованно назначать временные параметры бетонирования массивных фундаментных плит и могут быть использованы при разработке ТР.

Список литературы / References

1. Щербак Н.А., Двоенко О.В., Аристархов В.А., Федяев В.Д., Халиков Р.В. Тактические особенности ликвидации пожаров в зданиях повышенной этажности. *Пожарная, экологическая и техносферная безопасность*. 2023;2:33–43. <https://doi.org/10.25257/FE.2023.2.33-43>

Shcherbakov NA, Dvoenko OV, Aristarkhov VA, Fedyayev VD, Khalikov RV Tactical Specific of Extinguishing Fires in High-Rise Buildings. *Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*. 2023;2:33–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.25257/FE.2023.2.33-43>

2. Шпилевская Н.Л., Шведов А.П. Особенности возведения массивных фундаментов с учетом различных факторов, влияющих на непрерывное производство работ. В: *Сборник научных работ Международной научно-практической конференции к 50-летию Полоцкого государственного университета «Актуальные проблемы архитектуры Белорусского Подвинья и сопредельных регионов»*. Новополоцк: Полоцкий государственный университет; 2018. С. 238–244.

Shpilevskaya NL, Shvedov AP Features of the Construction of Massive Foundations Taking into Account Various Factors Affecting the Continuous Production of Works. *Collection of Scientific Papers of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 50th Anniversary of the Polotsk State University. Actual Problems of Architecture of the Belarusian Dvina and Adjacent Regions*. Novopolotsk: Educational Institution “Polotsk State University”; 2018. P. 238–244. (In Russ.)

3. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Чилин И.А. Оптимизация параметров технологии бетона для обеспечения термической трещиностойкости массивных фундаментов. *Строительные материалы*. 2022;10:41–51. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-807-10-41-51>

Kapriyelov SS, Sheinfeld AV, Chilin IA Optimization of Concrete Technology Parameters to Ensure Thermal Crack Resistance of Massive Foundations. *Construction Materials Russia*. 2022;10:41–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-807-10-41-51>

4. Kondratieva TN, Tyurina VS, Chepurnenko AS Predicting the Risk of Early Cracking in Massive Monolithic Foundation Slabs Using Artificial Intelligence Algorithms. *Construction Materials and Products*. 2025;8(1):6. <http://dx.doi.org/10.58224/2618-7183-2025-8-1-6>

5. Tyurina VS, Chepurnenko AS, Akopyan VF Prediction of Thermal Cracking During Construction of Massive Monolithic Structures. *Applied Sciences*. 2025;15(3):1499. <https://doi.org/10.3390/app15031499>

6. Tyurina VS, Chepurnenko AS, Akopyan VF Methodology for Determining True Temperature Stresses during the Construction of Massive Monolithic Reinforced Concrete Structures. *Construction Materials and Products*. 2024;7(3):5. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-3-5>

7. Травуш В.И., Никифоров С.В. Технология бетонирования массивных конструкций фундаментов зданий МФК «Лакhta Центр». *Строительство и реконструкция*. 2025;2(118):44–55. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2025-118-2-44-55>

Travush VI, Nikiforov SV Technology of Concreting Massive Structures of the Foundations of the Lakhta Center Multifunctional Complex. *Building and Reconstruction*. 2025;(2):44–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2025-118-2-44-55>

8. Шпилевская Н.Л., Шведов А.П. Разработка организационно-технологической документации на бетонирование массивных фундаментных плит. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки*. 2018;8:49–55. URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/22821> (дата обращения: 31.01.2026).

Shpilevskaya NL, Shvedov AP Development of Organizational and Technological Documentation for Concreting Massive Foundation Slabs. *Bulletin of the Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Science*. 2018;8:49–55. (In Russ.) URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/22821> (accessed: 31.01.2026)

9. Доладов Ю.И., Доладова И.П. Ресурсосберегающая технология бетонирования массивных фундаментных плит. *Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура*. 2011;2:132–134. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2011.02.29>
- Doladov YI, Doladova IP Resource Saving Technology of Pouring Massive Foundation Slab. *Bulletin of SGASU. Urban Construction and Architecture*. 2011;2:132–134. (In Russ.) <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2011.02.29>
10. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. Некоторые вопросы технологии бетонирования массивных фундаментных плит с применением самоуплотняющихся бетонных смесей. *Инженерный вестник Дона*. 2022;8(92). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7870> (дата обращения: 31.01.2026).
- Nesvetaev GV, Koryanova YI, Sukhin DP Some Questions of the Technology of Concreting Massive Foundation Slabs Using Self-Compacting Concrete Mixtures. *Engineering Journal of Don*. 2022;8(92). (In Russ.) URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7870> (accessed: 31.01.2026)
11. Калиновская Н.Н., Осос Р.Ф., Кучук Е.В. Бетонирование фундаментной плиты турбоагрегата Белорусской АЭС с применением самоуплотняющегося бетона. *Технологии бетонов*. 2017;3–4:15–19. URL: <https://polyplastic.by/wp-content/uploads/2017/09/Betonirovanie-fundamentnoj-plity-turboagregata-Belorussoj-AES-s-primeneniem-samouplotnyayushhegosya-betona.-Tehnologiya-betonov.pdf> (дата обращения: 31.01.2026).
- Kalinovskaya NN, Osos RF, Kuchuk EV Concreting of the Foundation Slab of the Turbine Unit of the Belarusian NPP Using Self-Compacting Concrete. *Concrete Technologies*. 2017;3–4:15–19. (In Russ.) URL: <https://polyplastic.by/wp-content/uploads/2017/09/Betonirovanie-fundamentnoj-plity-turboagregata-Belorussoj-AES-s-primeneniem-samouplotnyayushhegosya-betona.-Tehnologiya-betonov.pdf> (accessed: 31.01.2026)
12. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Аль-Омаис Д., Зайцев А.С. Высокопрочные бетоны в конструкции фундаментов высотного комплекса «ОКО» в ММДЦ «Москва-Сити». *Промышленное и гражданское строительство*. 2017;3: 53–57. URL: <http://pgs1923.ru/archiv/2018/01/02.pdf> (дата обращения: 31.01.2026).
- Kapriyelov SS, Sheynfeld AV, Al-Omais D, Zaitsev AS Experience in Production of High-Strength Concrete Used in Construction of High-Rise Complex "OKO" in MIBC "Moscow-City". *Industrial and Civil Engineering*. 2017;3:53–57. (In Russ.) URL: <http://pgs1923.ru/archiv/2018/01/02.pdf> (accessed: 31.01.2026)
13. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. Об определении параметров бетонирования массивных плоских фундаментных плит. *Инженерный вестник Дона*. 2023;8(104). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8626> (дата обращения: 31.01.2026).
- Nesvetaev GV, Koryanova YI, Sukhin DP About Defining Pouring Parameters Massive Flat Foundation Slabs. *Engineering Journal of Don*. 2023;8(104). (In Russ.) URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8626> (accessed: 31.01.2026)
14. Комаринский М.В., Червова Н.А. Транспорт бетонной смеси при строительстве уникальных зданий и сооружений. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2015;1(28):6–7. URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/1\(28\)/1_chervova_28.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/1(28)/1_chervova_28.pdf) (дата обращения: 31.01.2026).
- Komarinsky MV, Chervova NA Transport of Concrete Mix during Construction of Unique Buildings and Structures. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015;1(28):6–7. (In Russ.) URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/1\(28\)/1_chervova_28.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/1(28)/1_chervova_28.pdf) (accessed: 31.01.2026)
15. Комаринский М.В. Производительность поршневого бетононасоса. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2013;6(11):43–49. URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2013/6\(11\)/6_komarinskij_11.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2013/6(11)/6_komarinskij_11.pdf) (дата обращения: 31.01.2026).
- Komarinsky MV A Productivity of Reciprocating Concrete Pump. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2013;6(11):43–49. (In Russ.) URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2013/6\(11\)/6_komarinskij_11.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2013/6(11)/6_komarinskij_11.pdf) (accessed: 31.01.2026)
16. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И. Определение производительности поршневого бетононасоса. *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2018;2(44):8–11. URL: <https://sciup.org/opredelenie-proizvoditelnosti-porshneвого-betononasosa-148186434> (дата обращения: 31.01.2026).
- Velikanov NL, Naumov VA, Koryagin SI Definition of Performance Piston Concrete Pump. *Technical and Technological Problems of the Service*. 2018;2(44):8–11. (In Russ.) URL: <https://sciup.org/opredelenie-proizvoditelnosti-porshneвого-betononasosa-148186434> (accessed: 31.01.2026)
17. Травуш В.И., Шахворостов А.И. Бетонирование нижней плиты коробчатого фундамента башни комплекса «Лакhta Центр». *Высотные здания*. 2015;1:92–101. URL: <http://old.inforceproject.ru/media/article20.pdf> (дата обращения: 31.01.2026).
- Travush VI, Shakhvorostov AI Concreting the Lower Slab of the Box Foundation of the Tower of the Lakhta Center Complex. *High-Rise Buildings*. 2015;1:92–101. (In Russ.) URL: <http://old.inforceproject.ru/media/article20.pdf> (accessed: 31.01.2026)

Об авторах:

Несветаев Григорий Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии строительного производства Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), nesgrin@yandex.ru

Корянова Юлия Игоревна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии строительного производства Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), koryanova.yi@mail.ru

Шуть Владимир Валерьевич, директор ИП «Шуть Владимир Валерьевич» (346715, Российская Федерация, Ростовская область, Аксайский район, п. Водопадный, ул. Ягодная, 3, кв. 1), [ORCID](#), don-com-ru@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Г.В. Несветаев: формирование основной концепции, цели и задач исследования, обоснование критериев, общее планирование эксперимента, анализ результатов исследований, редактирование текста, корректировка выводов.

Ю.И. Корянова: детальное планирование, организация и реализация исследований, анализ результатов исследований, подготовка текста, формулировка выводов.

В.В. Шуть: рабочее планирование и реализация исследований, обработка результатов исследований, анализ результатов исследований.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Grigory V. Nesvetaev, Dr.Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Construction Production Technology at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), nesgrin@yandex.ru

Julia I. Koryanova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Production Technology at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), koryanova.yi@mail.ru

Vladimir V. Shut, Head of IE "Shut Vladimir Valeryevich" (Apartment 1, 3 Yagodnaya Str., Vodopadny, Aksaiskiy district, Rostov region, 346715, Russian Federation), [ORCID](#), don-com-ru@mail.ru

Claimed contributorship:

GV Nesvetaev: formation of the basic concept, aims of the study, justification of the criteria, general planning of the experiment, analysis of the research results, editing of the manuscript, correction of the conclusions.

JI Koryanova: detailed planning, organization and implementation of the research, analysis of the research results, preparation of the manuscript, formulation of the conclusions.

VV Shut: operational planning and implementation of the research, processing of the research results, analysis of the research results.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 31.01.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 13.02.2026

Принята к публикации / Accepted 28.02.2026

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

CONSTRUCTION MECHANICS



УДК 624.048

Оригинальное эмпирическое исследование


<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-89-95>

Численный анализ напряженно-деформированного состояния секции железобетонного моста



Н.А. Савельева  

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

 ninasav86@mail.ru

EDN: NLECIF

Аннотация

Введение. В Российской Федерации принята долгосрочная программа по масштабному строительству автомобильных дорог, что потребует возведения большого количества мостов малых, средних и больших пролетов. Международный опыт говорит, что автодорожные мосты целесообразно строить из преднапряженного железобетона. Причем наиболее эффективными являются пролетные мостовые секции коробчатого поперечного сечения, отличающиеся от балочных конструкций лучшей аэродинамикой, меньшими трудозатратами при возведении и более привлекательной внешней эстетикой. В литературе, посвященной численному анализу напряженно-деформированного состояния монолитных железобетонных конструкций, приведено крайне мало сведений о расчете пролетных мостовых строений с учетом ползучести бетона. Целью исследования являлась разработка методики конечно-элементного моделирования длительного деформирования пролетной секции коробчатого сечения, с помощью авторизованного программного комплекса. Данные вычислительных экспериментов верифицированы с использованием программного комплекса ANSYS Mechanical.

Материалы и методы. В качестве математического аппарата для моделирования процесса длительного деформирования исследуемой железобетонной конструкции применен метод конечных элементов в форме метода перемещений в сочетании с теорией линейной вязкоупругости. Для формализации процесса ползучести бетона использована модель упруго-ползучего тела С.В. Александровского. Вычислительный процесс численного интегрирования результирующего операторно-матричного уравнения базируется на принципе наложения воздействий и использовании формулы трапеций. Вычислительные эксперименты выполнены на платформе Microsoft Visual Studio и компиляторе Intel Parallel Studio XE с встроенным текстовым редактором Intel Visual Fortran Composer XE. Для визуализации результатов моделирования в виде картин распределения полей перемещений и напряжений применена дескрипторная графика системы Matlab.

Результаты исследования. Разработана и верифицирована программа для конечно-элементного расчета железобетонных балочных конструкций в трехмерной постановке с использованием дискретной схемы армирования, согласно которой армирующий каркас моделируется двухузловыми балочными, а массив бетона — объемными полилинейными конечными элементами. Установлено, что для рассматриваемой типовой мостовой секции коробчатого сечения принятая схема предварительного напряжения малоэффективна, так как не обеспечивает требуемого выгиба.

Обсуждение и заключение. Выполнено сравнение результатов расчетов коробчатой секции в линейно упругой постановке, полученных с помощью разработанного пакета программ и программного комплекса ANSYS Mechanical. Установлено удовлетворительное совпадение значений перемещений и напряжений в исследуемых точках. Исследовано напряженно-деформированное состояние коробчатой секции на этапе создания предварительного напряжения и последующего нагружения. Сделан вывод о целесообразности научного сопровождения на этапе проектирования подобных мостовых секций с целью повышения их несущей способности.

Ключевые слова: метод конечных элементов, ползучесть бетона, предварительное напряжение, железобетонная мостовая секция коробчатого сечения

Для цитирования. Савельева Н.А. Численный анализ напряженно-деформированного состояния секции железобетонного моста. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2026;5(1):89–95. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-89-95>

Original Empirical Research

Numerical Analysis of Stress-Strain Conditions of a Reinforced Concrete Bridge Section

Nina A. Savelyeva  

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 ninasav86@mail.ru

Abstract

Introduction. The Russian Federation has adopted a long-term program for the large-scale construction of highways, which will require the construction of a large number of bridges of small, medium and large spans. International experience shows that it is advisable to build road bridges from prestressed reinforced concrete. Moreover, the most effective ones are the span bridge sections of a box-shaped cross-section that are different from girder structures by better aerodynamics, lower labor costs during construction and more attractive external aesthetics. In the literature on numerical analysis of the stress-strain of monolithic reinforced concrete structures, very little information is provided on calculating span bridge structures taking into account concrete creep. The aim of the study was to develop a technique for finite element modeling of long-term deformation of a box section span using an authorized software package. The data from the computational experiments were verified using the ANSYS Mechanical software package.

Materials and Methods. The finite element method in the form of a displacement method in combination with the theory of linear viscoelasticity is employed as a mathematical tool for modeling prolonged deformation of the investigated reinforced concrete structure. In order to formalize concrete creep, S.V. Aleksandrovsky's elastic creeping body model was used. The computational process of numerical integration of the resulting operator-matrix equation is based on the principle of superimposition of effects and the use of the trapezoid formula. The computational experiments were performed on the Microsoft Visual Studio platform and the Intel Parallel Studio XE compiler with the built-in Intel Visual Fortran Composer XE text editor. In order to visualize the simulation results in the form of pictures of the distribution of displacement and stress fields, the descriptive graphics of the Matlab system are employed.

Research Results. A program has been developed and verified for the finite element calculation of reinforced concrete beam structures in a three-dimensional formulation using a discrete reinforcement scheme, according to which the reinforcing frame is modeled by means of two-node beams, and the concrete array is modeled by means of volumetric multilinear finite elements. It is found that for the considered typical box-shaped bridge sections, the adopted pre-voltage scheme is ineffective as it fails to provide the required bending.

Discussion and Conclusion. The results of the calculations of the box section in a linearly elastic formulation obtained using the developed software package and the ANSYS Mechanical software package are compared. A satisfactory coincidence of displacement and stress values at the investigated points has been identified. The stress-strain state of the box section at the stage of prestressing and subsequent loading is investigated. The conclusion is made on the expediency of scientific support at the design stage of such bridge sections in order to increase their load-bearing capacity.

Keywords: finite element method, concrete creep, prestressing, reinforced concrete bridge section of a box section

For citation. Savelyeva NA Numerical Analysis of Stress-Strain Conditions of a Reinforced Concrete Bridge Section. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(1):89–95. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-89-95>

Введение. В настоящее время наиболее обширной областью применения предварительно напряженного железобетона является мостостроение. Вместе с тем в практике отечественного проектирования пролетных секций путепроводов и виадуков предпочтение отдается применению стальных конструкций. Во многом это объясняется проблемами, связанными с «жесткими» сроками строительства автомобильных развязок, удобством транспортировки металлических конструкций и высокими затратами, связанными с изготовлением большепролетных монолитных предварительно напряженных железобетонных секций и их последующим монтажом. Тем не менее опыт западных стран и стран Южной Азии свидетельствует о целесообразности использования в качестве строительного материала пролетных секций автомобильных мостов преднапряженного железобетона. Причем для решения вышеуказанных проблем принято железобетонные секции изготавливать непосредственно на объекте с последующей движкой на мостовые опоры.

Общеизвестно, что бетон подвержен деформации ползучести, которая существенно зависит от его «возраста», размеров конструкции, характера и последовательности приложения (снятия) внешней нагрузки, температурно-

влажностного состояния среды. Экспериментально установлено, что ползучесть существенно влияет на перераспределение внутренних усилий в бетонных и железобетонных конструкциях [1, 2]. Причем перемещения, обусловленные деформацией ползучести, зачастую превышают перемещения, вызванные приложением нагрузки в начальный момент времени, как это имело место с железобетонным мостом на островном государстве Палау в 1996 году [3]. Не смотря на большое количество работ, посвященных численным расчетам железобетонных конструкций с учетом ползучести бетона, в литературе отсутствуют сведения о конечно-элементном моделировании длительного деформирования мостовых секций в рамках теории линейной вязкоупругости в сочетании с принципом наложения воздействий. В частности, в работе [4] выполнен анализ длительного деформирования железобетонной балки вантового моста коробчатого сечения с использованием программного комплекса MIDAS/Civil, в котором используется методика, базирующаяся на понижении текущего модуля упругости бетона с помощью коэффициента ползучести.

Таким образом проблема численного анализа длительного деформирования железобетонных мостовых секций в настоящее время является мало изученной. На основании этого цель исследования может быть сформулирована следующим образом: разработка методики конечно-элементного моделирования железобетонных мостовых секций коробчатого сечения с учетом линейной ползучести бетона.

Материалы и методы. Разработанная механико-математическая модель ползучести бетона базируется на современной теории упруго-ползучего тела [5, 6]. Для конечно-элементного анализа монолитных железобетонных конструкций с учетом ползучести бетона связь между напряжениями и деформациями представим в операторно-матричной форме [6]:

$$\{\sigma(t)\} = [E(t)](1 - R)\{\varepsilon(t)\}, \quad (1)$$

где $\{\sigma(t)\}$, $\{\varepsilon(t)\}$ — векторы-столбцы напряжений и деформаций, соответствующие моменту времени t ; $[E(t)]$ — матрица упругости (в общем случае размерностью 6×6); $R\varepsilon_{ij} = \int_{t_1}^t R(t, \tau)\varepsilon_{ij}(\tau)d\tau$, $i, j = 1, 3$ — линейный интегральный оператор, устанавливающий соответствие между текущими деформациями ε_{ij} и «историей» длительного деформирования $\varepsilon_{ij}(\tau)$.

В подынтегральном выражении введена так называемая наследственная функция $R(t, \tau)$ [2].

В предлагаемой схеме численного интегрирования результирующего интегрально-операторного уравнения (1) применен принцип наложения воздействий (суперпозиции), и предусмотрено хранение в памяти компьютера всей истории нагружения в виде массивов узловых перемещений. На базе разработанного математического обеспечения на языке программирования Intel Fortran была написана и отлажена учебно-исследовательская программа Polygon [5, 6].

Результаты исследования. В [6] отмечается, что при больших пролетах железобетонных мостов, как правило, применяются монолитные секции коробчатого поперечного сечения. Для пролетных строений с проезжей частью шириной до 20 м применяется одно коробчатое поперечное сечение с развитыми консолями.

Выполним расчет напряженно-деформированного состояния предварительно напряженной секции пролета железобетонного моста коробчатого типа. В качестве прототипа возьмем данные примера из [7, 8]. Форма и размеры сечения секции представлены на рис. 1. Величина пролета мостовой балки 20 м. Полагаем, что секция нагружена собственным весом, усилием от предварительного натяжения тросов и равномерно распределенным давлением на проезжей части.

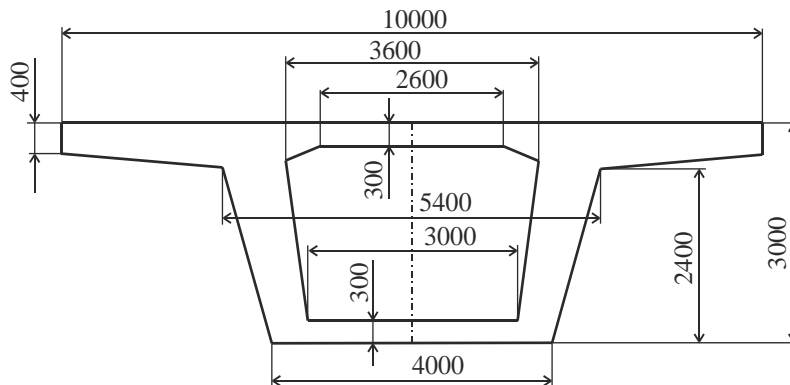


Рис. 1. Поперечное сечения коробчатого пролетного строения [7, 8]

Учитывая симметрию геометрии и нагружения, рассмотрим $\frac{1}{2}$ часть секции. Соответствующая конечно-элементная модель приведена на рис. 2. Для дискретизации исследуемой области секции использованы объемные восьмиузловые конечные элементы (КЭ).

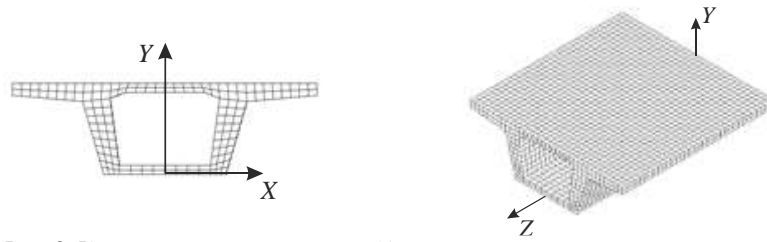


Рис. 2. Конечно-элементная модель 1/2 части секции пролетного строения

По краям секции расположены опорные площадки, расстояние между которыми составляет 3,6 м по ширине. Схема траекторий «активного» армирования вдоль оси Z показана на рис. 3 (размеры в метрах). Рассматривается способ напряжения на бетон с помощью тросовой арматуры без сцепления с бетоном. Усилие предварительного натяжения тросов составляет 245,6 кН.

Сначала выполним линейно упругий анализ напряженно-деформированного состояния пролетной секции. На рис. 4 и 5 приведены картины распределения вертикальных перемещений u_y и продольных напряжений σ_z в 1/2 части секции от действия собственного веса.

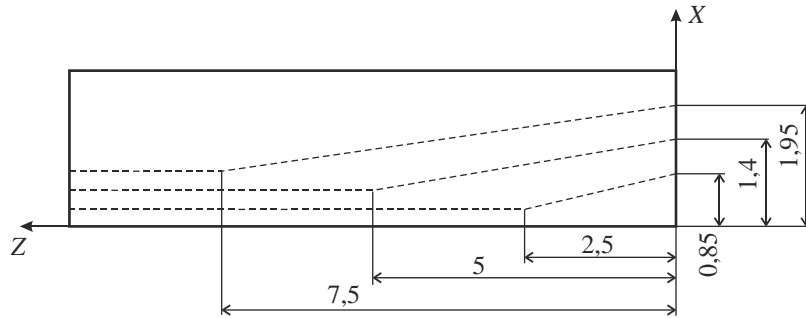


Рис. 3. Схема «активного» армирования (трапецидальная)

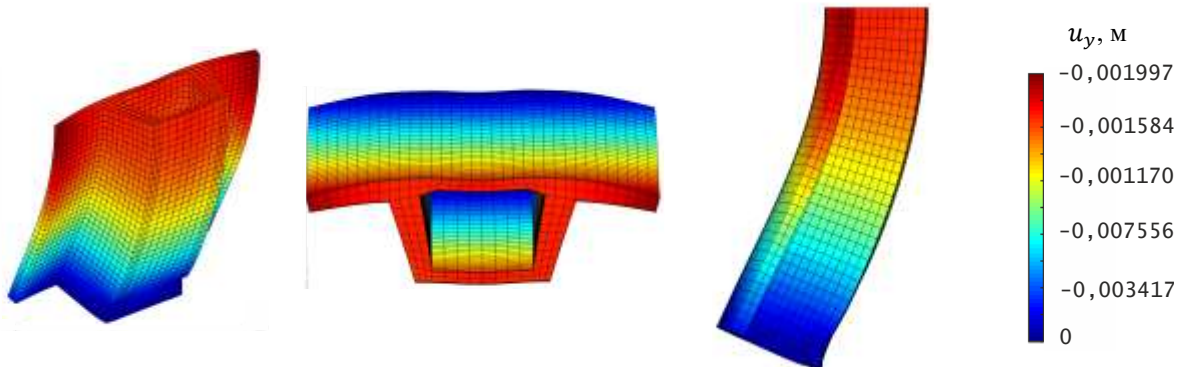


Рис. 4. Картина распределения перемещений u_y в 1/2 части секции от действия собственного веса (Polygon)

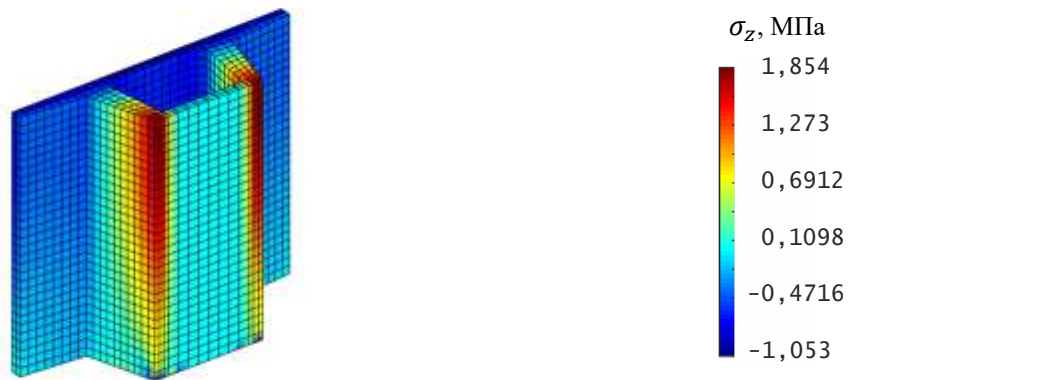


Рис. 5. Картина распределения перемещений σ_z в 1/2 части секции от действия собственного веса (Polygon)

Значения максимального прогиба и максимального растягивающего напряжения в данном случае составили:

$$|u_{y\max}| = 0,001997 \text{ м}; \sigma_{z\max}^+ = 1,854 \text{ МПа.}$$

Для верификации используемой конечно-элементной модели аналогичный расчет секции с учетом гравитационного воздействия был выполнен с помощью комплекса ANSYS. Визуализация полей u_y и σ_z , полученных на базе восьмиузловых КЭ типа SOLID185, приведена на рис. 6 и 7.

Сравнивая результаты, представленные на рис. 4 и 6, устанавливаем достаточно хорошее количественное совпадение максимальных прогибов по краям $\frac{1}{2}$ части пролетной секции в сечении $Z = 5$ м. Картины распределения σ_z качественно различаются, хотя значения σ_{zmax}^+ в обоих расчетах достаточно близки:

$$\sigma_{zmax}^+ = 1,82 \text{ МПа (ANSYS); } \sigma_{zmax}^+ = 1,854 \text{ МПа (Polygon).}$$

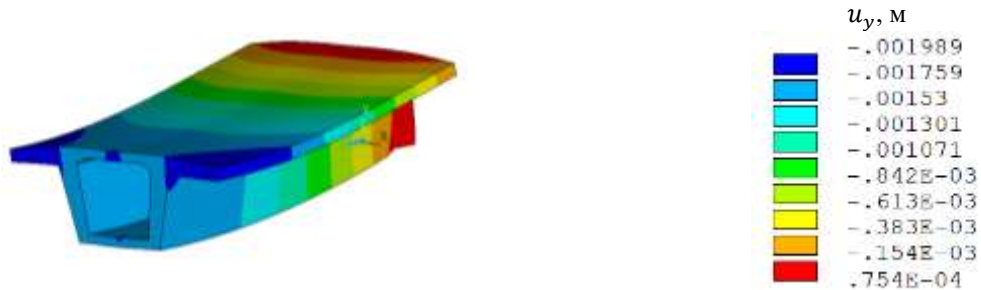


Рис. 6. Картина распределения перемещений u_y в $\frac{1}{2}$ части секции от действия собственного веса (ANSYS)

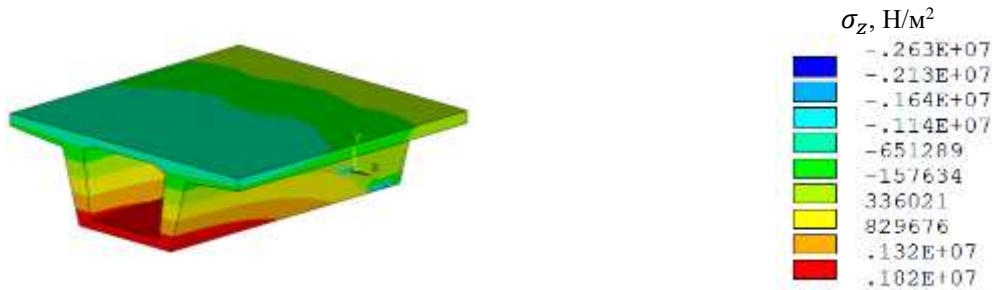


Рис. 7. Картина распределения перемещений σ_z в $\frac{1}{2}$ части секции от действия собственного веса (ANSYS)

Для демонстрации возможностей комплекса Polygon на рис. 8 показана модель с введенным фоновым армированием проезжей части рассматриваемой двадцатиметровой секции. Площадь поперечного сечения арматурных стержней $0,001 \text{ м}^2$, модуль упругости $1,96 \cdot 10^5 \text{ МПа}$. Места расположения арматурных стержней, моделируемых пространственными двухузловыми балочными КЭ, в сечении секции отмечены на рис. 8 точками.

Результаты, полученные с помощью комплекса Polygon, сравнивались с данными комплекса ANSYS. В обоих случаях нагрузкой являлся только собственный вес секции. Величины максимальных прогибов составили:

$$|u_{ymax}| = 0,001977 \text{ м (ANSYS); } |u_{ymax}| = 0,002009 \text{ м (Polygon).}$$

Результат расчета прогиба секции без армирования $|u_{ymax}| = 0,001997 \text{ м}$. Таким образом, можно сделать вывод о том, что включение в расчетную модель 14-ти стержневых КЭ диаметром 35,6 мм практически не влияет на изгибную жесткость данной пролетной секции.

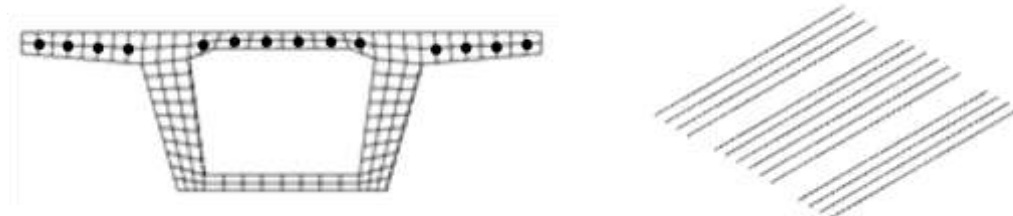


Рис. 8. Конечно-элементная модель с фоновым армированием проезжей части

Следует отметить, что «прямой» решатель комплекса ANSYS требует введения дополнительных связей на узлы стержневых КЭ, запрещающих повороты относительно осей Y и Z . Решатель комплекса Polygon свободен от такого ограничения. Визуализации полей σ_z , полученных с помощью комплексов Polygon и ANSYS, приведены на рис. 9 и 10.

При сравнении данных на этих рисунках устанавливаем, что максимальные растягивающие напряжения, вычисленные с помощью разных комплексов, практически совпадают: 1,873 МПа (Polygon); 1,81 МПа (ANSYS).

Также обращает на себя внимание тот факт, что на рис. 9 отчетливо видны зоны концентрации напряжений σ_z в местах расположения арматурных стержней (отмечены стрелками). Постпроцессор комплекса ANSYS такой информации не предоставляет.

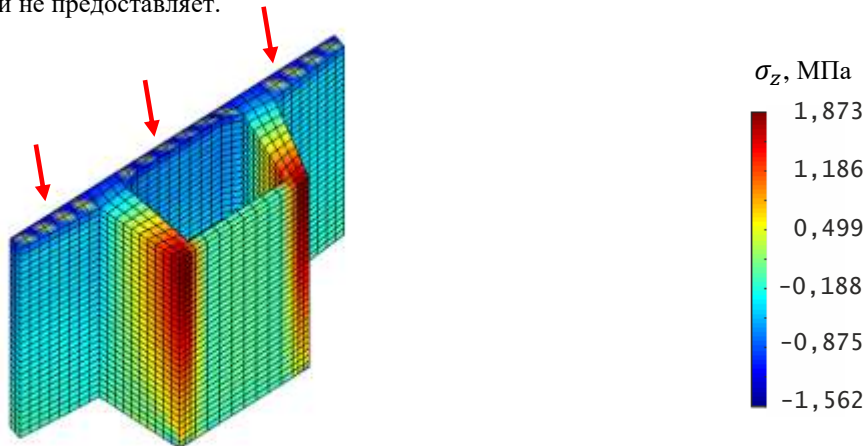


Рис. 9. Картина распределения перемещений σ_z в $\frac{1}{2}$ части секции с арматурой от действия собственного веса (Polygon)

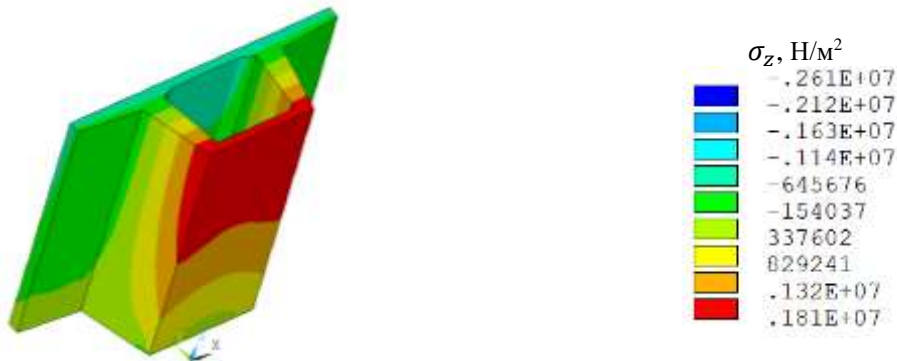


Рис. 10. Картина распределения перемещений σ_z в $\frac{1}{2}$ части секции с арматурой от действия собственного веса (ANSYS)

В заключении рассматриваемой задачи выполним расчет пролетной секции при длительном деформировании. В качестве сценария нагружения используем следующую хронологию событий:

а) в момент времени $t = 28$ сут. нагружение собственным весом и предварительное натяжение тросов усилием 245,6 кН;

б) в момент времени $t = 72$ сут. к проезжей поверхности прикладывается равномерно распределенная нагрузка $q = 20000 \text{ Н/м}^2$ (2 т/м²).

Параметры модели упруго-ползучего тела взяты из монографии [2].

Графики перемещений $u_y(t)$ в точках 1 и 2 сечения $Z = 10$ м пролетной секции показаны на рис. 11.

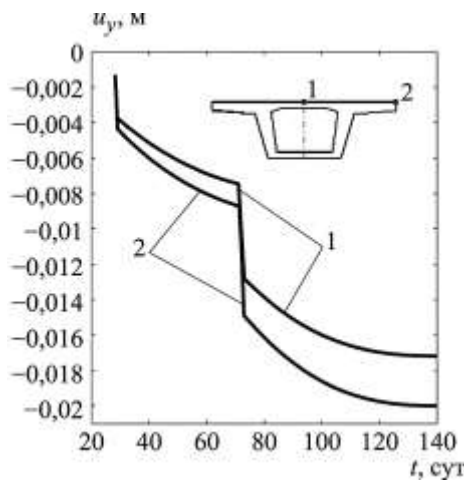


Рис. 11. Кривые ползучести в точках 1 и 2 (Polygon)

Значение максимального растягивающего напряжения при заданном законе нагружения в момент наблюдения $t = 140$ сут. составило 16,7 МПа, что существенно превышает предел прочности бетона.

Обсуждение и заключение. На основании полученных результатов конечно-элементного моделирования можно отметить, что принятая схема трапецидальной раскладки предварительно напрягаемой канатной арматуры практически не влияет на несущую способность мостовой секции, т. к. не обеспечивает необходимого выгиба. Также ввод в конечно-элементную модель армирующих стержней диаметром 35,6 мм в зоне проезжей части практически не влияет на изгибную жесткость рассматриваемой мостовой секции. Для повышения эксплуатационной надежности мостовых секций из предварительно напряженного бетона рекомендуется на этапе проектирования в дополнение к существующим вычислительным технологиям использовать современную вязкоупругую модель бетона, реализованную в авторизированном программном комплексе Polygon.

Список литературы / References

1. Тамразян А.Г., Есаян С.Г. *Механика ползучести бетона*. Москва: МГСУ; 2012. 524 с. Tamrazyan AG, Esayan SG *Mechanics of Concrete Creep*. Moscow: MGAU; 2012. 524 pp. (In Russ.)
2. Александровский С.В. *Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести*. М.: Стройиздат; 1973. 432 с. Alexandrovsky SV *Calculation of Concrete and Reinforced Concrete Structures for Changes in Temperature and Humidity Taking Creep into Account*. Moscow: Stroyizdat; 1973. 432 p. (In Russ.)
3. Bazant ZP, Yu Q, Li G.-H., Klein GJ, Kristek V Excessive Deflections of Record-Span Prestressed Box Girder. *ACI Concrete International*. 2010;32(6):44–52. URL: https://www.researchgate.net/publication/285841130_Excessive_deflections_of_record-span_prestressed_box_girder (accessed: 31.01.2026).
4. Shi J-X, Ran Z-H Calculation of Creep Effect of Extradosed Cable-stayed bridge based on Midas Civil. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018;423:012113. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/423/1/012113>
5. Гайдзуров П.П., Исхакова Э.Р., Савельева Н.А. Численное моделирование объемного напряженно-деформированного состояния предварительно напряженных железобетонных конструкций с учетом ползучести бетона. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2023;2:17–24. <http://dx.doi.org/10.17213/1560-3644-2023-2-17-24>
- Gaydrzhurov PP, Iskhakova ER, Savelyeva NA Numerical Simulation of Volumetric Stress-Strain State Prestressed Reinforced Concrete Structures Taking into Account the Creep of Concrete. *Scientific Journal Bulletin of Higher Educational Institutions North Caucasus Region. Technical Sciences*. 2023;2:17–24. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.17213/1560-3644-2023-2-17-24>
6. Савельева Н.А. *Решение пространственной задачи вязкоупругости методом конечных элементов в приложении к бетонным и железобетонным конструкциям*. Дис. канд. техн. наук. Ростов-на-Дону: ДГТУ; 2024. 177 с. Savelyeva NA Solution of the Spatial Problem of Viscoelasticity by the Finite Element Method in Application to Concrete and Reinforced Concrete Structures. *D.Sc. (Eng.) Dissertation*. Rostov-on-Don: DSTU; 2024. 177 p. (In Russ.)
7. Mensink JJ *Deformation Limits to be Used to Evaluate Deformation Measurements of Concrete Bridges*. Eindhoven: University of Technology; 2017. 138 p.
8. Long X, Lee CK Modelling of Two Dimensional Reinforced Concrete Beam-Column Joints Subjected to Monotonic Loading. *Advances in Structural Engineering*. 2015;18(9):1466–1467. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.18.9.1461>

Об авторе:

Савельева Нина Александровна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры строительной механики и теории сооружений Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/), ninasav86@mail.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the author:

Nina A. Savelyeva, Cand.Sci. (Eng.), Senior Lecturer at the Department of Structural Mechanics and Theory of Structures, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](https://orcid.org/), ninasav86@mail.ru

Conflict of interest statement: the author does not have any conflict of interest.

The author has read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 31.01.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 14.02.2026

Принята к публикации / Accepted 28.02.2026

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES



УДК 621.928:728.1

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-96-103>

Устойчивое управление жизненным циклом: от лопастей ветрогенераторов до современных игровых комплексов



Н.С. Самарская  

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

 nat-samars@yandex.ru

EDN: OLPRDR

Аннотация

Введение. В современных условиях развития строительной отрасли концепция жизненного цикла строительных объектов охватывает не только этапы проектирования и эксплуатации, но и вопросы утилизации конструктивных элементов, в частности компонентов ветроэнергетических установок (далее — ВЭУ) со сроком службы 20–25 лет. Традиционные методы утилизации отработавших элементов ветрогенераторов демонстрируют низкую экологическую эффективность. В контексте циркулярной экономики возникает необходимость разработки инновационных решений для интеграции отработанных компонентов ВЭУ в строительную практику.

Целью исследования являлось научное обоснование возможности применения утилизированных лопастей ВЭУ в конструкциях детских игровых комплексов.

Материалы и методы. Исследование основано на методологии анализа жизненного цикла лопастей ветряных турбин с учетом специфики их обработки в строительной отрасли. В работе использовались следующие методы: систематический анализ характеристик лопастей ветряных турбин, статистическая оценка их жизненного цикла, сравнительный анализ технологий вторичной переработки и оценка безопасности конструкций, изготовленных из переработанных материалов.

Результаты исследования. В результате проведенного анализа и исследования разработана технология переработки лопастей в конструктивные элементы детского игрового комплекса.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты подтверждают принципиальную возможность и практическую целесообразность использования утилизированных лопастей ВЭУ в качестве объектов строительства для создания безопасных и долговечных детских игровых комплексов. Разработанные технологические решения, учитывающие полный жизненный цикл материалов — от эксплуатации в составе ветроэнергетических установок до вторичного применения в строительных конструкциях, — позволяют трансформировать экологическую проблему утилизации в ресурс для развития городской инфраструктуры.

Ключевые слова: жизненный цикл, утилизация ветроэнергетических установок, строительство детских площадок, вторичное использование, строительный объект

Для цитирования. Самарская Н.С. Устойчивое управление жизненным циклом: от лопастей ветрогенераторов до современных игровых комплексов. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2026;5(1):96–103. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-96-103>

Original Empirical Research

Sustainable Lifecycle Management: From Wind Turbine Blades to Modern Playground Complexes

Natalya S. Samarskaya  

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 nat-samars@yandex.ru

Abstract

Introduction. In modern conditions of the construction industry development, the concept of the life cycle of construction facilities encompasses not only the design and operation stages, but also the disposal of structural elements, particularly

© Самарская Н.С., 2026

the components of wind turbines (hereinafter referred to as WT) with a service life of 20–25 years. Conventional methods of disposal of used elements of wind turbines display a low environmental efficiency. In the context of the circular economy, innovative solutions for integrating used WT components into construction practice are to be developed.

The aim of the study was to scientifically substantiate a possibility of using recycled wind turbine blades in the construction of children's playground complexes.

Materials and Methods. The study is based on a methodology for analyzing the life cycle of wind turbine blades, taking the specific features of their processing in the construction industry into consideration. The following methods were employed: a systematic analysis of the characteristics of wind turbine blades, a statistical assessment of their life cycle, a comparative analysis of recycling technologies and an assessment of the safety of structures made from recycled materials.

Research Results. As a result of the analysis and research conducted, a technology for processing blades into structural elements of a children's playground complex has been developed.

Discussion and Conclusion. The results confirm the fundamental possibility and practical expediency of employing recycled wind turbine blades as construction facilities in order to design safe and durable children's playground complexes. The developed technological solutions that take into consideration the full life cycle of materials – from operation as part of wind turbines to secondary use in building structures – enable transformation of the environmental problem of recycling into a resource for urban infrastructure development.

Keywords: life cycle, utilization of wind power plants, construction of playgrounds, secondary use, construction site

For citation. Samarskaya NS Sustainable Lifecycle Management: from Wind Turbine Blades to Modern Playground Complexes. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(1):96–103. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-96-103>

Введение. В современных условиях развития строительной отрасли наблюдается тенденция к комплексной реализации концепции жизненного цикла строительных объектов, включающей не только этапы проектирования и эксплуатации, но и вопросы утилизации конструктивных элементов. Особую актуальность приобретает проблема управления жизненным циклом компонентов возобновляемых источников энергии, в частности ветроэнергетических установок (далее — ВЭУ), физический срок службы которых достигает 20–25 лет [1].

Традиционные подходы к утилизации отработавших свой срок элементов ветрогенераторов, такие как захоронение на полигонах или термическая обработка, демонстрируют низкую экологическую эффективность и противоречат принципам устойчивого развития строительной отрасли. В контексте циркулярной экономики возникает необходимость разработки инновационных решений, позволяющих интегрировать отработанные компоненты ВЭУ в строительную практику.

Концепция жизненного цикла проекта (ЖЦП) выступает методологической основой для формирования эффективных стратегий управления строительными отходами. Особое внимание уделяется поиску оптимальных путей вторичного использования композитных материалов лопастей ветрогенераторов, обладающих высокими прочностными характеристиками и устойчивостью к внешним воздействиям.

Целью настоящего исследования является комплексное научное обоснование возможности применения утилизированных элементов ВЭУ, в частности лопастей, в качестве конструктивных элементов детских игровых комплексов. Данное направление исследований соответствует современным тенденциям развития строительной отрасли и способствует реализации принципов циклической экономики в градостроительной деятельности. Основой для развития научной идеи послужил архитектурный проект детской площадки в Роттердаме (рис. 1).

В отличие от единичных архитектурных проектов (рис. 1) представленная работа интегрирует комплексную систему управления всем жизненным циклом — от проекта и строительства ветрогенератора до критериев отбора лопастей на этапе демонтажа ВЭУ и оценки экономической целесообразности проекта вторичного использования конструктивных элементов ВЭУ.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач: анализ физико-механических характеристик материалов лопастей ВЭУ, исследование существующих методов их утилизации, разработку технологических решений по переработке и модификации композитных материалов, а также обоснование возможности их применения в конструкциях детских площадок с учетом требований безопасности и долговечности.



Рис. 1. Архитектурные решения детской площадки в Роттердаме, созданные с использованием лопастей ветрогенераторов

Материалы и методы. В основу исследования положен комплексный подход к анализу жизненного цикла лопастей ветроэнергетических установок. Методологической базой исследования выступает концепция управления жизненным циклом объектов строительства, адаптированная к специфике переработки компонентов ветрогенераторов. Для достижения поставленных целей были применены следующие методы исследования:

- системный анализ конструктивных особенностей и физико-механических характеристик лопастей ВЭУ;
- статистический анализ данных о сроках службы и объемах утилизации лопастей ветрогенераторов;
- сравнительный анализ существующих технологий переработки композитных материалов;
- экспертные оценки безопасности и долговечности конструкций из переработанных материалов.

Результаты исследования. Анализ данных многочисленных исследований композитных материалов, используемых в производстве лопастей ВЭУ (стекловолокно марки E-glass и эпоксидные смолы типа EPIKOTETM), позволяет сделать вывод об их выдающихся эксплуатационных характеристиках [1, 2]. Согласно исследованиям, проведенным коллективом авторов [3], предел прочности при изгибе данных материалов составляет 350–500 МПа, что действительно сопоставимо с характеристиками отдельных марок конструкционной стали.

Особый интерес представляют данные об устойчивости материалов к атмосферным воздействиям. Как показали климатические испытания, описанные в работе Ермакова Б.С. и др. [4], после 1000 циклов ускоренных испытаний снижение прочностных характеристик не превышало 5–7 %. Эти результаты подтверждаются и более поздними исследованиями [5].

Важное значение имеют выводы, сделанные группой исследователей [6] о сохранении лопастями до 80 % первоначальных механических свойств после 25 лет эксплуатации. Это создает научную основу для их вторичного использования в качестве несущих конструкций.

Относительно параметров обработки материалов оптимальный температурный режим резки, предотвращающий расслоение композитной структуры, составил 60–80 °С, что было установлено в ходе экспериментов, описанных в [7]. Требования к шлифовке краев (радиус скругления ≥ 3 мм), обеспечивающие безопасность для детей, обоснованы в работе коллектива авторов [8] на основе серии механических испытаний.

Полученные данные о физико-механических характеристиках композитных материалов лопастей ВЭУ имеют принципиальное значение для выбора оптимальных методов их утилизации. Как показывают исследования [3, 5], сохранение 80 % первоначальных свойств после 25 лет эксплуатации существенно расширяет возможности вторичного использования конструкционных элементов. Однако эффективность различных методов переработки существенно варьируется в зависимости от сохранности материала и требуемого качества конечного продукта.

На основании систематизации современных исследований [6, 7, 9] разработана классификация методов переработки лопастей ВЭУ, включающая три основных технологических направления (рис. 2).



Рис. 2. Классификация методов переработки лопастей ВЭУ

Выполненный экономико-экологический анализ (таблица 1) выявил значительные преимущества цельной переработки.

Таблица 1

Сравнительные показатели методов утилизации

Критерий	Механическое дробление	Пиролиз	Цельная переработка
Удельные затраты, руб./т	9600–12000	16000–20000	6400–8000
Углеродный след, кг CO ₂ -экв./т	180–220	350–400	70–90
Срок окупаемости, лет	5–7	8–10	3–4
Уровень токсичности	Низкий	Высокий	Отсутствует

Как показывают расчеты, цельная переработка обеспечивает:

- снижение углеродного следа на 60 % по сравнению с пиролизом;
- уменьшение энергопотребления на 35–40 % относительно механического дробления;
- возможность получения продукции с добавленной стоимостью.

Ключевые технологические преимущества цельного повторного использования подтверждены исследованиями [10, 11]:

- сохранение анизотропных свойств материала;
- минимальные технологические отходы (< 5 %);
- возможность создания замкнутого цикла использования композитов.

Перспективность данного направления особенно очевидна при анализе жизненного цикла продуктов переработки, где цельные конструкции демонстрируют в 2,5–3 раза лучшие экологические показатели по сравнению с альтернативными методами утилизации [12].

На основании комплексного анализа существующих методов утилизации разработана инновационная трехэтапная технологическая цепочка подготовки лопастей для повторного использования в детских игровых комплексах, включающая 4 основных этапа: демонтаж, подготовка, обработка и контроль качества.

Специализированная технология демонтажа лопастей ВЭУ предполагает следующие процессы:

- лазерное сканирование конструкции для определения оптимальных точек реза;
- применение алмазно-канатных пил с водяным охлаждением;
- использование вакуумных подъемников грузоподъемностью до 20 т;
- транспортировку в амортизирующих контейнерах с системой климат-контроля, датчиками вибрации, GPS-мониторингом.

При этом важным является обеспечение минимизации механических повреждений демонтированных конструкций и соблюдение норм безопасности при работе с крупногабаритными объектами.

Для оценки возможности повторного применения лопастей ветрогенераторов в строительстве детских площадок и других объектов предложена система из 12 ключевых критериев, объединенных в 4 категории (таблица 2).

Следующий этап подготовки представляет собой многоступенчатую систему технологических процессов и включает:

- механическую очистку: абразивоструйная обработка (давление 2–3 атм);
- химическую обработку: биоразлагаемые моющие составы (рН 7,5–8,5), нейтральные растворители;
- антисептическую обработку.
- Контроль качества очистки можно проводить методами электронной микроскопии, инфракрасной спектроскопии, контактной углометрии.

Этап механической подготовки элементов демонтированных лопастей является важным этапом предлагаемой технологии для дальнейшего использования в строительстве детского игрового комплекса. Адаптация геометрии под новые задачи выполняется посредством прецизионной резки, которой удаляют поврежденные участки, оптимизируют размеры под целевые конструкции, создают монтажные стыковочные узлы.

Также этап механической обработки позволяет обеспечить безопасность будущей конструкции. Как правило, это предполагает обработку кромок (скругление, полировку, нанесение защитных фасок) и создание технологи-

ческих отверстий для крепежных систем. Например, для детской горки из лопасти требуется вырезка центрального сегмента (длина 6 м), формирование бортовых упор высотой до 30 см, создание контролируемо скользящей поверхности для безопасного спуска шероховатостью 3,2–6,3 мкм, обработка зон крепления к фундаменту.

Таблица 2

Критерии пригодности лопастей ВЭУ для вторичного использования

Категория	Параметр	Требования	Метод оценки
1. Структурно-механические характеристики	Остаточная прочность на изгиб	≥ 60 % от исходной (~ 300 МПа)	Испытания на трехточечный изгиб по ASTM D790
	Отсутствие критических повреждений	Трещины > 5 мм, расслоения > 10 % площади	Ультразвуковая дефектоскопия
	Состояние композитной матрицы	Влажность < 1 %, отсутствие деградации смолы	Термогравиметрический анализ (TGA)
2. Геометрические и эксплуатационные параметры	Сохраняющаяся длина сегментов	≥ 3 м для несущих элементов	Визуальный осмотр
	Радиус кривизны	1–5 м для арочных конструкций	Геометрические измерения
	Толщина стенки	Однородность ± 15 % от номинала	Измерительные приборы
3. Экологическая и химическая безопасность	Отсутствие токсичных выделений	Летучие органические соединения < 0,1 мг/м ³	Газовая хроматография
	Устойчивость к УФ-излучению	Потеря прочности < 5 % после 1000 ч теста	УФ-тестирование
	Коррозионная стойкость металлических включений	Присутствие коррозии не допускается	Визуальный осмотр, коррозионные тесты
4. Экономико-технологические критерии	Энергозатраты на обработку	< 100 кВт·ч/тонну	Энергетический анализ
	Совместимость с методами соединения	Клеевые / механические крепления	Технологическая оценка
	Локализация повреждений	≤ 30 % площади требует ремонта	Визуальный осмотр, измерения

Таким образом, разработанная технологическая цепочка позволяет:

- обеспечить полный цикл переработки лопастей ВЭУ;
- сохранить до 95 % исходных свойств материала;
- создавать безопасные и долговечные игровые комплексы;
- сократить затраты на утилизацию на 40–45 %.

Обсуждение и заключение. Проведенные исследования подтверждают, что утилизированные лопасти ветроэнергетических установок могут успешно применяться в строительстве детских игровых комплексов, обеспечивая необходимый уровень безопасности и долговечности. Разработанные технологические решения учитывают полный жизненный цикл материалов: от их эксплуатации в составе ВЭУ до вторичного использования в

строительных конструкциях. Такой подход позволяет не только решить экологическую проблему утилизации композитных отходов, но и создать дополнительный ресурс для развития городской инфраструктуры.

Ключевым аспектом является анализ жизненного цикла подобных конструкций, который демонстрирует их экономическую и экологическую эффективность на всех этапах: от проектирования и монтажа до эксплуатации и возможной повторной переработки. Внедрение данной технологии в практику строительства детских площадок способствует формированию устойчивой городской среды, отвечающей принципам циркулярной экономики.

Для дальнейшего совершенствования метода вторичного использования лопастей ВЭУ можно предложить исследовать следующие направления:

- автоматизация процессов демонтажа — внедрение современных технологий разборки и сортировки лопастей для снижения трудозатрат и повышения эффективности;
- роботизированные комплексы обработки — применение автоматизированных систем для резки, шлифовки и подготовки композитных сегментов, что повысит точность и безопасность работ;
- разработка «умных» покрытий — создание многофункциональных материалов с возможностью самодиагностики повреждений, что увеличит срок службы конструкций и снизит затраты на обслуживание.

Реализация этих мер позволит не только расширить сферу применения переработанных лопастей ВЭУ, но и повысить экономическую привлекательность технологии, способствуя ее массовому внедрению в строительную отрасль.

Список литературы

1. Animasaun AB, Adeniran AO, Udorah FN, & Oluyemi IA. Optimization of wind turbine performance through advanced materials and design. *Optimality*. 2025;2(1):1–15. <https://doi.org/10.22105/opt.v2i1.69>
2. Lagos F, et al. Recent Advances in the Analysis of Functional and Structural Polymer Composites for Wind Turbines. *Polymers* 17.17. 2025:2339. <https://doi.org/10.3390/polym17172339>
3. Шатчилямбе В.Л., Фролов В.Я., Иванов Д.В., Ланцев Д.Ю., Таджибаев А.И., Погорелов А.В. Имитационное моделирование параллельной работы ветрогенерирующих установок. *Вестник Ивановского государственного энергетического университета* 2025;4:66–75 <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2025.4.066-075>
4. Satchilembe VL, et al. Simulation Modeling of Parallel Operation of Wind Power Plants. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2025;4:66–75 (In Russ.) <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2025.4.066-075>
5. Ермаков Б.С. и др. Влияние водоотталкивающего покрытия на работоспособность конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях экстремально низких температур. *Горная промышленность*. 2024;S5:198–203. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-198-203>
6. Ermakov BS, et al. The Influence of Water-Repellent Coating on the Performance of Structures Made of Polymer Composite Materials in Conditions of Extremely Low Temperatures. *Russian Mining Industry*. 2024;5S:198–203. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-198-203>
7. Cherkashina NI, Pavlenko ZV, Domarev SN, Ruchiy AY, Solgalov VV Creation of a Composite Material Based on Plant-Based Components. *Nanotechnologies in Construction*. 2024;16(1):67–76. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-67-76>
8. Li L, et al. Collaborative Disposal of Exhaust Gas and Waste Wind Turbine Blades: Mechanical Properties of Recycled Glass Fibres and Economic Analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2024;471:143351. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143351>
9. Chen Jie, et al. Transition of material removal mechanism in cutting of unidirectional SiCf/SiC composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2024;133:391–408. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13761-y>
10. Zhang Y, et al. Environmental and Economic Assessment of Mechanical Recycling of End-of-Life Wind Turbine Blades into Rebars and Comparison with Conventional Disposal Routes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2025;190:108711. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.108711>
11. Самарская Н.С., Парамонова О.Н., Лысова Е.П., Чистякова В.Д. Разработка модели жизненного цикла для ветроэнергетической установки. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2022;4:25–31. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-25-31>
12. Samarskaya NS, Paramonova ON, Lysova EP, Chistyakova VD Development of a Life Cycle Model for a Wind Turbine. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2022;4:25–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-25-31>
13. Oh Eunyoung, et al. Sustainable green composite materials in the next-generation mobility industry: review and prospective. *Advanced Composite Materials* 2024;33:1368–1419. <https://doi.org/10.1080/09243046.2024.2348237>
14. Türker, Yasemin Sümeyye, Fahrettin Öztürk, and Yahya Öz. Review of recycling methods of thermoplastic composite materials. *Polymer-Plastics Technology and Materials* 2024;63.12:1693–1713. <https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2352148>

12. Riuttala Mari, et al. How building component reuse creates economic value—Identifying value capture determinants from a case study. Journal of Cleaner Production 2024;443:141112. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141112>

Об авторе:

Самарская Наталья Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения, климатической и альтернативных энергоустановок Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), nat-samars@yandex.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Natalya S. Samarskaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Climate Engineering and Alternative Power Plants of the Don State Technical University (Don State Technical University, 1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), nat-samars@yandex.ru

Conflict of interest statement: the author does not have any conflict of interest.

The author has read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 10.11.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 19.01.2025

Принята к публикации / Accepted 03.02.2026

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 624.011.78

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-104-114>

Несущая способность соединений из бамбука и их применение в ферменных конструкциях

Сюаньчжэнь Сун¹, Х.М. Муселемов², А.Н. Бескопыйный³ ✉

¹ Донской институт, Шаньдунский транспортный университет, г. Цзинань, провинция Шаньдун, Китайская народная республика

² Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала, Российская Федерация

³ Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ abeskopylnii@donstu.ru



EDN: VCEHEZ

Аннотация

Введение. Конструкции из бамбука получили широкое распространение в странах Азии, Африки, Латинской Америки. Бамбук представляет собой градиентный материал с неодинаковыми свойствами по поперечному сечению и характерной анизотропией: хорошими свойствами в продольном и слабыми поперечном направлениях. В связи с этим соединения бамбуковых стержней представляет слабое место в конструкции, что является научной проблемой. В современной литературе показана недостаточная эффективность различных типов соединений бамбуковых стержней, что приводит к прогрессирующему обрушению конструкции. Выявленные пробелы в существующих исследованиях позволили сформулировать цель настоящей статьи: разработка новых типов соединений стержней бамбука для обеспечения безопасной и надежной работы ферменной конструкции.

Материалы и методы. Объектом исследования является ферменная конструкция из бамбука с толщиной стенки не менее 10 мм. Расчет ферм проводился по усовершенствованным методам вырезания узлов, подбора сечений и построения линий влияния.

Результаты исследования. Предложена новая конструкция соединения бамбуковых стержней в пространственном случае. Усовершенствованный пространственный шарнир представляет собой цельную стальную сферу горячейковки с 18 резьбовыми отверстиями и обработанной опорной поверхностью под углами 45°, 60° и 90° относительно друг друга. На каждом конце элемента пространственной конструкции прикрепляется коническая стальная секция для передачи усилия от бамбуковых соединений к узловым соединениям. Благодаря такому сужающемуся конусообразному сечению узловые соединения могут быть соединены со многими элементами одновременно. Проведен расчет фермы пешеходного моста при различных вариантах приложения нагрузки. Показано, что предложенный тип соединения обеспечивает эффективную работу пространственной конструкции. Реальный коэффициент надежности 2,33 превосходит традиционное значение на 29 %.

Обсуждение и заключения. Предложенные варианты обеспечения надежного соединения бамбуковых стержней имеют большое значение при проектировании и строительстве бамбуковых ферменных конструкций пространственного типа. Сферический шарнир и конусное крепление с металлическим тросом создают надежное соединение, что имеет решающее значение для конструкций мостового типа или жилых помещений. Перспективы настоящей работы сосредоточены на исследовании эффективности предложенных соединений в динамических задачах в условиях движущейся нагрузки и ползучести.

Ключевые слова: бамбук, ферма, соединение бамбуковых стержней, пешеходный мост

Благодарности. Авторы благодарят руководителя научного проекта д.т.н., профессора Д.Р. Маиляна и д.т.н., профессора Б.М. Языева за ценные рекомендации при выполнении исследования.

Для цитирования. Сюаньчжэнь Сун, Муселемов Х.М., Бескопыйный А.Н. Несущая способность соединений из бамбука и их применение в ферменных конструкциях. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2026;5(1):104–114. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-104-114>

Load-Bearing Capacity of Bamboo Joints and their Use in Truss Structures

Xuanzhen Song¹, Khairulla M. Muselemov², Alexey N. Beskopylny³ ✉

¹ Don College, Shandong Jiaotong University, Jinan, China

² Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russian Federation

³ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ abeskopylnii@donstu.ru

Abstract

Introduction. Bamboo structures have become widespread in Asia, Africa, and Latin America. Bamboo is a gradient material with unequal cross-sectional properties and characteristic anisotropy: good properties in the longitudinal and weak transverse directions. The connection of bamboo rods thereby represents a weak point in the design, which is a scientific issue. In modern literature, the lack of the efficiency of various types of bamboo rod joints has been shown leading to a progressive collapse of a structure. The identified gaps in the existing research has enabled us to formulate the aim of the article, which is to develop new types of bamboo rod connections to ensure safe and reliable operation of the truss structure.

Materials and Methods. The object of the study is a bamboo truss with a wall thickness of at least 10 mm. The trusses were calculated by means of the advanced methods of cutting nodes, selecting cross-sections, and designing influence lines.

Research Results. A new design for connecting bamboo rods in the spatial case has been set forth. The advanced spatial hinge is a one-piece hot-forged steel sphere with 18 threaded holes and a machined support surface at angles of 45°, 60° and 90° in relation to each other. A conical steel section is attached at each end of the spatial structure element to transfer force from the bamboo joints to the nodal ones. Due to this tapering cone-shaped section, the nodal joints can be connected to lots of elements at once. The pedestrian bridge truss has been calculated for various load application options. It is shown that the suggested type of connection ensures efficient operation of the spatial structure. The actual reliability factor of 2.33 is 29% over the traditional value.

Discussion and Conclusions. The suggested options for ensuring a reliable connection of bamboo rods are of primary importance in the design and construction of bamboo truss structures of a spatial type. A spherical hinge and a conical attachment with a metal cable create a reliable connection, which is critical for bridge-type structures or residential buildings. The prospects of the work are focused on investigating the efficiency of the suggested compounds in dynamic tasks under a moving load and creep.

Keywords: bamboo, truss, connecting bamboo rods, pedestrian bridge

Acknowledgments. The authors thank the head of the scientific project, Dr.Sc. (Eng.), Professor D.R. Mailyan and Dr.Sc. (Eng.), Professor B.M. Yazyev, for their valuable recommendations during the research.

For citation. Song X, Muselemov KhM, Beskopylny AN. Load-Bearing Capacity of Bamboo Joints and their Use in Truss Structures. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(1):104–114. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-104-114>

Введение. Конструкции из бамбука получили широкое распространение в странах Азии, Африки, Латинской Америки, то есть в тех регионах, где бамбук активно культивируется и произрастает в изобилии. В странах Латинской Америки бамбук традиционно используется для строительства жилых домов, мостов, галерей и многих других конструкций. Уникальные свойства бамбука делают его применение недорогим и экологически чистым, что соответствует повестке «зеленого» строительства. Конструкции из бамбука имеют эстетические преимущества, создавая аутентичность и гармонию с природой. В северных регионах Эквадора 1 такая тенденция существует многие столетия и привела к сокращению традиционных строительных материалов в пользу деревянно-бамбуковых каркасов, покрытых глиняной штукатуркой, традиционно сочетающейся с местной архитектурой.

Бамбук как строительный материал обладает уникальными преимуществами, включая быстрый рост (до 1 м в день), высокую мощность по секвестрации углерода — до 17 тонн CO₂ на гектар ежегодно, что в четыре раза больше, чем в тропических лесах [2, 3]. Обильные ресурсы бамбука в тропических странах, таких как Китай, Индия и др. (почти 3,5 миллиарда бамбука в год в Китае), создают значительное биоразнообразие и обеспечивают жизненную среду обитания человека. Исследование конструкций из бамбука, изучение домов и жилых строений с применением бамбуковых материалов позволяет сохранить культурную и историческую идентичность. Бамбуковые дома претерпели значительные изменения в материалах и технологиях, использовавшихся на различных этапах эволюции — от домов с бамбуковой конструкцией до домов с деревянными конструкциями, гибридных домов из дерева и кирпича, кирпично-бетонных домов и, наконец, домов с бетонным каркасом, сохраняя при

этом свой традиционный визуальный вид [4]. Следует также отметить, что в ряде стран [5] сохранение традиционного облика входит в национальную программу и входит в список культурного наследия ЮНЕСКО.

Несмотря на многовековой опыт использования бамбука в человеческой практике, детальное изучение взаимосвязи между его микроструктурой и физико-механическими свойствами началось сравнительно недавно. Бамбук представляет собой градиентный материал с неодинаковыми свойствами по поперечному сечению и характерной анизотропией в продольном и поперечном направлениях [6]. Бамбук обладает превосходными свойствами в продольном направлении, что позволяет использовать его в виде фибродобавок [7, 8] или упрочняющих элементов конструкций.

Для устранения этого фундаментального недостатка бамбука, а именно хрупкости в поперечном направлении, применяют бамбук-эпоксидные композиты, способные существенно упрочнить общую конструкцию, сохраняя преимущества и внешний вид [9]. Для понимания эффективной работы бамбуковых стержней в конструкции необходимо знать особенности разрушения бамбука [10]. Бамбук более подвержен гниению, чем обычная древесина, из-за отсутствия природных токсинов и тонких стенок волокон. Это приводит к снижению его динамических свойств [11, 12] и необходимости разработки ламинированного бамбука [13]. Бамбук чувствителен к изменениям температуры и влажности, что приводит к растрескиванию в поперечном направлении. Перепады этих температурно-влажностного режима приводят к расширению и сжатию материала, что вызывает микроскопические трещины или изломы [14]. Слабым местом конструкций из бамбука является соединение бамбуковых стержней [15]. При использовании нагелей и болтов в соединениях бамбуковых элементов могут возникать зазоры, что приводит к ослаблению конструкции.



Рис. 1. Примеры соединения бамбуковых стержней: а — сквозное; б — обвязка

Таким образом, видно, что ненадежное соединение бамбуковых стержней является одной из причин разрушения конструкций, которое вследствие хрупкого поведения бамбука приводит к прогрессирующему разрушению конструкции. На настоящий момент поиск надежных и недорогих креплений и соединений отрезков бамбука является научной проблемой. Эффективное соединение — ключевое место конструкции, определяющее его прочность и надежность. Выявленные пробелы в существующих исследованиях позволили сформулировать цель настоящей статьи: разработка новых типов соединений стержней бамбука для обеспечения безопасной и надежной работы ферменной конструкции.

Материалы и методы. В качестве материала стержня рассмотрен бамбук. Прочность на растяжение соединения с несколькими узлами определяется по самому слабому месту в стержне. Для определения прочности соединения используется бамбук с толщиной стенки не менее 10 мм. Эта минимальная толщина стенки берется из наименьшей толщины стенки образцов различных типов. Приведенное условие гарантирует, что несущая способность каждого узла достигнет как минимум 24 кН. Это предположение основано на 80%-ной предельной нагрузочной способности образца, которая была самой низкой нагрузочной способностью среди трех образцов бамбукового соединения.

После того, как бамбук выбран, следует определить допустимую нагрузку на соединение и коэффициент безопасности. Если при выборе удиллица нет никаких других предпочтений, кроме прочности, следующим шагом является определение подходящего стержня с максимальной нагрузочной способностью, немного превышающей допустимую нагрузку, умноженную на коэффициент безопасности. После этого бамбуковое соединение будет спроектировано исходя из предельной грузоподъемности этого стержня, поскольку стержень должен быть спроектирован как самая слабая часть соединения, чтобы обеспечить прочность соединения на определенном уровне.

Следующим шагом является расчет количества узлов, которое необходимо использовать, путем деления максимальной грузоподъемности стержня ($F_{u,b,c,\parallel}$) на 24 кН. Последним этапом является определение подходящих соединительных проволок таким образом, чтобы в стержне создавалось минимальное усилие натяжения до тех пор, пока все проволоки не будут натянуты.

Обрыв ($F_{m,w}$) происходит в случае превышения допустимой нагрузки на стержень. Поскольку при использовании более крупных стальных проволок работать с ними сложнее, можно использовать более мелкие, но тогда необходимо увеличить количество узлов.

При использовании колец и бамбука с примерно одинаковыми свойствами состав соединителей определяется следующим образом. Если планируется, что допустимая нагрузка на соединение составит 15 кН при коэффициенте запаса прочности 2, то следует выбрать стержень М12 класса 4.6, поскольку его характеристическая прочность составляет 33,70 кН. Если прочность каждого узла на растяжение составляет 24 кН, то для обеспечения более прочных узлов (всего 48 кН), чем на стержне, необходимы два узла. Минимальное усилие, прилагаемое к стержню до момента разрыва каждой проволоки, составляет ($F_{m,w} = 2,41 \cdot f_{u,w}$) при использовании двух проволок диаметром 4 мм и предельной прочностью 9,41 кН

$$F_{m,w} = 2,41 \cdot f_{u,w} = 4,82 \cdot 9,41 = 45,36 \text{ кН}$$

$F_{m,w} = 45,36$ — по-прежнему превышает допустимую нагрузку используемого стержня ($F_{u,r}$).

Проволоку можно заменить на меньший диаметр (3мм) с характеристической прочностью ($f_{u,w} = 5,59$ кН), например, в зависимости от наличия, но количество узлов следует увеличить до трех. Максимальная нагрузка на узлы достигает 72 кН, а минимальное усилие, прилагаемое к стержню до момента разрыва всех проволок, составляет:

$$F_{m,w} = 3 \cdot 2,41 \cdot f_{u,w} = 3 \cdot 2,41 \cdot 5,59 = 40,42 \text{ кН}$$

$$F_{m,w} = 40,42 > F_{u,r}$$

Состав других используемых прутков и стальной проволоки, а также количество узлов могут быть получены таким же способом. Примеры результатов приведены в таблице 1. Для этого используются прутки самого низкого и самого высокого класса, доступные на рынке. При использовании бамбука с аналогичными свойствами, но с пределом прочности при растяжении, полученным в результате различных исследований и составляющим 82,62 Н/мм², предел прочности всего сечения по наименьшей площади поперечного сечения, составляет 224,23 кН.

Таблица 1

Размеры стержня, количества узлов и диаметра стальной проволоки

№	Стержень				Узел		Стальная проволока	
	Класс	Диаметр	Допускаемая нагрузка	Максимальная грузоподъемность ($F_{u,r}$)	Количество узлов	Максимальная грузоподъемность ($F_{u,k,t,\parallel}$)	Диаметр	Максимальная грузоподъемность ($F_{u,r}$)
		мм	кН	кН		кН	мм	кН
1	4,6	12	16,86	33,72	2	48,00	4	45,19
2					3	72,00	3	40,25
3		20	31,40	62,80	3	72,00	4	67,78
4					5	120,00	4	112,97
5	8,8	14	46,00	92,00	4	96,00	5	138,39
6					5	120,00	4	112,97
7					8	192,00	4	180,76

Результаты исследования. Чтобы создать эффективную конструкцию с большим пролетом, элементы пространственной конструкции должны быть нагружены исключительно усилием растяжения или сжатия. Предлагаемые бамбуковые соединения на основе креплений хорошо соответствуют этому требованию. Благодаря соединению без введения строительного раствора или смолы предлагаемые соединения обеспечивают относительно более легкое соединение, чем соединения с инъекцией. Это согласуется с принципом пространственной структуры как облегченной конструкции.



Рис. 2. Применение соединения для пространственной конструкции

Среди некоторых узловых соединений узловое соединение Mejo является одним из самых популярных (рис. 2). Исходный шаровой шарнир Mejo представляет собой цельную стальную сферу горячейковки с 18 резьбовыми отверстиями и обработанной опорной поверхностью под углами 45° , 60° и 90° относительно друг друга. Чтобы использовать эти узловые соединения в пространственной конструкции из бамбука, необходимо внести некоторые усовершенствования, как показано на рис. 3. На каждом конце элемента пространственной конструкции следует прикрепить коническую стальную секцию для передачи усилия от бамбуковых соединений к узловым соединениям. Благодаря такому сужающемуся конусообразному сечению узловое соединение может быть соединено со многими элементами одновременно; в противном случае вокруг узлового соединения недостаточно места, например, в экстремальных условиях, для использования всех резьбовых отверстий, за исключением удлинения стержней бамбуковых соединений. Однако удлинение стержней бамбуковых соединений перед соединением с узловыми соединениями невозможно из-за изгибающих эффектов, хотя они являются лишь вторичными эффектами.

Еще одно усовершенствование заключается в разделении стержня как части бамбукового соединения и болта для соединения узловое соединение. Это может быть сделано с использованием конической стальной конусной секции, таким образом, крепление этой секции к бамбуковому соединению или к узловому соединению может быть выполнено отдельно.

Применение предложенного соединения рассмотрим на примере пешеходного моста (рис. 4). Поскольку при изготовлении мостов используется очень простая технология, а бамбук легко собирать, через некоторое время мосты можно заменить на новые, не сталкиваясь со многими проблемами. Однако использование традиционной технологии ограничивается пролетом мостов. В последнее время бамбуковые мосты рекламируются как экологически чистые, что ставит перед многими архитекторами и инженерами сложные задачи, особенно после того, как проблема долговечности бамбука была решена с помощью современных технологий консервации.

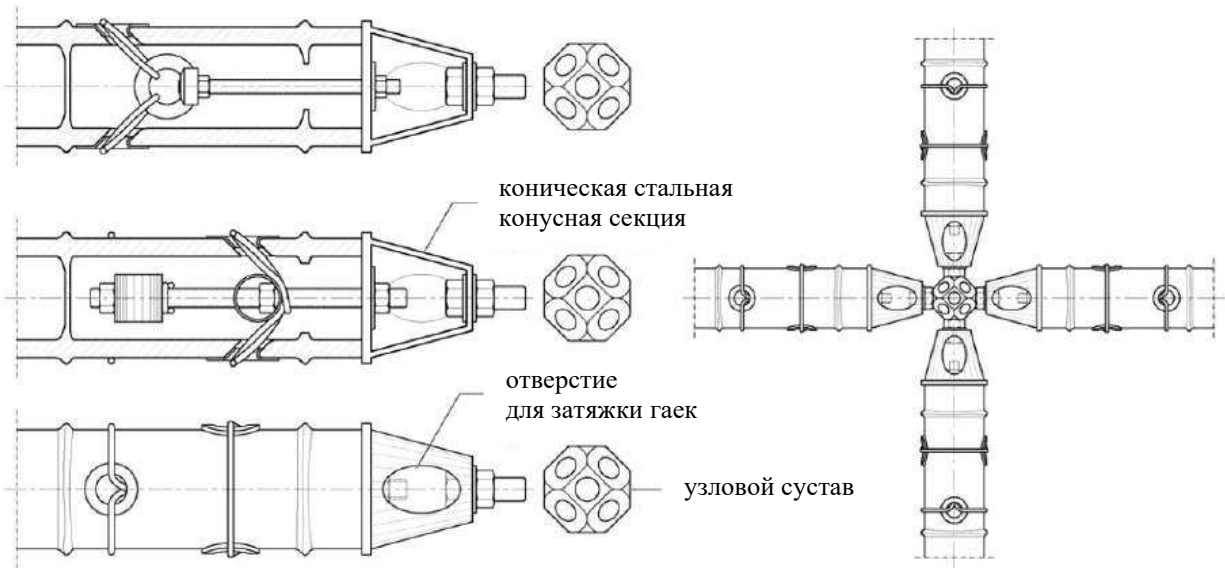


Рис. 3. Концептуальное применение бамбукового соединения на основе крепления для пространственной конструкции



Рис. 4. Пример простой конструкции моста с пролетом 10 метров

Прежде чем приступить к проектированию стыков, необходимо рассчитать распределение усилий по всей конструкции. Предполагается, что мост является пешеходным с распределенной нагрузкой 5 кН/м^2 , включая рабочую и нерабочую нагрузку (рис. 5). Длина пролета моста составляет 10 м при ширине 1,20 м.

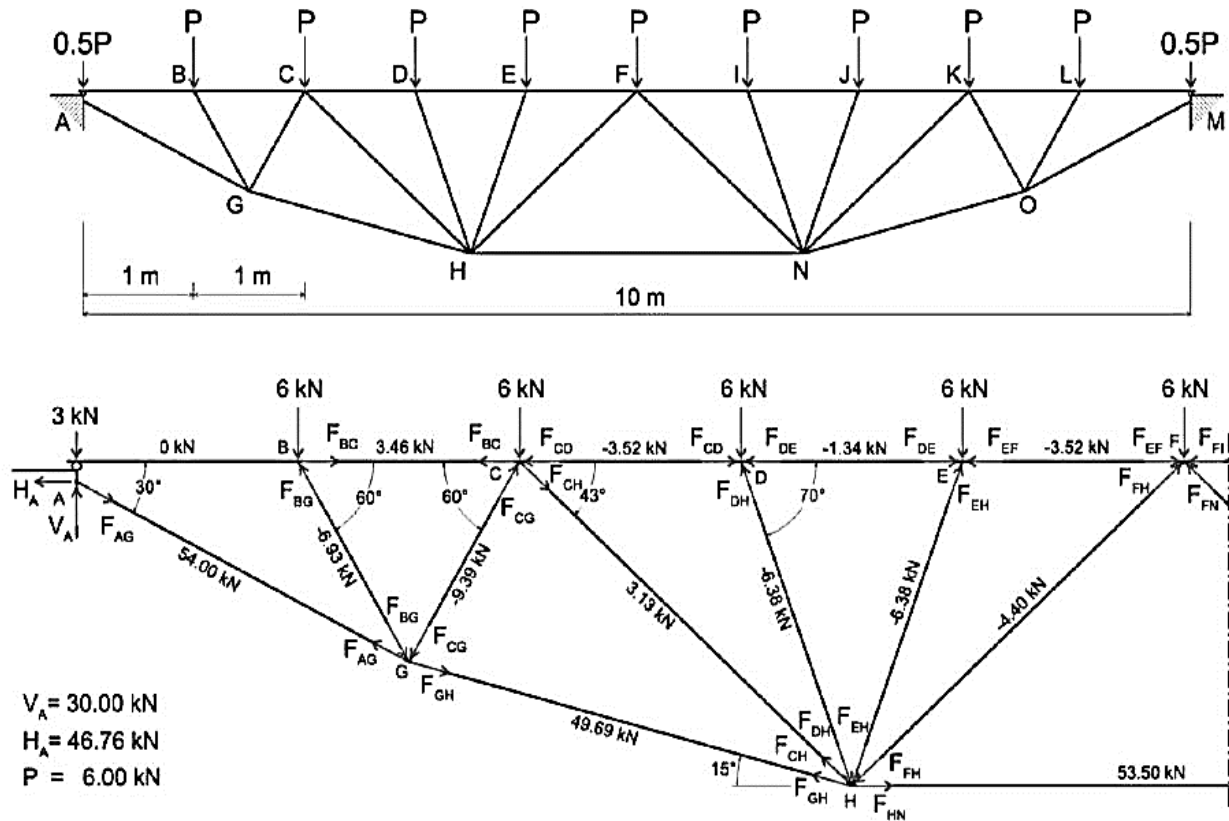


Рис. 5. Распределение усилий в стержнях фермы моста

Можно получить общую нагрузку на мост: $W = 5 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2} \cdot 10\text{м} \cdot 1,2\text{м} = 60 \text{ кН}$

Модуль упругости бамбука вдоль волокон составляет 12222,3 МПа, модуль упругости поперек волокон составляет 1489 МПа. Коэффициент Пуассона вдоль волокон составляет 0,325, коэффициент Пуассона поперек волокон 0,039.

Расчеты показывают, что на все элементы в нижней части конструкции действуют высокие силы натяжения: $F_{AG} = F_{OM} = 54,00 \text{ кН}$; $F_{GH} = F_{NO} = 49,69 \text{ кН}$; и $F_{HN} = 53,50 \text{ кН}$. Другие элементы, создаваемые при малых усилиях натяжения, имеют значение $F_{BC} = F_{KL} = 3,46 \text{ кН}$ и $148 F_{CH} = F_{KN} = 3,13 \text{ кН}$.

Остальные элементы, за исключением элементов с нейтральной осью АВ или LM, подвергаются воздействию относительно низких усилий сжатия в диапазоне от 1,34 до 9,39 кН. Исходя из этих расчетов, конструкции натяжных соединений делятся на два типа: для обеспечения высокой несущей способности используется бамбуковое соединение с несколькими узлами, а для обеспечения низкой несущей способности – бамбуковое соединение с рым-болтом.

В конструкции моста высокие силы натяжения, такие как F_{AG}, F_{GH}, F_{HN} , передаются двумя параллельными стойками. Таким образом, половина силы приходится на каждую стойку. Используя в качестве основы для расчета наибольшее усилие натяжения, соединения с несколькими узлами должны выдерживать нагрузку в 27,00 кН. Это значение считается допустимой нагрузкой.

При использовании коэффициента запаса прочности 2 максимальная нагрузка на шарнир должна составлять 54,00 кН. Согласно ранее приведенной таблице 1, можно использовать штанги М16 класса 4.6 с максимальной нагрузкой 62,80 кН. Кроме того, количество узлов и диаметр проволоки могут быть определены как 3 узла и 4 мм соответственно. При таком сочетании стержень обладает наименьшей предельной нагрузочной способностью.

Таким образом, достигается реальный коэффициент надежности:

$$F.S. = \frac{62,8 \text{ кН}}{27,00 \text{ кН}} = 2,33$$

Для упрощения расчеты выполнены для однослойной рамы в двух измерениях, как показано на рис. 5–11.

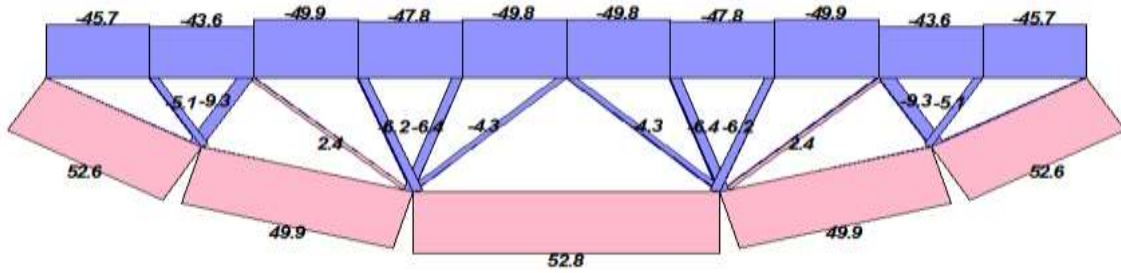
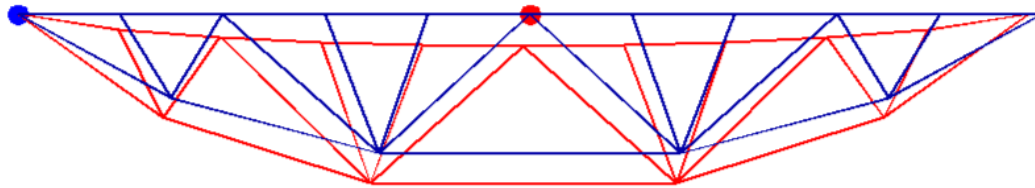


Рис. 6. Усилия в стержнях, кН



Max: Узел 1, $U_z = 0,000$ мм Min: Узел 6, $U_z = -32,538$ мм

Рис. 7. Перемещения узлов, мм (масштаб перемещений увеличен в 10 раз)

Загрузка левой половины пролета

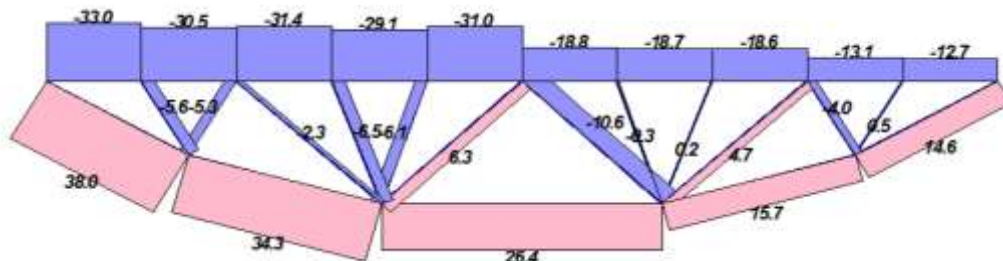
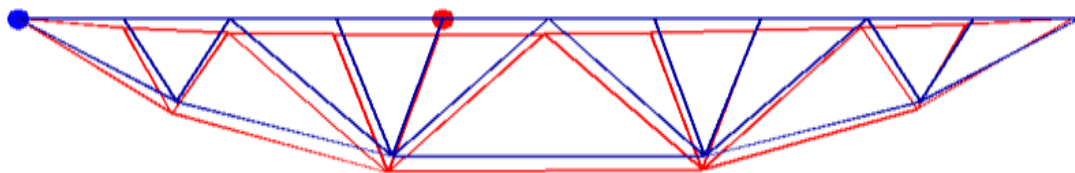


Рис. 8. Усилия в стержнях, кН



Max: Узел 1, $U_z = 0,000$ мм Min: Узел 5, $U_z = -17,250$ мм

Рис. 9. Перемещения узлов, мм (масштаб перемещений увеличен в 10 раз)

Линии влияния

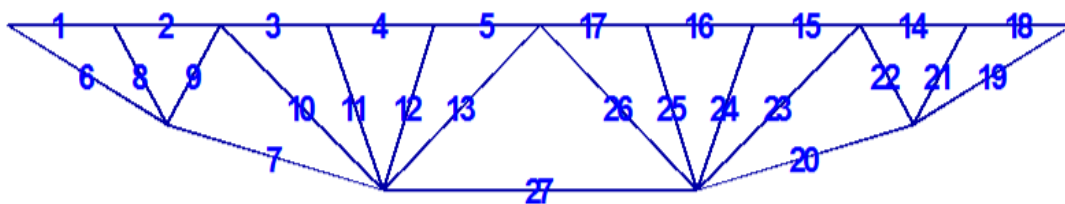


Рис. 10. Нумерация стержней

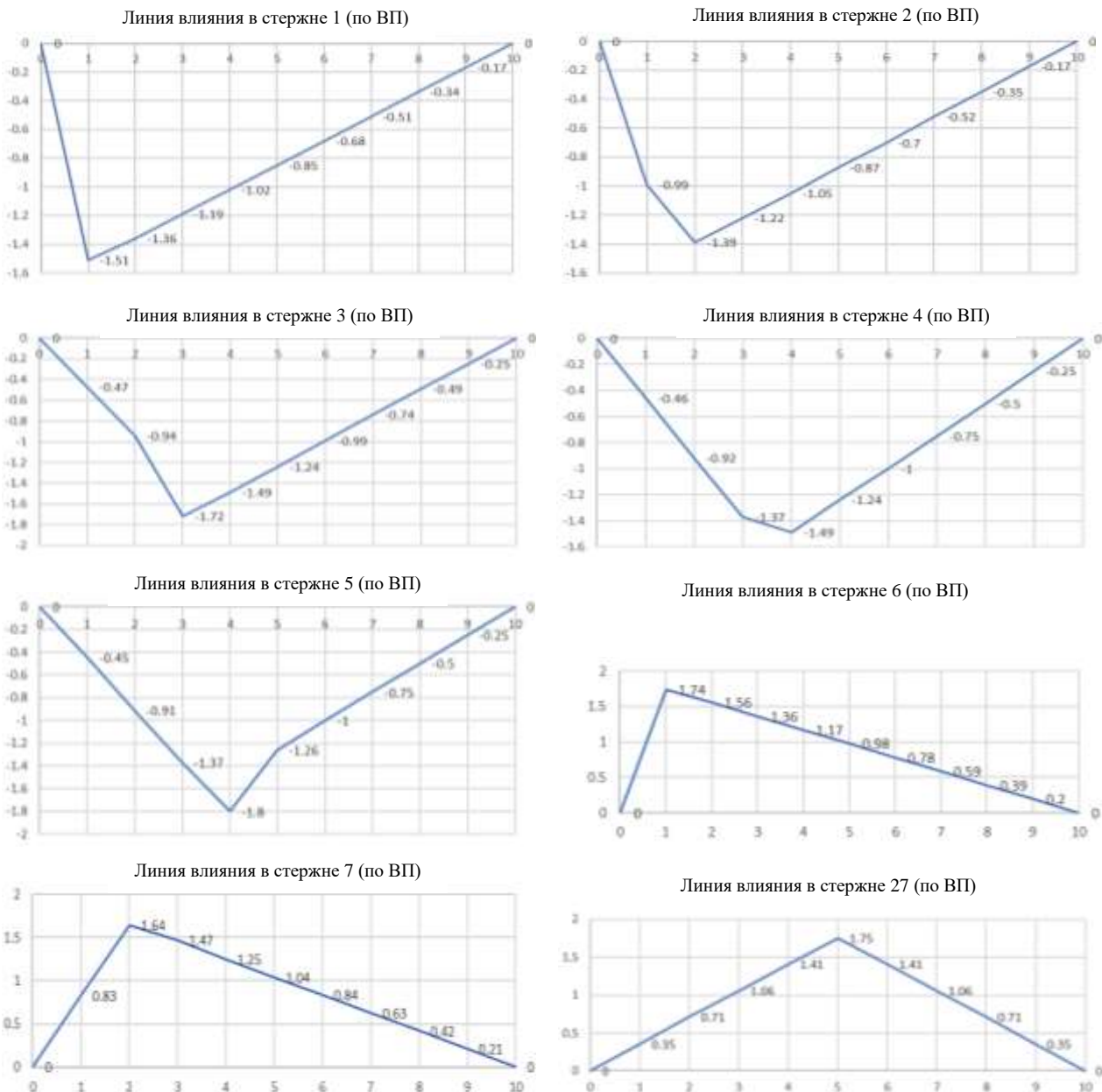


Рис. 11. Линии влияния в поясах фермы (единичная сила по верхнему поясу)

Анализ линий влияния продольных усилий приводит к выводам:

— максимальные усилия в поясах фермы возникают при нагрузке, действующей на все узлы верхнего пояса. При этом в стержнях верхнего пояса имеем отрицательные усилия, в стержнях нижнего — растягивающие.

— максимальные усилия в раскосах фермы возникнут:

а) для стержня 8 — сила в точке $X=1$; для стержня 11 — сила в точке $X=3$; для стержня 12 — сила в точке $X=4$.

б) в стержнях 9, 10, 13 линия влияния знакопеременная. Для стержня 9 максимальное растягивающее усилие — при силе в узле $X=1$, максимальное сжимающее — при одновременном действии сил в узлах $X \in [2, 10]$. Для стержня 10 максимальное растягивающее усилие $X \in [3, 10]$, максимальное сжимающее $X \in [1, 2]$. Для стержня 13 максимальное растягивающее усилие $X \in [0, 4]$, максимальное сжимающее $X \in [5, 10]$.

Обсуждение и заключения. Предложенные варианты обеспечения надежного соединения бамбуковых стержней имеют большое значение при проектировании и строительстве бамбуковых ферменных конструкций пространственного типа. Сферический шарнир и конусное крепление с металлическим тросом создают надежное соединение, что имеет решающее значение для конструкций мостового типа или жилых помещений. Перспективы настоящей работы сосредоточены на исследовании эффективности предложенных соединений в динамических задачах в условиях движущейся нагрузки и ползучести.

Список литературы/ References

1. Martal, C, Almeida, J.E. Considering the invisible in architecture: The contribution of traditional architecture to the study of pre-Hispanic mounds in the north-Andean region of Ecuador. *Journal of Anthropological Archaeology*. 2026;81: 101732. <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2025.101732>
2. Devi, A. S., Singh, K. S. Carbon storage and sequestration potential in aboveground biomass of bamboos in North East India. *Sci. Rep.* 2021;11:837. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80887-w>
3. Huang, Y., Hu, J., Zhang, Y. et al. Multifunctional Bamboo Based Materials Empowered by Multiscale Hierarchical Structures – A Critical Review. *Adv. Mater.* 2026;38:e07844. <https://doi.org/10.1002/adma.202507844>
4. Hao, J., Shinohara, H. Continuity through change: community-led adaptation of Dai bamboo houses under modernisation. *Built Heritage*. 2026;10:10. <https://doi.org/10.1186/s43238-026-00250-2>
5. Mastura, J., Noor, S., Rasoolimanesh, M.S. Perception of young local residents toward sustainable conservation programmes: A case study of the Lenggong World Cultural Heritage Site. *Tourism Management*. 2015;48:154–163. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2014.10.018>
6. Su, N.; Li, Y.; Zhang, C.; Chen, Y.; Xu, H.; Fang, C.; Chen, L. Bamboo Rhizomes: Insights into Structure, Properties, and Utilization. *Forests*. 2026;17:6. <https://doi.org/10.3390/f17010006>
7. Qu, Y., Liu, Z., Li, Y., He, E., Zhang, Z. Analytical modeling of axial compressive behavior of geopolymer concrete columns confined with FRP-bamboo winding tubes. *Composite Structures*. 2026;385:120233. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2026.120233>
8. Ahmad, S. I., M. S. Alam, and M. J. Alam. Structural and life-cycle economic feasibility of rooftop low-height bamboo telecom tower considering a case study from Bangladesh. *Pract. Period. Struct. Des. Constr.* 2026;25(3):1–12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000492](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000492)
9. Guan, M., Jia, Q., Liu, X., Wu, M., Che, P. Bending and affecting behavior of a novel flattened bamboo/epoxy composite with high robustness-toughness. *Construction and Building Materials*. 2026;517:145758. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.145758>
10. Yue, Q., Wang, W., Zhang, X., Zhao, E. Failure and fracture evolution analysis of inorganic-bonded bamboo composite material under compression. *Engineering Failure Analysis*. 2026;186(B):110536. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2026.110536>
11. Zhang, K.; Xia, H.; Xu, L.; Zhou, S.; Gao, L.; Zuo, G.; Zhang, X.; Li, Q. Tensile Behavior and Failure Mechanism of Bamboo Fiber Bundle and Its Scrimber Under Different Strain Rates. *Materials*. 2025, 18:2550. <https://doi.org/10.3390/ma18112550>
12. Zhang, K.; Sun, Y.; Wang, F.; Liang, W.; Wang, Z. Progressive Failure and Energy Absorption of Chopped Bamboo Fiber Reinforced Polybenzoxazine Composite under Impact Loadings. *Polymers*. 2020, 12:1809. <https://doi.org/10.3390/polym12081809>
13. Li, J.-N.; Singh, A.; Zhou, J.-W.; Zhang, H.-T.; Lu, Y.-C. Size and Geometry Effects on Compressive Failure of Laminated Bamboo: A Combined Experimental and Multi-Model Theoretical Approach. *Buildings*. 2025,15:3261. <https://doi.org/10.3390/buildings15183261>
14. Wang, X.; Zhong, Y.; Luo, X.; Ren, H. Compressive Failure Mechanism of Structural Bamboo Scrimber. *Polymers*. 2021, 13:4223. <https://doi.org/10.3390/polym13234223>
15. Kennaway, J.; Rajabipour, A.; Huang, D.; Bazli, M.; Tang, S.; Wang, J.; Zanker, H.; Su, F. Connection Confinement of Bolted Fibre-Reinforced Polymer Bamboo Composite. *Polymers*. 2022,14:2051. <https://doi.org/10.3390/polym14102051>

Об авторах:

Сюаньчжэнь Сун, аспирант Донского института, Шандуньского транспортного университета (250357, Китай, г. Цзинань, р-н Чанцин, ул. Хайтан, 5001) [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), suncheng@hit.edu.cn

Муселемов Хайрула Магомедмуратович, доктор технических наук, заведующий кафедрой строительных конструкций и гидротехнических сооружений Дагестанского государственного технического университета (367026, Российская Федерация, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70), [ORCID](#), kskigs@dstu.ru

Бескопильный Алексей Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры организации перевозок и дорожного движения Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), abeskopylnii@donstu.ru

Заявленный вклад соавторов

Все авторы внесли равный вклад в проведенном исследовании и подготовке статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

Xuanzhen Song, PhD student at the Don College, Shandong Jiaotong University (5001, Haitan Road, Changqing District, Jinan, 250357, China) [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), suncheng@hit.edu.cn

Khairulla M. Muselemov, Dr.Sc. (Eng.), Head of the Department of Building Structures and Hydraulic Structures, Dagestan State Technical University (70 Imama Shamilya Ave., Makhachkala, 367026, Republic of Dagestan, Russian Federation), [ORCID](#), kskigs@dstu.ru

Alexey N. Beskopylny, Dr.Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Transportation and Traffic Management, Don State Technical University (162 Sotsialisticheskaya Str., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), abeskopylnii@donstu.ru

Claimed contributorship:

All authors have made an equal contribution to conducting the research and preparing the manuscript.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 18.01.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 04.02.2026

Принята к публикации / Accepted 14.02.2026