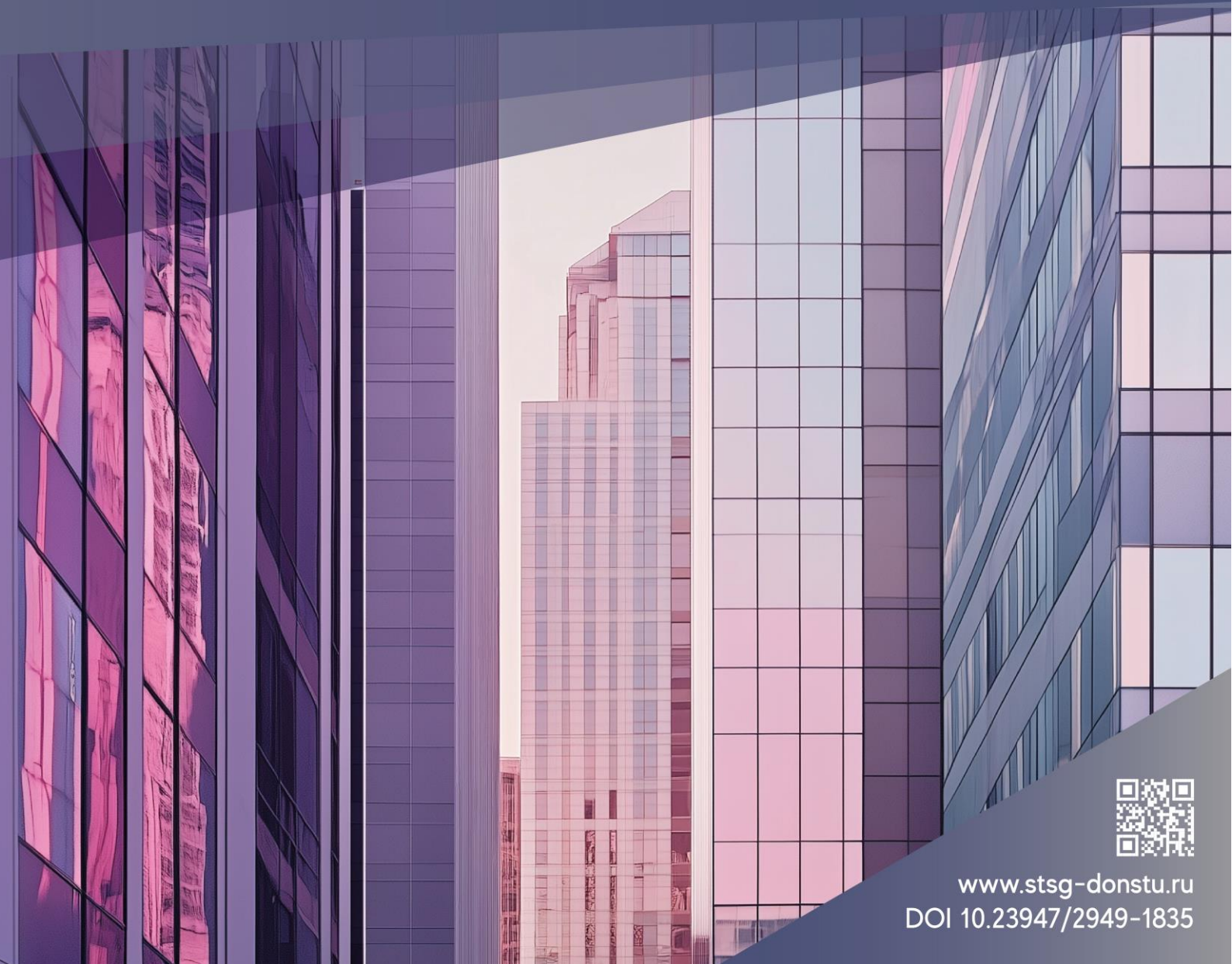
ТОМ 4, №2, 2025 eISSN 2949-1835
РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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



www.stsg-donstu.ru
DOI 10.23947/2949-1835

ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

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 4, № 2, 2025

Журнал создан в целях информирования читательской аудитории о новейших достижениях, тенденциях и перспективах в области строительства, архитектуры, градостроительства и смежных научных направлений. Издание является платформой для научно-образовательного сотрудничества российских и иностранных исследователей, вовлеченных в строительную сферу.

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) 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)

Индексация и архивация	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, Internet Archive
Наименование органа, зарегистрировавшего издание	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
Учредитель и издатель	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)
Периодичность	4 выпуска в год
Адрес учредителя и издателя	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
E-mail	sovtrendstr@gmail.com
Телефон	+7 (863) 2–738–372
Сайт	http://www.stsg-donstu.ru/
Дата выхода в свет	30.06.2025

© Донской государственный технический университет, 2025

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. 4, no. 2, 2025

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)

Indexing and Archiving	RISC, CyberLeninka, CrossRef, Internet Archive
Name of the Body that Registered the Publication	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
Founder and Publisher	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Technical University (DSTU)
Periodicity	4 issues per year
Address of the Founder and Publisher	1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation
E-mail	sovtrendstr@gmail.com
Telephone	+7 (863) 2–738–372
Website	http://www.stsg-donstu.ru/
Date of Publication	30.06.2025

© Don State Technical University, 2025

Редакционная коллегия

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

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

Выпускающий редактор
Студенникова Светлана Геннадьевна, начальник отдела публикационной активности, 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);

Беккиев Мухтар Юсубович, доктор технических наук, профессор, директор Высокогорного 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);
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);
Котляр 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 (иностранный) член Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), первый проректор Таразского университета (Тараз, Казахстан);
Язьев 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);
Панасюк Леонид Николаевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);
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 Арисаткакесович, доктор архитектурных наук, доцент, член Палаты архитекторов Армении (Ереван, Республика Армения).

Editorial Board

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

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

Executive Editor
Svetlana S. Studennikova, Head of the Publication Activity Department, 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)

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)
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. Tolkynbaev, 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)
Leonid N. Panasyuk, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
Vadim I. Bespalov, 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

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Тамов М.М., Руденко О.В., Салиб М.И.Ф. Моделирование сопротивления поперечным силам балок из сверхвысокопрочного бетона инструментами статистического обучения 7

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 21

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Мохамед Абдельхамид Эльсаед Мохамед, Прокопов А.Ю. Расчет железобетонного каркаса на сейсмические нагрузки с учетом взаимодействия системы «грунт-свая-конструкция» в нелинейной постановке 38

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Шляхова Е.А., Егорочкина И.О. Оптимизация технологии производства сборного железобетона 49

Касторных Л.И., Каклюгин А.В., Холодняк М.Г., Кузьменко Д.В. Исследование факторов, влияющих на эффективность мелкозернистого самоуплотняющегося бетона с песком из дроблёного бетона 57

Эдилян С.В., Явруян Х.С. Метод оценки плотности бетонной смеси в процессе формования 67

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

Крюков К.М. Оценка преимуществ и проблем внедрения 4D-моделирования в строительстве 75

Чжан Хаожань, Шеина С.Г., Белаш В.В. Пути устойчивого развития для городской эко-архитектуры .. 85

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Жолобова Е.А., Жолобов А.Л., Иванникова Н.А. Ресурсосберегающая технология демонтажа несущего настила покрытий из железобетонных ребристых плит при реконструкции и сносе зданий 96

Манжилевская С.Е. Применение моделей машинного обучения в процесс организации строительной площадки 106

ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО, ПЛАНИРОВКА СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

Шеина С. Г., Балашев Р. В., Шахиев Р. Д., Шисяо У Стандарты зеленых крыш в объектах строительства 117

CONTENTS

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES

Tamov MM, Rudenko OV, Salib MIF. Modeling of Shear Strength of Ultra-High-Performance Concrete Beams Using Statistical Learning Tools 7

Mazhiev HN, Mazhiev KH, Panasenko YuV, Mazhieva AH, Mazhiev AH, Mazhiev AH. Evaluation of the Reliability of Design Solutions during the Reconstruction of a Cultural Heritage Site Taking into Account Seismic Impacts 21

FOUNDATIONS AND UNDERGROUND STRUCTURES

Mohamed AEM, Prokopov AYu. Performance-Based Plastic Design of a Reinforced Concrete Frame for Seismic Loads Considering the Soil-Pile-Structure Interaction 38

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Shlyakhova EA, Egorochkina IO. Optimization of Precast Concrete Production Technology 49

Kastornykh LI, Kaklyugin AV, Kholodnyak MG, Kuzmenko DV. Investigation of Factors Influencing the Effectiveness of Fine-Grained Self-Compacting Concrete with Crushed Concrete Sand 57

Edilyan SV, Yavruyan HS. Method for Assessing the Density of a Concrete Mix during Molding 67

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES

Kryukov KM. Assessing the Benefits and Challenges of Implementing 4D Modeling in Construction 75

Zhang Haoran, Sheina SG, Belash VV. Sustainable Development Paths for Urban Eco-Architecture..... 85

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

Zholobova EA, Zholobov AL, Ivannikova NA. Resource-Saving Technology for Dismantling the Supporting Decking of Reinforced Concrete Ribbed Slabs during Reconstruction and Demolition of Buildings 96

Manzhilevskaya SE. Implementation of Machine Learning Models in the Construction Site Organization Process 106

URBAN PLANNING, PLANNING OF RURAL SETTLEMENTS

Sheina SG, Balashev RV, Shakhiev RD, Shixiao U. Standards of Green Roofs in Construction Projects 117

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES

CC BY

Check for updates

УДК 69.07
https://doi.org/10.23947/2949–1835-2025-4-2-7-20

Оригинальное эмпирическое исследование

Моделирование сопротивления поперечным силам балок из сверхвысокопрочного бетона инструментами статистического обучения

М.М. Тамов[1] ✉, **О.В. Руденко**[2], **М.И.Ф. Салиб**[1]

[1]Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Российская Федерация
[2] Кубанский государственный университет, г. Краснодар, Российская Федерация
✉ murat.tamov@gmail.com

EDN: RSCKOZ

Аннотация

Введение. Сверхвысокопрочный бетон (СВПБ) сочетает в себе высокую прочность и трещиностойкость, низкую проницаемость, что делает его эффективным для конструкций, эксплуатируемых в условиях действия агрессивных сред и высоких нагрузок. Расширение практики применения СВПБ в строительстве требует разработки соответствующих научно обоснованных методов расчета изготовленных с его применением конструкций. Одним из малоизученных вопросов является сопротивление изгибаемых СВПБ-конструкций действию поперечных сил. В настоящей работе предложены расчетные зависимости для определения прочности наклонных сечений двутавровых балок из СВПБ, разработанные с применением методов машинного обучения. Для регрессий составлены и структурированы обширные экспериментальные выборки с широкими диапазонами параметров, оказывающих влияние на сопротивление поперечным силам.

Материалы и методы. При построении моделей использованы искусственные нейронные сети (ИНС) и методы регрессионного анализа. Для решения задач использован инструментарий программы STATISTICA.

Результаты исследования. Разработаны нелинейные зависимости для инженерных расчетов, позволяющие производить расчет сопротивления СВПБ-балок поперечным силам с учетом влияния пролета среза нагружения и конструктивных параметров, включая геометрию сечения, прочностные характеристики СВПБ, а также коэффициенты фибрового и поперечного стержневого армирования. Результаты подтверждают применимость регрессионных моделей и ИНС для расчетов прочности наклонных сечений СВПБ-балок, как для сложно формализуемой задачи. Достоверность полученных моделей подтверждена статистическим анализом, включая проверку адекватности уравнений регрессии и их сравнение с нормативными методиками расчета.

Обсуждение и заключение. Предложенные формулы позволяют снизить расхождение между теоретическими и экспериментальными данными в сравнении с нормативными методиками до 2,4 раза. Формулы применимы как для расчета балок с неармированными наклонными сечениями, так и для балок с фибровым и поперечным стержневым армированием.

Ключевые слова: сверхвысокопрочный бетон, двутавровые балки, регрессионный анализ, искусственные нейронные сети, поперечные силы

Для цитирования. Тамов М.М., Руденко О.В., Салиб М.И.Ф. Моделирование сопротивления поперечным силам балок из сверхвысокопрочного бетона инструментами статистического обучения. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(2):7–20. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-7-20

© Тамов М.М., Руденко О.В., Салиб М.И.Ф., 2025

Original Empirical Research

Modeling of Shear Strength of Ultra-High-Performance Concrete Beams Using Statistical Learning Tools

Murat M. Tamov[1] ✉, **Olga V. Rudenko**[2], **Mina I.F. Salib**[1]

[1] Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

[2] Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation

✉ murat.tamov@gmail.com

Introduction. Ultra-high-performance concrete (UHPC) combines high strength and crack resistance with low permeability, making it ideal for structures operating under aggressive environmental conditions and high loads. The growing use of UHPC in construction makes necessary the development of scientifically grounded methods for designing structures made with this material. The aim of this study is to develop engineering methods for calculating the shear strength of UHPC I-beams using statistical learning techniques. The models were based on extensive datasets, including both the authors' own experimental results and data from other researchers.

Materials and Methods. Artificial neural networks (ANNs) and regression analysis methods were used to develop the models. The tasks were implemented using the STATISTICA software package.

Results. Nonlinear expressions were developed for engineering calculations, allowing for the determination of the shear strength of UHPC-beams accounting for the shear span and structural parameters, including section geometry, UHPC strength characteristics, and fiber and shear reinforcement ratios. The proposed formulas reduce the discrepancy between theoretical and experimental data by up to 2.4 times compared to calculation by methods adopted in codes. The formulas are applicable to beams unreinforced in shear as well as those with fiber and shear reinforcement.

Discussion and Conclusion. The results confirm the applicability of regression models and ANNs for calculating the shear strength of UHPC beams, particularly in cases where traditional analytical solutions are difficult to formalize. The reliability of the developed models is supported by statistical analysis, including verification of regression equation adequacy and comparison with existing code-based methods.

Keywords: ultra-high-performance concrete, I-beams, regression analysis, artificial neural networks, shear force

For citation. Tamov MM, Rudenko OV, Salib MIF. Modeling of Shear Strength of Ultra-High-Performance Concrete Beams Using Statistical Learning Tools, *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2025;4(2):7–20. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-7-20

Введение Сверхвысокопрочные бетоны (далее — СВПБ) с дисперсным (фибровым) армированием — это относительно новый класс бетонов, характеризующийся высокой прочностью и выносливостью, долговечностью и морозостойкостью. По аналогии с другими видами мелкозернистых бетонов одной из областей рационального применения СВПБ являются конструкции с малыми толщинами профиля поперечного сечения. Примером изгибаемых конструкций такого рода являются двутавровые балки пролетных строений и конструкций настилов сооружений, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивных сред.

Совершенствование подходов к расчету на поперечные силы СВПБ-балок главным образом сосредоточено в двух направлениях: построение конечно-элементных моделей с использованием нелинейных диаграмм деформирования СВПБ и арматуры и уточнение формул для инженерных расчетов прочности балок. В качестве примера существующих нормативных методик расчета изгибаемых СВПБ-конструкций на поперечные силы можно привести формулы руководства NF P18-710. По аналогии с Еврокодом 2 в основе формул NF P18-710 лежит метод ферменной аналогии. При этом методика Еврокода 2 предполагает, что вся поперечная сила в элементах с поперечной арматурой воспринимается только хомутами (сопротивление бетона учитывают только в элементах без поперечной арматуры). В свою очередь, в NF P18-710 сопротивление (вклад) бетона назначают как для элементов с поперечной арматурой, так и без нее. Отдельным слагаемым учитывают вклад фибр. Несколько отличается от Еврокода 2 также и подход NF P18-710 к расчету прочности тонких стенок. Так, Еврокодом 2 этот расчет предусмотрен только для элементов с поперечной арматурой, тогда как NF P18-710 содержит расчетные формулы как для элементов с поперечной арматурой, так и без нее.

Методика расчета на поперечные силы СП 360.1325800 «Конструкции сталефибробетонные» повторяет методику свода правил СП 63.13330 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» с заменой прочностных характеристик обычного бетона аналогичными характеристиками сталефибробетона — в формуле для прочности стенок вместо R_b принято R_{fb}, а в формуле для расчета по наклонным сечениям — вместо R_{bt} ис-

пользуют R_{fbt}. Сопротивление R_{fbt} соответствует вершине диаграммы деформирования сталефибробетона при осевом растяжении.

Недостатком нормативных методик является неполный учет факторов, влияющих на сопротивление балок поперечным силам. Это обуславливает необходимость разработки альтернативных подходов, основанных на анализе экспериментальных данных и применении современных вычислительных технологий.

Целью настоящей работы являлось получение инженерных методик расчета сопротивления поперечным силам двутавровых СВПБ-балок с использованием инструментов статистического обучения — нейросетевого и регрессионного анализа. В качестве обучающих и тестовых выборок моделей приняты репрезентативные базы данных, включающие как собственные испытания авторов, так и опыты других исследователей.

Материалы и методы. В строительной науке известно немало задач, не поддающихся решению традиционными вычислительными методами. В таких случаях ускоренный поиск новых решений возможен при помощи технологий управления данными, задействующими большой накопленный объем результатов натурных и численных экспериментов. В литературе по материаловедению этот этап развития науки называют ее «четвертой парадигмой» [1].

В последние годы для расчета конструкций в качестве подхода, альтернативного классическим методам моделирования, активно применяют технологии искусственного интеллекта [2], определяемого как способность компьютера симулировать разумные действия человека, осуществляя поиск алгоритмов при решении сложных задач. Важной частью искусственного интеллекта является машинное обучение, применяемое для исследования трендов и нацеленное на прогнозирование путем разработки алгоритмов для расчетов на основании задействованных при обучении данных [3]. Известна способность машинного обучения улавливать нелинейные зависимости между входными и выходными данными, математическая формулировка которых является затруднительной. Машинное обучение нашло применение в вопросах обследования и мониторинга строительных конструкций, оптимизации, оценки надежности и прогнозирования свойств материалов [4].

Искусственные нейронные сети (ИНС) — вычислительные модели, имитирующие биологические нейронные структуры. Их базовые элементы (нейроны) обрабатывают информацию, динамически реагируя на входные сигналы. Ключевая особенность таких сетей — адаптивность: в отличие от классических алгоритмов, работающих по жестким правилам, ИНС обучаются на большом количестве данных, корректируя параметры связей. Основу ИНС составляют взвешенные соединения между нейронами, формирующие архитектуру с одним или несколькими слоями. В процессе обучения система итерационно оптимизирует весовые коэффициенты, определяющие силу взаимодействия элементов. Для задач прогнозирования и регрессии часто применяют однослойные ИНС как простейший тип архитектуры с прямыми связями [5, 6].

Анализ взаимосвязей между процессами и факторами требует применения специализированных математических методов. Среди них широкое распространение получил *регрессионный анализ*, позволяющий количественно оценить влияние независимых переменных (факторов-предикторов) на исследуемую зависимую величину (результирующий отклик).

Данный метод дает возможность:

– определить степень воздействия каждого фактора на конечный результат;

– выявить тесноту корреляционных связей между анализируемыми параметрами;

– построить прогностические модели на основе установленных зависимостей.

В настоящей работе ИНС и регрессионный анализ использованы для получения расчетных формул для вычисления сопротивления поперечным силам двутавровых балок из сверхвысокопрочного бетона и фибробетона. Для решения задач задействован инструментарий программы STATISTICA.

Результаты исследования. С учетом принятой в нормах структуры формул для прочности наклонных сечений регрессионный анализ, направленный на разработку инженерной методики расчета двутавровых СВПБ-балок, выполнен в два этапа. На первом этапе получена регрессионная модель прочности балок без фибрового и стержневого поперечного армирования вида

$$Q = Q_b = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6), \quad (1)$$

где x_1 (a/h_0), x_2 (b_w), x_3 (h_0), x_4 (R), x_5 (μ_s), x_6 (φ_f) — фактор-аргументы; a/h_0 — пролет среза; b_w и h_0 — толщина стенки и рабочая высота сечения; R — прочность бетона; μ_s — коэффициент продольного армирования.

$$\varphi_f = \frac{(b_f - b_w)\cdot t_f}{b_w \cdot h_0},$$

где b_f, t_f — ширина и толщина полки.

Базой данных для первого этапа послужила выборка по представленным в литературных источниках результатам испытаний на поперечную силу прямоугольных и двутавровых балок из высокопрочного и сверхвысокопрочного бетонов без фибрового и поперечного стержневого армирования [7–41].

На втором этапе несущая способность балок, армированных фибрами и не имеющих стержневого поперечного армирования, принята равной:

$$Q = Q_b + Q_f,$$

после чего определена формула для вклада фибр Q_f подбором параметров регрессионной модели вида

$$Q = y + f(x_1, x_2, x_3, x_4),$$

где y — вклад бетона Q_b по формуле (1); x_1 (b_w), x_2 (h_0), x_3 (R_{bt}), x_4 (μ_s).

База данных для второго этапа составлена по результатам наших и чужих испытаний на поперечную силу тавровых и двутавровых СВПБ-балок, армированных фибрами, но не имеющих поперечной арматуры [7, 13, 36, 37, 39, 42–49].

На обоих этапах для получения регрессионных зависимостей установлен порядок:

1. Выбор функциональной формы.
2. Оценка параметров модели.
3. Проверка адекватности модели.

Выбор функциональной формы для Q_b осуществлен визуальным анализом, полезным при первичной оценке данных, выявлении общих паттернов и трендов. Так как возможным является построение только трехмерных графиков (поверхностей), то для визуального анализа зависимости их потребуется несколько. Из рассмотрения этих поверхностей (рис. 1) следует, что уравнение зависимости переменной y от x_1, x_2, x_3 и x_4 должно иметь сложную нелинейную форму.

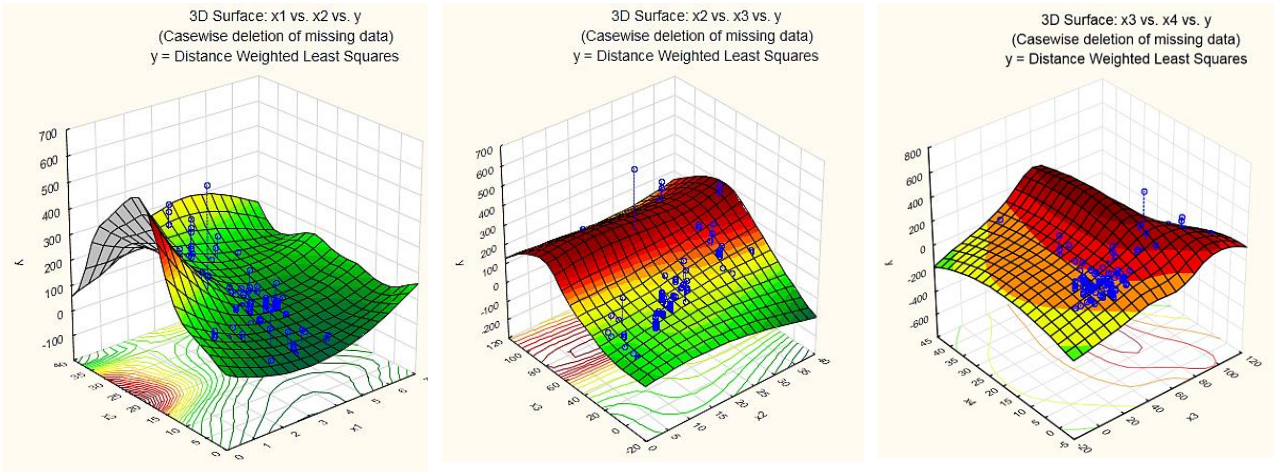


Рис. 1. Трехмерные графики (поверхности) зависимости y от x_1, x_2, x_3 и x_4

Для визуализации описательных статистик экспериментальных данных построены так называемые «ящичковые диаграммы» (рис. 2), с помощью которых данные можно оценить на предмет структуры распределения, наличия выбросов, однородности наблюдений и т. д. Как видно, переменные x_1, x_5 и x_6 тесно расположены около своего среднего значения. Переменные x_2, x_3, x_4 и y имеют симметричное распределение. Зависимая переменная y имеет наибольший разброс.

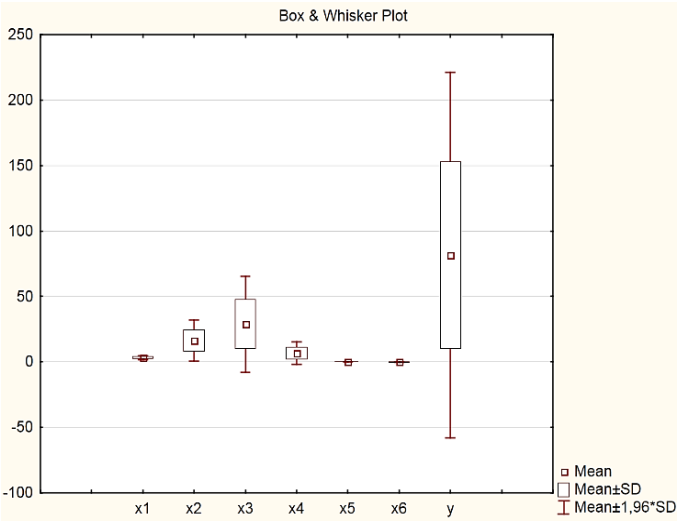


Рис. 2. «Ящичковые» диаграммы

https://www.stsg-donstu.ru

Для исключения явления мультиколлинеарности переменных составлена матрица парных коэффициентов корреляции (рис. 3). Считается, что наличие значений коэффициентов корреляции, по абсолютной величине превосходящих 0,75–0,80, свидетельствует о присутствии мультиколлинеарности между переменными. Чтобы избавиться от мультиколлинеарности, эти факторы необходимо из модели исключить.

Color map of correlations (Spreadsheet1)
N=217 (Casewise deletion of missing data)

r>=	-1	-0,80	-0,60	-0,40	-0,20	0	0,20	0,40	0,60	0,80	1

Variable	x1	x2	x3	x4	x5	x6	y
x1	1,000000	0,115219	-0,010061	-0,062375	-0,007534	-0,015013	-0,185571
x2	0,115219	1,000000	0,595526	-0,099337	-0,088854	-0,304818	0,655836
x3	-0,010061	0,595526	1,000000	-0,015954	-0,089723	-0,014764	0,716017
x4	-0,062375	-0,099337	-0,015954	1,000000	0,235650	0,420090	0,141043
x5	-0,007534	-0,088854	-0,089723	0,235650	1,000000	0,158945	0,212631
x6	-0,015013	-0,304818	-0,014764	0,420090	0,158945	1,000000	-0,069764
y	-0,185571	0,655836	0,716017	0,141043	0,212631	-0,069764	1,000000

Рис. 3. Диаграмма корреляций

В нашем случае есть подозрение на мультиколлинеарность между переменными x_2 и x_3. Для проверки использован метод анализа чувствительности входных переменных при построении модели нейронной сети — процесс оценки влияния входных переменных (признаков) на выход модели, то есть на результат прогнозирования или классификации. Этот анализ позволяет оценить, как изменения входных данных или параметров модели сказываются на выходе нейронной сети, и помогает понять, какие признаки наиболее важны для модели, а какие могут быть исключены (рис. 4).

Sensitivity analysis (Spreadsheet1)
Samples: Train

Networks	x3	x2	x5	x1	x4	x6
5.MLP 6-3-1	4,656816	3,938443	3,029732	1,856225	1,091346	1,005235

Рис. 4. Анализ чувствительности *y*

При построении модели нейронной сети все входные переменные получили значения чувствительности больше 1. Это значит, что в нашем уравнении регрессии следует сохранить все 6 входных переменных.

Определение коэффициентов модели Q_b проводилось с использованием метода наименьших квадратов (МНК), который предполагает соблюдение ряда статистических предпосылок. Важнейшим из таких условий выступает гомоскедастичность — постоянство дисперсии случайных ошибок модели. Нарушение этого требования (гетероскедастичность) приводит к следующим последствиям: становится некорректным применение *t*-критерия Стьюдента и *F*-критерия Фишера. Таким образом, при наличии гетероскедастичности результаты регрессионного анализа нельзя считать статистически достоверными.

В пакете STATISTICA использован графический анализ для выявления гетероскедастичности. Для этого построен график, где по оси абсцисс отложены значения переменной *y*, а по оси ординат — ее отклонения (рис. 5). Как видно, значения распределены случайным образом (выходят за доверительные границы), поэтому можно предположить отсутствие гетероскедастичности.

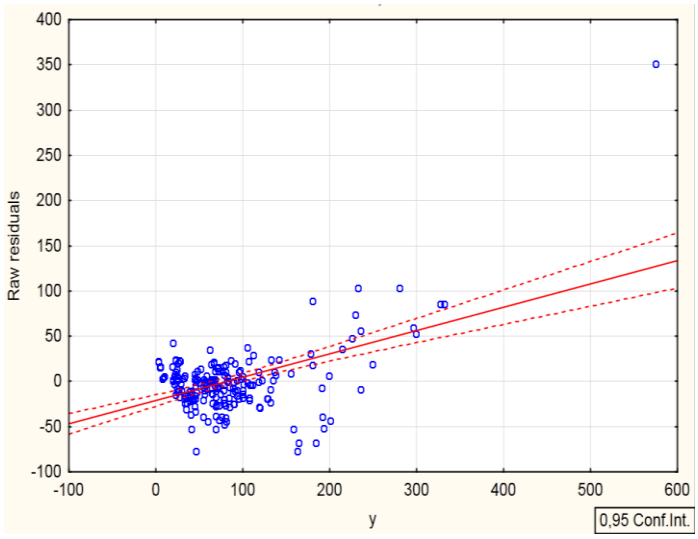


Рис. 5. График зависимости остатков от переменной *y*

Таким образом, расчет параметров нелинейного уравнения регрессии можно вычислять с помощью МНК. Для этого использован блок пользовательской регрессии программы STATISTICA, который позволяет вводить произвольный вид уравнения. За основу взята сложная нелинейная модель вида

$$y = a_0 {x_1}^{m1} x_2 x_3 {x_4}^{m2} {x_5}^{m3} (1 + a_1 x_6)\left(1 + a_2 \frac{1}{\sqrt{x_3}}\right). \quad (2)$$

Результат работы по оценке параметров a_0, a_1, a_2, m_1, m_2 и m_3 функции (2) в программе STATISTICA приведен на рис. 6. В первой колонке таблицы приведены оценки параметров регрессии, позволяющие записать аналитическое представление уравнения:

$$y = 1{,}466 {x_1}^{-1{,}14} x_2 x_3 {x_4}^{0{,}2} {x_5}^{0{,}6} (1 + 1{,}6 x_6)\left(1 + 9{,}4 \frac{1}{\sqrt{x_3}}\right). \quad (3)$$

Колонка 3 содержит расчетные значения t-статистики, количественно оценивающей значимость влияния предикторов на зависимую переменную. Данный показатель рассчитывается как отношение:

t = (оценка коэффициента)/(стандартная ошибка коэффициента).

Величина показателя отражает число стандартных отклонений, на которые оценка коэффициента отстоит от нуля. Эмпирически установлено, что коэффициенты с t-значениями за пределами [–2;2] обладают достаточной надежностью для использования в прогнозных моделях. При этом чем выше абсолютное значение статистики, тем меньше вероятность ошибочного признания коэффициента значимым и стабильнее прогнозы модели.

В четвертой колонке даны p-значения — наименьшие уровни значимости (вероятности отказа от справедливой гипотезы), для которых вычисленная проверочная статистика ведет к отказу от нулевой гипотезы. Для этого p-значение сравнивают с общепринятыми стандартными уровнями значимости 0,05 или 0,01.

Model is: v7=a0*v1^m1*v2*v3*v4^m2*v5^m3*(1+a1*v6)*(1+a2*v3^(-0.5)) (Spreadsheet105)
Dep. Var. : Q_b
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)

	Estimate	Standard error	t-value df = 211	p-value	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	1.46615	0.348623	4.2055	0.000038	0.77892	2.15338
m1	-1.13779	0.059233	-19.2086	0.000000	-1.25455	-1.02102
m2	0.19068	0.032669	5.8366	0.000000	0.12628	0.25508
m3	0.59965	0.030337	19.7659	0.000000	0.53984	0.65945
a1	1.60835	0.350377	4.5903	0.000008	0.91766	2.29904
a2	9.37469	2.217515	4.2276	0.000035	5.00337	13.74602

Results: Spreadsheet105

```
Model is: v7=a0*v1^m1*v2*v3*v4^m2*v5^m3*(1+a1*v6)*(1+a2*v3^(-0.5))
Dependent variable: Qb                  Independent variables: 6
Loss function: least squares
Final value: 107391.0904578
Proportion of variance accounted for: .90184442    R =.9496549
```

Рис. 6. Результат расчета параметров уравнения регрессии Q_b

По приведенным на рис. 6 величинам вышеописанных параметров и высоким значениям показателя множественной корреляции ($R \approx 0{,}95$) можно утверждать о статистической значимости параметров уравнения (3).

Адекватность модели тесно связана с выполнением основных исходных предпосылок относительно регрессионных остатков ε_i, к которым относится независимость и отсутствие автокорреляции остатков, а также их нормальное распределение. Если выбранная регрессионная модель хорошо описывает истинную зависимость, то остатки должны быть независимыми, нормально распределенными случайными величинами с нулевым средним. На диаграмме распределения остатков (рис. 7 *а*) точки лежат вдоль прямой — распределение остатков является нормальным. На диаграмме рассеяния (рис. 7 *б*) точки располагаются близко к прямой, проведенной под углом 45 º к осям координат. Это указывает на близость отклика к наблюдаемым значениям.

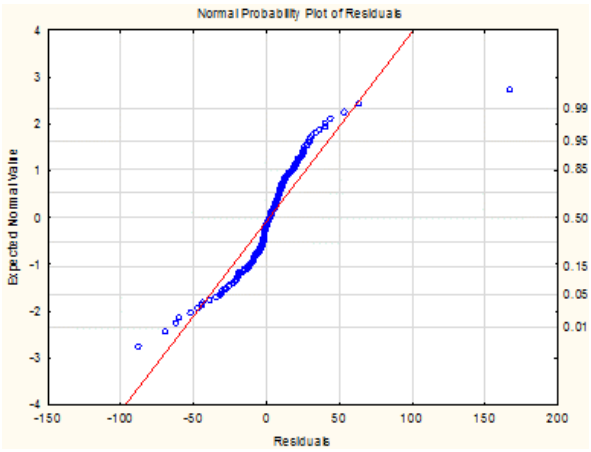
На *втором этапе* регрессионного анализа построена зависимость для прочности СВПБ-балок с фибровым армированием, не имеющим стержневой поперечной арматуры. Общий вид функции:

$$Q = Q_b + Q_f.$$

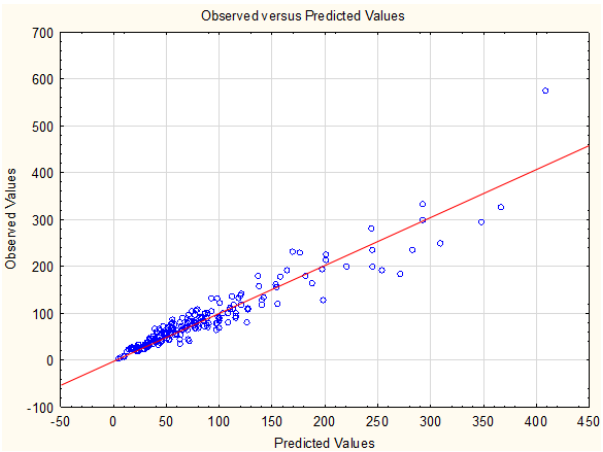
Подставив вместо Q_b величину y, рассчитываемую по (3), и заменив вклад фибр функцией от x_1 (b_w), x_2 (h_0), x_3 (R_{bt}), x_4 (μ_s), получим:

$$Q = y + f(x_1, x_2, x_3, x_4). \quad (4)$$

https://www.stsg-donstu.ru



а)



б)

Рис. 7. Диаграммы распределения: *а* — остатков; *б* — рассеяния

Для расчета основных статик всех факторов модели построена матрица парных корреляций (рис. 8). Выявлено, что аргументы x_2 и y имеют очень высокую парную корреляцию (больше 0,7).

Correlations (Spreadsheet1)
Marked correlations are significant at p < ,05000
N=56 (Casewise deletion of missing data)

Variable	**Means**	Std.Dev.	x1	x2	x3	x4	y	Q
x1	4,4821	0,9861	1,000000	0,031394	0,216939	-0,508297	0,166597	0,276947
x2	37,6357	18,9912	0,031394	1,000000	0,616026	-0,203521	0,831776	0,783928
x3	1,3526	0,5999	0,216939	0,616026	1,000000	-0,573725	0,597728	0,635939
x4	0,0394	0,0187	-0,508297	-0,203521	-0,573725	1,000000	-0,253158	-0,160484
y	98,9823	53,7237	0,166597	0,831776	0,597728	-0,253158	1,000000	0,834242
Q	279,6782	183,3429	0,276947	0,783928	0,635939	-0,160484	0,834242	1,000000

Рис. 8. Матрица парных корреляций

Анализ парных корреляционных коэффициентов позволяет выявить только явные случаи линейной взаимосвязи между предикторами. Однако основные проблемы при построении множественных регрессионных моделей возникают при наличии мультиколлинеарности — ситуации, когда наблюдается системная линейная зависимость между несколькими факторами одновременно. Для количественной оценки степени мультиколлинеарности применяется анализ определителя корреляционной матрицы факторов. Чем ближе значение определителя к нулю, тем выше степень линейной зависимости между переменными и сильнее выражена проблема мультиколлинеарности, а также менее надежны получаемые оценки параметров модели (рис. 9).

$$R := \begin{pmatrix} 1 & 0.031394 & 0.216939 & -0.508297 & 0.166597 & 0.276947 \\ 0.031394 & 1 & 0.616026 & -0.203521 & 0.831776 & 0.783928 \\ 0.216939 & 0.616026 & 1 & -0.573725 & 0.597728 & 0.635939 \\ -0.508297 & -0.203521 & -0.573725 & 1 & -0.253158 & -0.160484 \\ 0.166597 & 0.831776 & 0.597728 & -0.253158 & 1 & 0.834242 \\ 0.276947 & 0.783928 & 0.635939 & -0.160484 & 0.834242 & 1 \end{pmatrix}$$

$$detR := |R| \qquad detR = 0.014$$

Рис. 9. Расчет определителя матрицы парных коэффициентов корреляции

Близость к нулю определителя матрицы парных коэффициентов корреляции ($detR = 0{,}014$) означает наличие мультиколлинеарности между аргументами. Одним из путей учета внутренней корреляции факторов является переход к совме-

щенным уравнениям регрессии, т. е. к уравнениям, которые отражают не только влияние факторов, но и их взаимодействие. Поэтому включим в модель совмещение наших фактор-аргументов $Q = y + f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4)$ в первой степени, и спецификация вновь будет представлять сложную нелинейную зависимость. Нелинейный характер взаимосвязи модели подтверждается формами построенных трехмерных поверхностей зависимости переменной Q от своих аргументов (рис. 10).

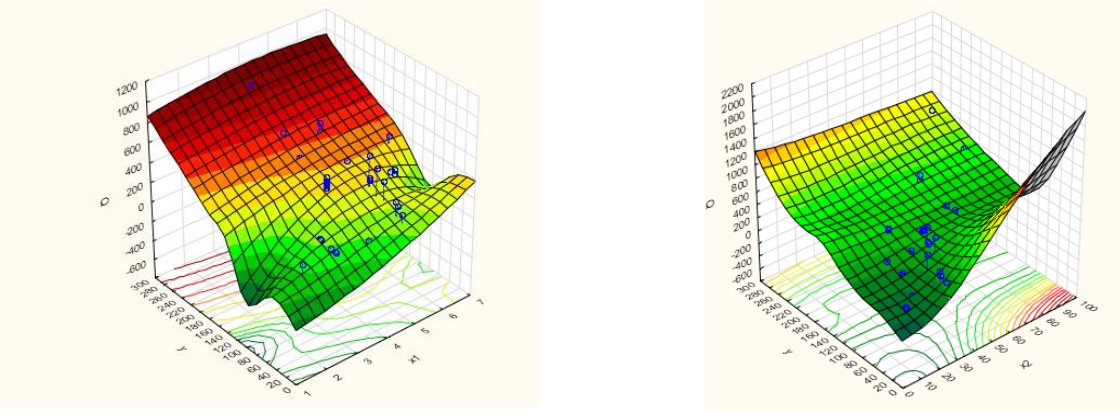


Рис. 10. Трехмерные графики (поверхности) зависимости Q от x_1 и x_2

Анализ чувствительности (рис. 11) указывает на необходимость участия в регрессии всех переменных, при этом наибольший вклад ожидаемо будет вносить переменная y (вклад бетона Q_b).

	Sensitivity analysis (Spreadsheet1) Samples: Train				
Networks	y	x2	x4	x3	x1
1.MLP 5-4-1	106,7567	30,73866	8,477698	8,374472	2,453012

Рис. 11. Анализ чувствительности Q

В результате проведенных исследований было решено использовать в качестве спецификации модели зависимость:

$$Q = y + a_0 x_1 x_2 {x_3}^{m3} {x_4}^{m4} \left(1 + 2\frac{1}{\sqrt{x_2}}\right). \quad (5)$$

Результаты *оценки параметров* регрессии в программе STATISTICA приведены на рис. 12.

Model is: v6=v5+a0*v1*v2*v3^m1*v4^m2*(1+2*v2^(-0.5)) (Spreadsheet108)
Dep. Var. : Q
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)

	Estimate	Standard error	t-value df = 53	p-value	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	5.458100	2.014278	2.709706	0.009052	1.417971	9.498230
m1	0.948995	0.205740	4.612603	0.000026	0.536334	1.361656
m2	0.646525	0.127836	5.057442	0.000005	0.390117	0.902932

Results: Spreadsheet108 ?

```
Model is: v6=v5+a0*v1*v2*v3^m1*v4^m2*(1+2*v2^(-0.5))
Dependent variable: Q                    Independent variables: 5
Loss function: least squares
Final value: 322009.0360973
Proportion of variance accounted for: .82582846     R =.90875105
```

Рис. 12. Результат расчета параметров уравнения регрессии Q

После подстановки значения параметров в (5) получен следующий общий вид уравнения:

$$Q = y + 5{,}46 x_1 x_2 {x_3}^{0{,}95} {x_4}^{0{,}65} \left(1 + 2\frac{1}{\sqrt{x_2}}\right).$$

Величины t-значения и p-значения указывают на хороший подбор уравнения регрессии и статистическую значимость его коэффициентов (рис. 13). Показатель множественной корреляции $R = 0{,}91$ высоко оценивает тесноту совместного влияния факторов на результат.

https://www.stsg-donstu.ru

Model is: v6=v5+a0*v1*v2*v3^m3*v4^m4*(1+2*v2^(-0,5)) (Spreadsheet1)
Dep. Var. : Q

Effect	1 Sum of Squares	2 DF	3 Mean Squares	4 F-value	5 p-value
Regression	5907108	3,00000	1969036	324,0869	0,00
Residual	322009	53,00000	6076		
Total	6229117	56,00000			
Corrected Total	1848804	55,00000			
Regression vs.Corrected Total	5907108	3,00000	1969036	58,5768	0,00

Рис. 13. Результаты многомерного дисперсионного анализа

В четвертом столбце (рис. 13) приведена *F*-статистика Фишера, служащая для *проверки модели на адекватность*. В пятом столбце *(p)* приведена значимость *F*-статистики Фишера – критическое значение квантиля распределения Фишера, на котором отвергается нулевая гипотеза отсутствия влияния фактора. Поэтому признаётся статистическая значимость уравнения регрессии, т. е. связь между рассматриваемыми признаками есть, и результаты наблюдений не противоречат предположению о её спецификации. Нормальный вероятностный график (рис. 14) подтверждает нормальное распределение остатков регрессионной модели.

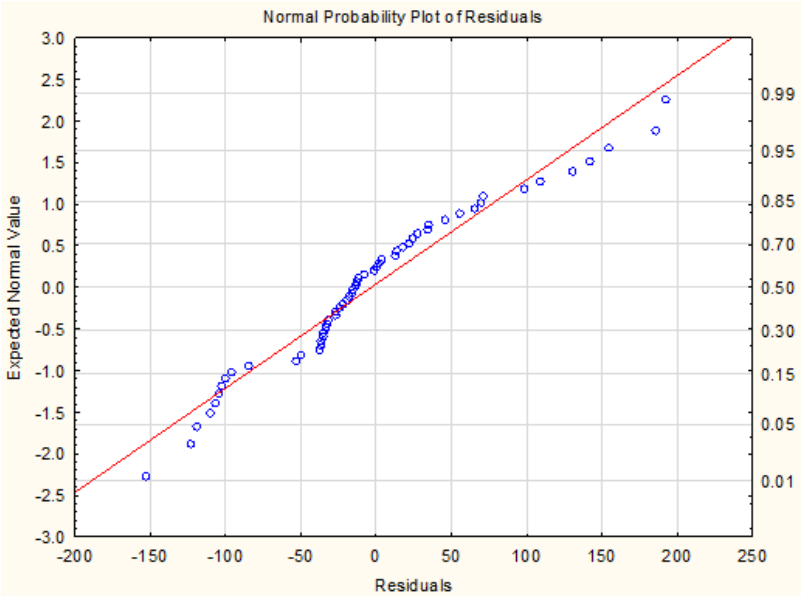


Рис. 14. Диаграммы распределения остатков

Наличие автокорреляции между аргументами модели мешает подтвердить правильность выбора спецификации. В этом случае необходимо провести сравнительный анализ между альтернативными вариантами регрессионной зависимости. Например, в качестве альтернативы можно взять уравнение (6) совместного влияния без учета фактора x_2:

$$Q = a_0 x_1^{m_1} x_3^{m_3} x_4^{m_4} y \qquad (6)$$

Рассчитанные параметры этой регрессии даны на рис. 15.

Model is: v6=a0*v1^m1*v3^m3*v4^m4*v5 (Spreadsheet1)
Dep. Var. : Q
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)

	Estimate	Standard error	t-value df = 52	p-value	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	3,640638	1,354431	2,687946	0,009635	0,922773	6,358504
m1	0,471554	0,205487	2,294819	0,025811	0,059215	0,883893
m3	0,428909	0,123765	3,465514	0,001069	0,180556	0,677261
m4	0,323869	0,089391	3,623062	0,000661	0,144493	0,503245

Рис. 15. Результат расчета параметров уравнения регрессии (6)

Классический коэффициент детерминации R^2, варьирующийся в диапазоне от 0 до 1, служит базовым показателем объясняющей способности модели. Однако этот показатель обладает существенным ограничением: его значение монотонно возрастает при добавлении любых регрессоров, даже статистически незначимых. Данный эффект обусловлен самой математической природой R^2, что делает его малопригодным для сравнения моделей с разным количеством предикторов и выбора оптимальной спецификации. Для преодоления этих недостатков были разработаны альтернативные подходы, такие как применение скорректированного R^2, который позволяет более объективно сравнивать модели разной размерности, но также охраняет ограничения исходного метода R^2, и информационные критерии Акаике (*AIC*) и байесовский критерий Шварца (*BIC*/*SC*). Критерий *AIC* менее строг к числу параметров и предпочтителен для небольших выборок, тогда как *BIC*/*SC* жестче штрафует за сложность модели, дает более точные оценки на больших данных и учитывает объем выборки в формуле штрафа. Поэтому оптимальной будет считаться спецификация с минимальным значением информационного критерия (*AIC* или *BIC*), что отражает компромисс между точностью описания данных и сложностью модели.

В таблице 1 выполнено сравнение информационных показателей выбранной спецификации модели (5) с (6) расчетными формулами СП 360.1325800, а также с формулами FIB Model code 2010 и RILEM TC 162-TDF. Как видно, все 4 метрики имеют наименьшее значение для выбранной спецификации (5).

Таблица 1

Показатели качества уравнения регрессии

Уравнение	MSE	MAPE	AIC	BIC
(5)	6110,08	26,78 %	500,19	657,57
(6)	7506,72	28 %	511,72	669,11
СП 360.1325800	30528,81	47 %	590,28	757,35
FIB Model code 2010	56070,45	57 %	624,32	811,49
RILEM TC 162-TDF	24092,38	42 %	577,02	750,69

Оценка точности предложенных методик расчета прочности двутавровых СВПБ-балок при действии поперечных сил выполнена сравнением теоретических и опытных значений разрушающих нагрузок по выборке данных, составленной по соответствующим опубликованным экспериментальным исследованиям [7, 13, 32, 36, 37, 42–50]. Значения разрушающих нагрузок определены следующим образом:

$$Q_{\text{рег}} = Q_{b,\text{рег}} + Q_{f,\text{рег}} + Q_{sw},$$

где $Q_{b,\text{рег}}$ и $Q_{f,\text{рег}}$ — вклады бетона и фибр по (3) и (4).

В таблицах 2–4 приведена сравнительная оценка точности по предложенной регрессии и нормативных методик расчета. При этом балки без фибрового армирования рассчитаны по формулам СП 63.13330, ACI 318M и Еврокода 2, а балки с фибровым армированием — по формулам СП 360.1325800, предназначенного для проектирования сталефибробетонных конструкций, и по формулам FIB Model code 2010 и RILEM TC 162-TDF по проектированию СВПБ-конструкций.

Таблица 2

Сравнение опытных Q_{exp} и теоретических Q_{calc} значений прочности СВПБ-балок без фибрового и поперечного стержневого армирования

Показатель	Методика расчета			
	Регрессия	СП 63.13330	ACI 318M	EC 2
Среднее отклонение в % $\left(\frac{Q_{exp}-Q_{calc}}{Q_{exp}}\right)\cdot 100$	17	40	29	21
Среднее значение отношения Q_{exp}/Q_{calc}	1,03	1,45	1,34	1,2
Коэффициент вариации отношения Q_{exp}/Q_{calc}	0,22	0,43	0,44	0,56

https://www.stsg-donstu.ru

Таблица 3

Сравнение опытных Q_{exp} и теоретических Q_{calc} значений прочности СВПБ-балок с фибрами и без поперечного стержневого армирования

Показатель	Методика расчета			
	Регрессия	СП 360.1325800	FIB Model code 2010	RILEM TC 162-TDF
Среднее отклонение в % $\left(\frac{Q_{exp}-Q_{calc}}{Q_{exp}}\right)\cdot 100$	26	47	57	42
Среднее значение отношения Q_{exp}/Q_{calc}	1	2,46	2,76	1,85
Коэффициент вариации отношения Q_{exp}/Q_{calc}	0,29	0,64	0,42	0,41

Таблица 4

Сравнение опытных Q_{exp} и теоретических Q_{calc} значений прочности СВПБ-балок *с фибровым и поперечным стержневым армированием*

Показатель	Методика расчета			
	Регрессия	СП 360.1325800	FIB Model code 2010	RILEM TC 162-TDF
Среднее отклонение в % $\left(\frac{Q_{exp}-Q_{calc}}{Q_{exp}}\right)\cdot 100$	28	37	39	39
Среднее значение отношения Q_{exp}/Q_{calc}	1,19	1,71	1,76	1,81
Коэффициент вариации отношения Q_{exp}/Q_{calc}	0,33	0,44	0,43	0,38

Наибольшая точность регрессионной модели достигается в отсутствии фибрового и поперечного стержневого армирования балок: средняя разница между опытным и теоретическими значениями в этом случае равна 17 %. При расчете балок с фибрами и хомутами погрешность ожидаемо возрастает, достигая 28 %. Как видно, при этом среднее значение отношения Q_{exp}/Q_{calc} составило 1,19, т. е. отклонение формируется в сторону запаса.

Обсуждение и заключение. Представленные полученными регрессионными моделями результаты демонстрируют возможность вычисления вклада бетона и фибр в сопротивление СВПБ-балок поперечным силам. Оценка качества и достоверности моделей подтверждена применением набора метрик и сопоставлением с альтернативными моделями. Расчет по разработанным регрессиям улучшает сходимость теоретических и опытных результатов по сравнению с формулами норм до 2,4 раз. Синтез статистических методов и инструментов искусственного интеллекта открывает перспективы для дальнейшего совершенствования методик расчета строительных конструкций, особенно в случаях сложно формализуемых задач, где построение традиционных аналитических решений затруднительно.

Список литературы/References

1. Agrawal A, Choudhary A Perspective: Materials Informatics and Big Data: Realization of the “Fourth Paradigm” of Science in Materials Science. *APL Materials*. 2016;4:1–10. https://doi.org/10.1063/1.4946894

2. Jasmine PH, Arun S Machine Learning Applications in Structural Engineering - a Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1114. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1114/1/012012

3. Salehi H Emerging Artificial Intelligence Methods in Structural Engineering. *Engineering Structures*. 2018;171:170–189. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.084

4. Falcone R, Lima C, Martinelli E Soft Computing Techniques in Structural and Earthquake Engineering: a Literature Review. *Engineering Structures*. 2020;207(4):1–16. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110269

5. Keshtegar B, Bagheri M, Yaseen ZM Shear Strength of Steel Fiber-Unconfined Reinforced Concrete Beam Simulation: Application of Novel Intelligent Model. *Composite Structures*. 2019;212:230–242. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.004

6. Hosseini Gh Capacity Prediction of RC Beams Strengthened with FRP by Artificial Neural Networks Based on Genetic Algorithm. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*. 2017;1(1):93–98. https://doi.org/10.22115/scce.2017.48392

7. Salib MIF, Tamov MM Strength of Inclined Sections (Shear Strength) of I-shaped Beams Made of Ultra-High-Performance Concrete. *Engineering Journal of Don*. 2024;109(1):369–381. http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8952 (accessed: 04.05.2025)

8. Adebar P, Collins MP Shear Strength of Members Without Transverse Reinforcement. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1996;23(1):30–41. https://doi.org/10.1139/l96-004

9. Ahmad SH, Khaloo AR Shear Capacity of Reinforced High-Strength Concrete Beams. *ACI Journal, Proceedings*. 1986;83(2):297–305.

10. Ahmad SH, Xie Y, Yu T Shear Strength of Reinforced Lightweight Concrete Beams of Normal and High Strength Concrete. *Magazine of Concrete Research*. 1994;46(166):57–66. https://doi.org/10.1680/macr.1994.46.166.57

11. Ahmad SH, Park F, El-Dash K Web Reinforcement Effects on Shear Capacity of Reinforced High-Strength Concrete Beams. *Magazine of Concrete Research*. 1995;47(172):227–233. https://doi.org/10.1680/macr.1995.47.172.227

12. Arowojolu O, Ibrahim A, Almakrab A, Saras N, Nielsen R Influence of Shear Span-to-Effective Depth Ratio on Behavior of High-Strength Reinforced Concrete Beams. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2021;15(1):1–12. https://doi.org/10.1186/s40069-020-00444-7

13. Baby F, Marchand P, Toutlemonde F Shear Behavior of Ultrahigh Performance Fiber-Reinforced Concrete Beams. I: Experimental Investigation. *Journal of Structural Engineering*. 2014;140(5):1–10. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000907

14. Bae B-I, Lee M-S, Choi C-S, Jung H-S, Choi H-K Evaluation of the Ultimate Strength of the Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Beams. *Applied Sciences*. 2021;11(7):1–17. https://doi.org/10.3390/app11072951

15. Bazant ZP, Kazemi MT Size Effect on Diagonal Shear Failure of Beams without Stirrups. *ACI Journal*. 1991;88(3):268–276. URL: http://www.civil.northwestern.edu/people/bazant/PDFs/Papers/273.pdf (accessed: 04.05.2025).

16. Bohigas AC *Shear Design of Reinforced High-Strength Concrete Beams*. University of the Balearic Islands; 2002. URL: https://www.researchgate.net/publication/263696608_Shear_design_of_reinforced_high-strength_concrete_beams (accessed: 04.05.2025).

17. Bui T, Nana WSA, Doucet-Ferru B, Bennani A, Lequay H, Limam A Shear Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams Without Stirrups: Experimental Investigation. *International Journal of Civil Engineering*. 2020;18(5):865–881. https://doi.org/10.1007/s40999-020-00505-8

18. Collins MP, Kuchma D How safe are our large, lightly reinforced concrete beams, slabs and footings? *ACI Structural Journal*. 1999;96(4):482–490.

19. Elzanaty AH, Nilson AH, Slate FO Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Using High-Strength Concrete. *ACI Journal*. 1986;83(2):290–296.

20. González-Fonteboa B *Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante.* Universidad de la Coruña; 2002. (in Spanish)

21. Hamrat M, Boulekbache B, Chemrouk M, Amziane S Shear Behaviour of RC Beams without Stirrups Made of Normal Strength and High Strength Concretes. *Advances in Structural Engineering*. 2010;13(1):29–41.

22. Hasgul U, Yavas A¸ Birol T, Turker K Steel Fiber Use as Shear Reinforcement on I-Shaped UHP-FRC Beams. *Applied Sciences*. 2019;9(24):1–17. https://doi.org/10.3390/app9245526

23. Islam MS, Pam HJ, Kwan AKH Shear Capacity of High-Strength Concrete Beams with their Point of Inflection within the Shear Span. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and buildings*. 1998;128(1):91–99. https://doi.org/10.1680/istbu.1998.30038

24. Johnson MK, Ramirez JA Minimum Shear Reinforcement in Beams with Higher Strength Concrete. *ACI Structural Journal*. 1989;86(4):376–382.

25. Kani MW, Huggins MW, Wittkopp PF *Kani on Shear in Reinforced Concrete*. Canada: University of Toronto; 1979.

26. Kim JK, Park YD Shear Strength of Reinforced High Strength Concrete Beams without Web Reinforcement. *Magazine of Concrete Research*. 1994;46:1–8. https://doi.org/10.1680/macr.1994.46.166.7

27. Kulkarni SM, Shah SP Response of Reinforced Concrete Beams at High Strain Rates. *ACI Structural Journal*. 1998;95(6):705–715.

28. Kwak Y-K, Eberhard MO, Kim W-S, Kim J Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups. *ACI Structural Journal*. 2002;99:530–538.

29. Mohammed MH Shear Behavior of Reactive Powder Concrete Beams with and without Coarse Aggregate. *Engineering, Materials Science*. 2018;2:86–90. https://doi.org/10.22060/ceej.2017.12210.5145

30. Morrow J, Viest IM Shear Strength of Reinforced Concrete Frame Members without Web Reinforcement. *ACI Journal*. 1957;28(9):833–869.

31. Mphonde AG, Frantz GC Shear Tests of High- and Low-Strength Concrete Beams Without Stirrups. *ACI Journal*. 1984;81(4);350–357.

32. Pansuk W, Nguyen T, Sato Y, Den Uijl JA, Walraven JC Shear Capacity of High Performance Fiber Reinforced Concrete I-beams. *Construction and Building Materials*. 2017;157:182–193. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.057

33. Perera R, Barchín M, Arteaga A, De Diego A Prediction of the Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams FRP-Strengthened in Shear Using Neural Networks. *Composites Part B: Engineering*. 2010;41(4):287–298. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.03.003

34. Reddy LS, Rao NV, Rao TD Shear Response of Fibrous High Strength Concrete Beams without Web Reinforcement. *Civil Engineering Dimension*. 2011;13(1):50–58.

35. Salandra MA, Ahmad SH Shear Capacity of Reinforced Lightweight High-Strength Concrete Beams. *ACI Journal*. 1989;86(6):697–704.

36. Tavio T Experimental Investigation on Size Effect in Shear of High-Strength Concrete Beams. *The Journal for Technology and Science*. 2009;20(1):11–23. https://doi.org/10.12962/j20882033.v20i1.131

37. Thiemicke J, Fehling E Experimental and Numerical Investigations on I-Shaped UHPC-Beams with Combined Reinforcement under Shear Load. In book: *Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation.* 1st Edition. 2016. P. 1363–1367.

38. Thorenfeldt E, Drangsholt G Shear Capacity of Reinforced High Strength Concrete Beams. *ACI 2nd International Symposium on HSC, ACI SP 121.8*. 1990. P. 129–154.

39. Yavas A, Goker CO Impact of Reinforcement Ratio on Shear Behavior of I-Shaped UHPC Beams with and without Fiber Shear Reinforcement. *Materials*. 2020;13(7):1–17. https://doi.org/10.3390/ma13071525

40. Xie Y, Ahmad SH, Yu T, Hino S, Chung W Shear ductility of reinforced concrete beams of normal and high strength concrete. *ACI Journal*. 1994;91(2):140–149.

41. Yoon Y-S, Cook WD, Mitchell D Minimum Shear Reinforcement in Normal, Medium and High-Strength Concrete Beams. *ACI Structural Journal*. 1996;93(5):576–584.

42. Lee J-H, Hong S-G Shear Strength of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC) I-shaped Beams without Stirrup. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2017;29:53–64. https://doi.org/10.4334/JKCI.2017.29.1.053

43. Magureanu C, Sosa I, Negrutiu C, Heghes B Bending and Shear Behavior of Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete. *High Performance Structures and Materials V.* 2010;112:79–89. https://doi.org/10.2495/HPSM100081

44. Meszoly T, Randl N Shear Behavior of Fiber-Reinforced Ultra-High Performance Concrete Beams. *Engineering Structures*. 2018;168:119–127. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.075

45. Telleen K, Noshiravani T, Galrito R, Brühwiler E Experimental Investigation into the Shear Resistance of a Reinforced UHPFRC Web Element. In: *8th fib PhD Symposium in Kgs*. Lyngby; 2010. P. 1–6. URL: https://www.researchgate.net/publication/49461300_Experimental_investigation_into_the_shear_resistance_of_a_reinforced_UHPFRC_web_element (accessed: 04.03.2025).

46. Ţibea C, Bompa DV Ultimate Shear Response of Ultra-High-Performance Steel Fibre-Reinforced Concrete Elements. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2020;20(49):1–16.

47. Wu X, Han S-M First Diagonal Cracking and Ultimate Shear of I-Shaped Reinforced Girders of Ultra-high performance fiber reinforced concrete without stirrup. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2009;3:47–56. https://doi.org/10.4334/IJCSM.2009.3.1.047

48. Yang I-H, Joh C, Kim B-S Shear Behaviour of Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete Beams Without Stirrups. *Magazine of Concrete Research*. 2012;64(11):979–993.

49. Zagon R, Matthy S, Kiss Z Shear behaviour of SFR-UHPC I-shaped beams. *Construction and Building Materials*. 2016;124:258–268. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.075

50. Lee JW, Joh C, Choi ES, Kwak IJ, Kim BS Estimation of Shear Behavior of Ultra High Performance Concrete I Girder without Shear Stirrups. *Key Engineering Materials*. 2013;525–526:557–560. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.525-526.557

51. Qi J, Ding X, Wang Z, Hu Y Shear Strength of Fiber-Reinforced High-Strength Ssteel Ultra-High-Performance Concrete Beams Based on Refined Calculation of Compression Zone Depth Considering Concrete Tension. *Advances in Structural Engineering*. 2019;22:2006–2018. https://doi.org/10.1177/1369433219829805

Об авторах:

Мурат Мухамедович Тамов, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2), ORCID, murat.tamov@gmail.com

Ольга Валентиновна Руденко, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных технологий Кубанского государственного университета (350040, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149), ORCID, olga_ned@mail.ru

Салиб Мина Ибрахим Фахми, инженер кафедры строительных конструкций Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2), ORCID, minaibrahim1234@yahoo.com

Заявленный вклад авторов:

М.М. Тамов: научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, формулировка выводов, корректировка текста.

О.В. Руденко: помощь и руководство по использованию программы моделирования и анализу результатов, подготовка текста.

М.И.Ф. Салиб: проведение экспериментальных исследований и анализ их результатов, проведение расчетов, поиск, анализ и систематизация данных, формирование списка литературы.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Murat M. Tamov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Building Structures of Kuban State Technological University (2 Moskovskaya str., Krasnodar, 350072, Russian Federation), ORCID, murat.tamov@gmail.com

Olga V. Rudenko, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Computing Technologies of Kuban State University (149 Stavropol Street, Krasnodar, 350040, Russian Federation), ORCID, olga_ned@mail.ru

Mina I.F. Salib, Engineer of the Department of Building Structures of Kuban State Technological University (2 Moskovskaya str., Krasnodar, 350072, Russian Federation), ORCID, minaibrahim1234@yahoo.com

Claimed Contributorship:

MM Tamov: scientific supervision, development of the main concept, formulation of the research goals and objectives, formulation of conclusions, and text editing.

OV Rudenko: assistance and guidance in using the modeling software and analyzing the results, text preparation.

MIF Salib: conducting experimental research and analyzing the results, performing calculations, searching, analyzing, and systematizing data, compiling the list of references.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 22.02.2025
Поступила после рецензирования / Reviewed 14.03.2025
Принята к публикации / Accepted 02.04.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES

CC BY

Check for updates

УДК 699.841

Оригинальное эмпирическое исследование

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-21-37

Оценка надежности конструктивных решений при реконструкции объекта культурного наследия с учетом сейсмических воздействий

Х.Н. Мажиев[1] ✉, К.Х. Мажиев[1,2], Ю.В. Панасенко[3], А.Х. Мажиева[1], А.Х. Мажиев[1,4], А.Х. Мажиев[4]

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

[2] Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, г. Грозный, Российская Федерация

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

[4] Академия наук Чеченской Республики, г. Грозный, Российская Федерация

✉ seismofund@mail.ru

EDN: YPWWOY

Аннотация

Введение. С целью обеспечения сейсмостойкости и снижения сейсмических нагрузок при реконструкции объекта культурного наследия выполнен пространственный расчет несущих конструкций сооружений кино-эстрадного зала. В настоящей статье анализируются конструктивная система, расчетно-динамическая модель с учетом основных и особых сочетаний нагрузок.

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

Результаты исследования. Получены результаты динамического расчета при основных и особых сочетаниях нагрузок и соответствующих сочетаниях внутренних усилий в рассчитываемых конструкциях сооружений реконструируемого объекта (кино-эстрадного зала). При этом было использовано всего 25 загружений.

Обсуждение и заключение. Результаты расчета здания кинотеатра показали, что обеспечивается требуемая несущая способность здания объекта культурного наследия при рассматриваемой расчетной ситуации.

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

Для цитирования. 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

© Мажиев Х.Н., Мажиев К.Х., Панасенко Ю.В., Мажиева А.Х., Мажиев А.Х., Мажиев А.Х., 2025

Original Empirical Research

Evaluation of the Reliability of Design Solutions during the Reconstruction of a Cultural Heritage Site Taking into Account Seismic Impacts

Khasan N. Mazhiev[1] ✉, Kazbek Kh. Mazhiev[1,2], Yuri V. Panasenko[3], Amina Kh. Mazhieva[1], Aslan Kh. Mazhiev[1,4], Adam Kh. Mazhiev[4]

[1] Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Academy of Sciences of the Chechen Republic, Grozny, Russian Federation

[2] Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russian Federation

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

[4] Academy of Sciences of the Chechen Republic, Grozny, Russian Federation

✉ seismofund@mail.ru

Abstract

Introduction. In order to ensure seismic resistance and reduce seismic loads, during the reconstruction of the cultural heritage site, a spatial calculation of the supporting structures of the cinema and variety hall was performed. This article analyzes the structural system, the calculation and dynamic model taking into account the main and special combinations of loads.

Materials and Methods. The calculations were carried out using the analytical method and the finite element method in the STARK ES software package.

Results. For the purpose of reconstructing the building of the cultural heritage site, the results of dynamic calculation were obtained for the main and special combinations of loads and corresponding combinations of internal forces in the calculated structures of the cinema and variety hall. In this case, only 25 loadings were used.

Discussion and Conclusion. The results of the calculation of the cinema building showed that the required load-bearing capacity of the building of a cultural heritage site is ensured in the considered design situation.

Keywords: building, reconstruction, seismic impact, calculation, load, structural system, seismic resistance, calculation-dynamic model

For citation. Mazhiev HN, Mazhiev KH, Panasenko YuV, Mazhieva AH, Mazhiev AH, Mazhiev AH. 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. http://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-21-37

Введение. При проведении реновационных работ в городах актуальным является сохранение объектов культурного наследия, которые проектировались с учетом старых норм и расчетных моделей.

С этой целью поставлена задача выполнения пространственного расчета несущих строительных конструкций сооружений кино-эстрадного зала кинотеатра для оценки их надежности при реконструкции. Реконструируемое здание является объектом культурного наследия и расположено в сейсмически активном районе [1–5, 14].

Необходима научно-техническая оценка соответствия проектных решений требованиям нормативных документов Российской Федерации по обеспечению безопасности здания, а также разработка рекомендаций для стадии проектирования «рабочая документация» с учетом возможного изменения расчетной схемы работы конструктивной модели здания при реконструкционных работах.

Материалы и методы. Исследуемая конструктивная система представляет собой здание кинотеатра трапециевидное в плане, каркасное, с наружными боковыми стенами из бетонных блоков и кирпича и с витражным остеклением южного (главного) и северного фасадов. Кинотеатр имеет два кинозала: большой — на 1200 мест и малый — на 80 мест. Кинотеатр расположен на стилобате. Основной объем здания занимает зрительный зал с широкоформатным экраном и амфитеатр для размещения зрительских мест.

Здание кинотеатра состоит из двух частей (рис. 1):

– административная часть, в осях 4–11/Г–Е;

– зрительный зал, в осях 1–14/А–Г, и цокольный этаж, в осях Iп–IIп/В–Е.

Административная часть здания выполнена 4-этажной, конструктивная схема представляет собой монолитный железобетонный рамный каркас с перекрестным расположением ригелей. В качестве элементов межэтажных перекрытий (покрытия) использованы сборные пустотные плиты, уложенные вдоль цифровых осей. Наружное стеновое заполнение каркаса выполнено в виде облегченной кладки керамического кирпича.

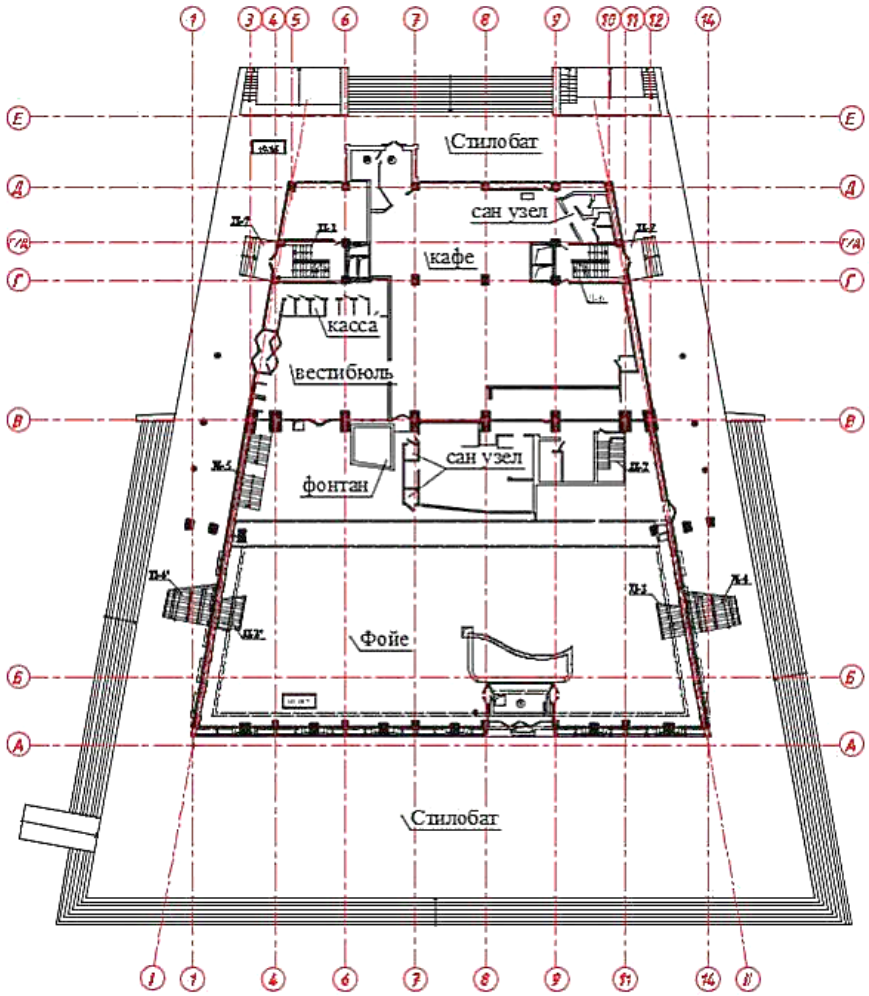


Рис. 1. Компоновочная схема здания [14]

Зрительный зал здания выполнен 2-этажным. Несущими элементами являются рамы, установленные вдоль цифровых осей здания. Конструктивными элементами рамы являются: железобетонная и наклонная металлическая стойки, железобетонные наклонный ригель и консоль с вылетом 11,66 м. Железобетонные элементы рамы имеют переменное сечение. Узел сопряжения металлической стойки и наклонного ригеля шарнирный. Для компенсации горизонтальных усилий, возникающих в опорном узле металлической стойки, предусмотрена железобетонная затяжка. Опорный узел металлической стойки шарнирный, железобетонной стойки — жесткий. В качестве элементов перекрытия 1-го этажа использованы сборные железобетонные пустотные плиты. Для обеспечения пространственной жесткости рам в уровне верха стоек по осям «А» и «В» выполнены монолитные железобетонные распорки Р-1 и Р-2, в уровне ригелей и консолей по всей их длине с шагом 5–6 м установлены сборные железобетонные крестовые связи [1–5, 14].

В качестве несущих конструкций покрытия использованы металлические балки составного двутаврового сечения высотой 1,7 м. Консоль вылетом 11,66 м опирается по оси «А» на наклонную металлическую стойку несущей рамы через металлическую стойку Ст-1, опирающуюся на монолитную железобетонную распорку Р-1, по оси «Г» — на колонны каркаса административной части здания. Пространственная устойчивость несущих элементов покрытия обеспечена наличием вертикальных металлических связевых ферм, горизонтальных распорок и крестовых связей, установленных по верхнему и нижнему поясам балок. Конструкциями покрытия служат сборные железобетонные ребристые плиты.

В качестве ограждающих конструкций (наружных стен) основной части здания использованы сборные блоки из керамзитобетона, не связанные с колоннами каркаса.

В осях I/А–Г и II/А–Г зрительного зала для обеспечения сообщения между кинооператорской и административной частью здания предусмотрены переходные галереи в уровне 3-го этажа (рис. 1).

Проектом реконструкции предусмотрено сохранение объемно-пространственного облика здания в рамках приспособления под современное использование для концертных мероприятий. По проекту реконструкции вы-

полняется частичный демонтаж существующих конструкций и последующее их восстановление и усиление сохраняемых конструкций [6–11].

По архитектурной концепции реконструкции объекта предусмотрено строительство развитой подземно-цокольной части вокруг кинотеатра с целью создания более современного функционала и расширения возможностей для отдыха в части расположения блоков С1–С5 вокруг блока А1 с функциональной связью между зданиями (рис. 2).

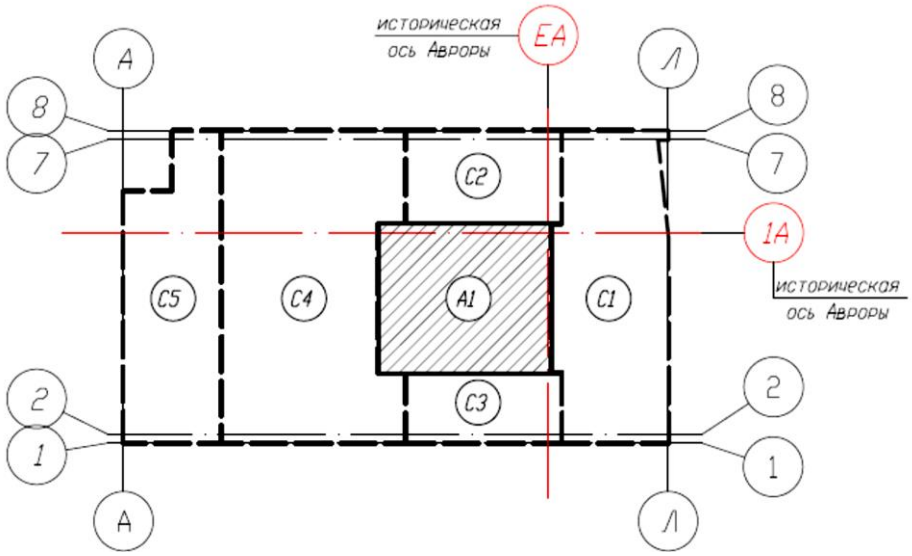


Рис. 2. Ситуационная схема участка

В рамках реконструкции основного здания предусматриваются следующие конструктивные и объемно-планировочные мероприятия:

– расширение объема зрительного зала за счет пространства административной части. С этой целью в административной части выполняется демонтаж части каркаса с подвала по 4-й этаж (колонны, балки, перекрытия, стены цоколя, ненесущие стены) с возведением нового каркаса и устройством на отм. +17,360 и +17,860 двух железобетонных балок покрытия зала пролетом 21,1 м и 18,3 м. Для опирания балок покрытия выполняются два ядра жесткости в осях 4–6/Г–Д и 9–11/Г–Д с пилястрами-колоннами под проектируемые балки;

– существующие внутренние лестничные клетки демонтируются. Внутри проектируемых ядер жесткости выполняются эвакуационные лестничные клетки;

– демонтируется и выполняется заново существующая стилобатная часть административного блока в осях $I_п$–I, $II_п$–II, Д–Е;

– сохраняются V-образные балки зрительного зала Б-1.1 с их усилением по расчету;

– в зрительном зале выполняется переустройство существующих технологических галерей и устройство двух уровней проектируемых балконов вдоль боковых стен здания. Балконы и галереи опираются на проектируемые колонны, устанавливаемые на V-образные балки. Балконы и галереи выполняются в стальном каркасе для облегчения веса. В существующей наружной стене здания устанавливаются встраиваемые колонны для опирания балконов и галерей;

– существующие наружные стены зрительного зала по осям I и II реконструируются и усиливаются железобетонными колоннами-пилястрами;

– существующие фундаменты усиливаются с помощью устройства по периметру дополнительных буроинъекционных свай и грунтоцементных армированных элементов;

– выполняются новые свайные фундаменты под проектируемые несущие конструкции;

– выполняется подземная галерея для прохода под зданием кинотеатра между пристраиваемым музеем и кинотеатрами с южной стороны, и кафе — с северной стороны.

Для снижения нагрузок на здание предусмотрены следующие мероприятия:

– демонтаж существующих полов и перегородок с устройством современных из облегченных материалов — ГКЛ, ГВЛ, газобетонные блоки автоклавного твердения;

– демонтаж покрытия зала (в том числе сборных ж/б плит, не соответствующих требованиям к покрытиям в сейсмических районах согласно результатам обследования) с устройством легкого мембранного покрытия по профилированному листу;

– демонтаж существующих галерей вдоль зала с устройством новых галерей, перекрытий и балконов по стальным балкам и колоннам;

https://www.stsg-donstu.ru

– демонтаж ненесущих наружных стен административной части с устройством сейсмостойких ненесущих стен из газобетонных блоков автоклавного твердения.

Для возможности устройства пристраиваемой подземной части и защиты реконструируемого здания выполняется стена в грунте (шпунтовое ограждение) толщиной 600–800 мм по периметру реконструируемого здания и по периметру пристраиваемого подземного пространства с устройством распорной системы из стальных труб и анкерного крепления в двух–четырех уровнях. Распорная система демонтируется по мере возведения подземной части и переопирания стены в грунте на каркас проектируемого стилобата.

Выполняется усиление существующих свайных фундаментов буроинъекционными сваями для передачи нагрузок от существующих фундаментов на плотные пески в основании здания и возможности вывешивания существующих фундаментов с учетом устройства пристраиваемой подземной части ниже острия существующих свай [12–15].

Для приведения здания к требованиям сейсмических норм выполняется объединение блока фойе со зрительным залом и бывшей административной части в единый сейсмический отсек. Проектируемые ядра жесткости административной части включаются в работу сейсмоблока «фойе — зрительный зал». При данном решении опирание балок покрытия выполняется на объединенный сейсмоблок.

Также выполняется конструктивное усиление отдельных элементов колонн и балок, имеющих недостаточную несущую способность по данным расчета на основное и особое сочетание нагрузок.

Стальные элементы наклонных колонн фойе усиливаются по расчету. Узлы опирания наклонных колонн усиливаются как жесткие.

Балки покрытия зрительного зала Б1 сохраняются и усиливаются по расчету. Демонтаж каркаса административной части предполагает переопирание балок покрытия на временные опоры, устанавливаемые по оси В. После демонтажа и возведения проектируемой административной части вновь возводимых балок по оси Г на них переопираются существующие металлические балки. Выполняется реконструкция опорного шарнира балок по оси Г.

Консольные фермы по оси I, II демонтируются и выполняются заново с креплением к встроенному каркасу стен по оси I, II. Заменяется система связей в козырьке в осях А1–А/Б.

Элементы железобетонных конструкций с выявленными в ходе обследования дефектами восстанавливаются и усиливаются по расчету.

Наружные эвакуационные лестницы демонтируются и возводятся в монолитном железобетонном исполнении заново на проектируемом стилобате. Существующая лестница в фойе сохраняется и усиливается.

Для оценки надежности принятых в проекте конструктивных решений был выполнен проверочный расчет пространственной модели сооружения на проектные нагрузки и воздействия. Расчет выполнен с использованием программного комплекса STARK ES.

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. 3).

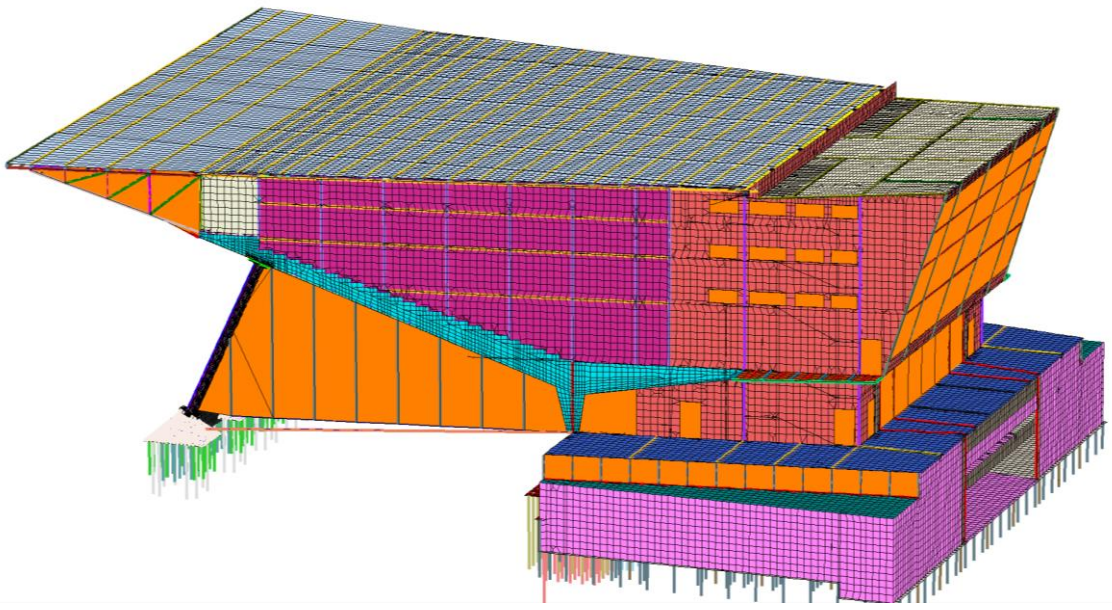


Рис. 3. Конечно-элементная модель кино-эстрадного зала (блок А1) [14]

Элементы встроенных помещений в осях В–Г/1–3, В–Г/7–11, В–Г/15–18 и пристройки на кровле в осях А1–А/7–13 заданы только для сбора и передачи нагрузки на несущие элементы каркаса.

При расчете здания были учтены следующие нагрузки и воздействия:

– вертикальные постоянные нагрузки от собственного веса несущих и ограждающих конструкций;

– длительные нагрузки от инженерного оборудования;

– временные нагрузки на перекрытия и покрытие;

– снеговая нагрузка;

– средняя и пульсационные составляющие ветровой нагрузки;

– сейсмическое воздействие на сооружение;

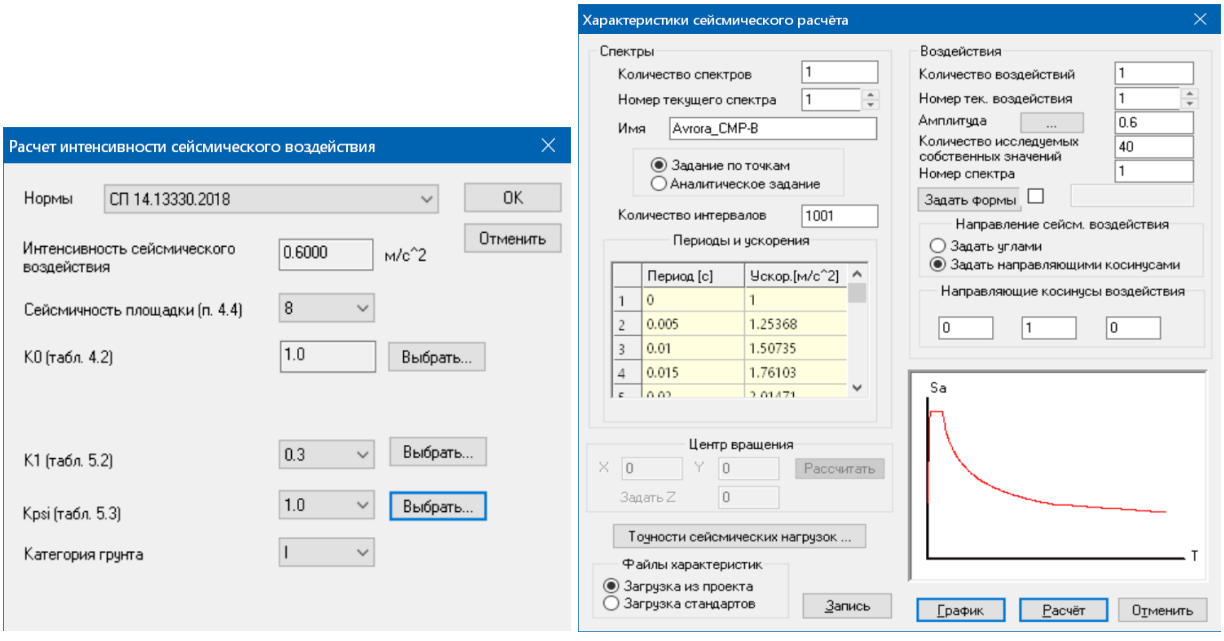
– особые аварийные воздействия в виде особого сочетания нагрузок с учетом экстремальных климатических воздействий.

Нормированные параметры и условия объекта строительства приведены в таблице 1. На рис. 4 показаны значения параметров для расчета на сейсмическое воздействие.

Таблица 1

Нормированные параметры и условия объекта строительства

Название	Значение	Нормативный документ, пункт
Уровень и класс ответственности сооружения, коэффициент надежности по ответственности	Нормальный, КС–2	№ 190-ФЗ, ст. 48.1 № 384-ФЗ
Значение коэффициента надёжности по ответственности сооружения, γ_n	1,0	ГОСТ 27751-2014
Ветровая нагрузка: – ветровой район; – нормативное значение ветрового давления, кПа.	 IV 0,48	СП 20.13330.2016
Снеговая нагрузка: – снеговой район; – нормативное значение веса снегового покрова, кПа.	 II 1,1	СП 20.13330.2016
Климатический район/подрайон	III/IIIБ,	СП 131.13330.2020
Гололедная нагрузка	III 10 мм	СП 20.13330.2016
Сейсмичность района строительства – карта А – карта В	 7 баллов 8 баллов	Сейсмическое микрорайонирование



а) *б)*

Рис. 4. Значения параметров для расчета на сейсмическое воздействие: *а* — расчет интенсивности сейсмического воздействия; *б* — характеристики сейссмического расчета

https://www.stsg-donstu.ru

Всего в расчетной модели кино-эстрадного зала было использовано 25 загружений для учета всех нагрузок. На рис. 5–6 показаны схемы приложения ветровых нагрузок в направлениях $+X$ и $+Y$ соответственно.

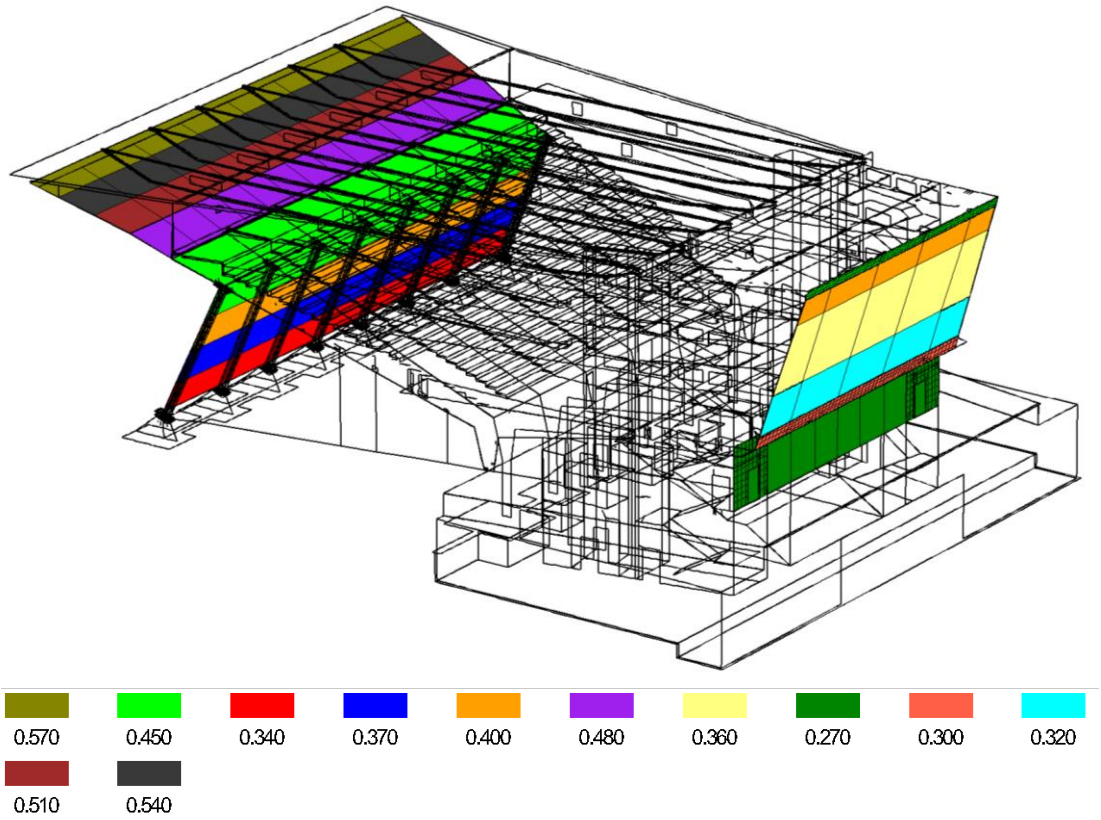


Рис. 5. Схема приложения ветровой нагрузки. Направление $+X$, кН/м^2 [14]

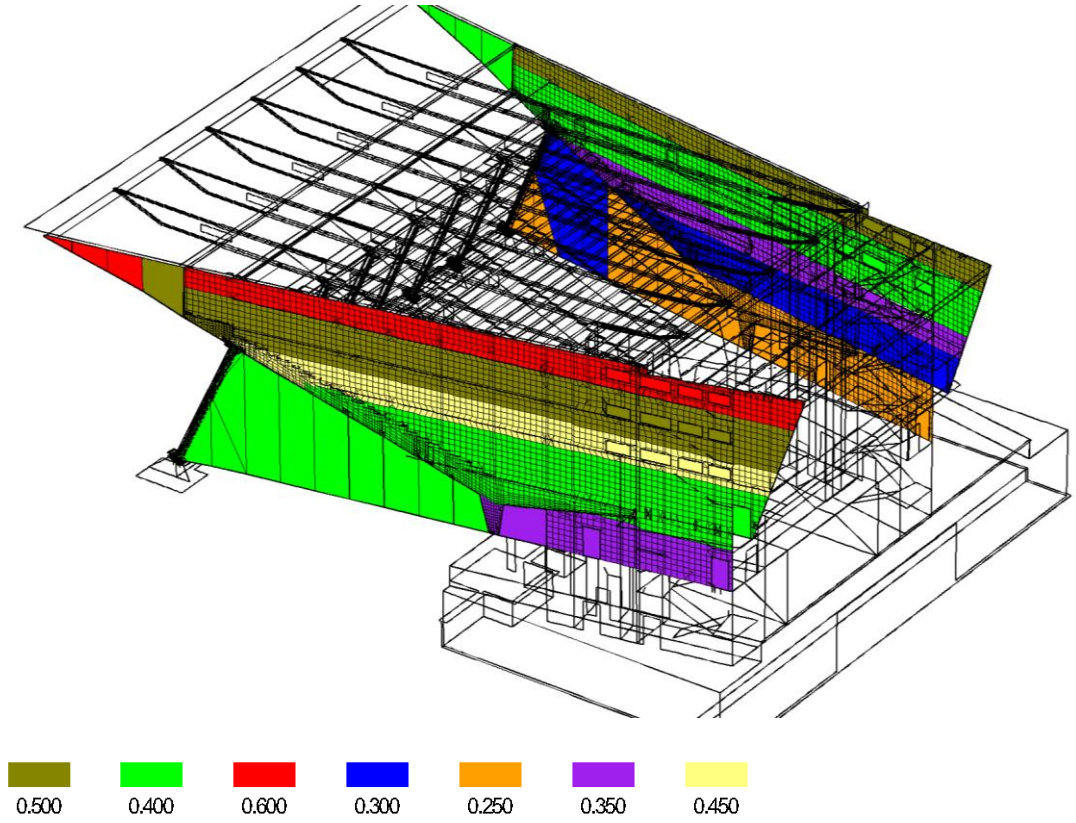


Рис. 6. Схема приложения ветровой нагрузки. Направление $+Y$, кН/м^2 [14]

Результаты исследования. Осадка фундамента оценивалась для основных сочетаний полных значений нормативных нагрузок. Картина осадок фундамента представлена на рис. 7. Максимальная осадка составила 12,4 мм.

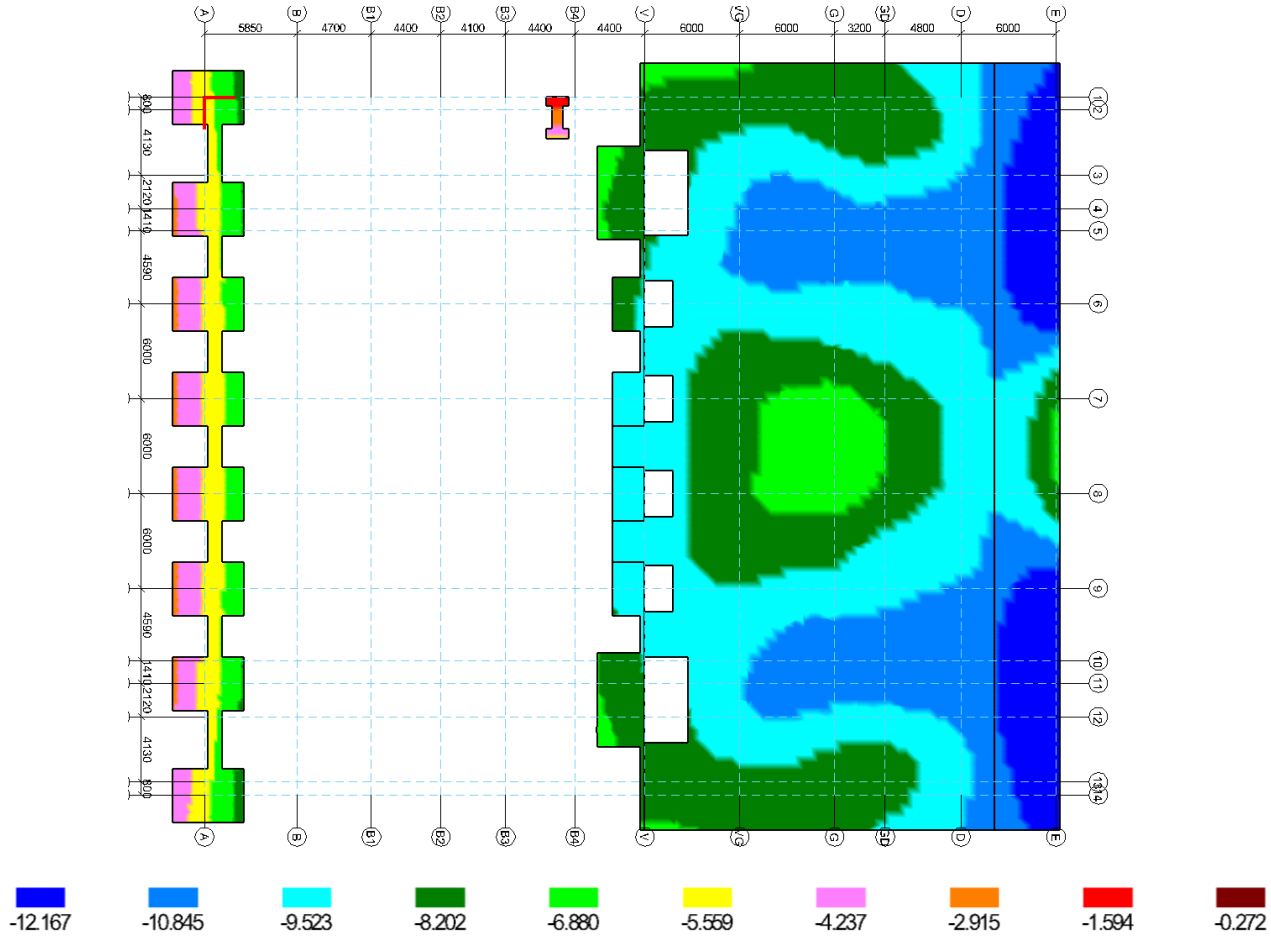


Рис. 7. Картина осадок фундамента *Uz* [14]

Максимальное значение относительной разницы осадок от основных сочетаний нагрузок составило $\Delta s/L$ = 0,00032, что не превышает предельного значения, равного 0,004.

Горизонтальные отклонения верха здания оценивались для основных сочетаний полных значений нормативных нагрузок (рис. 8).

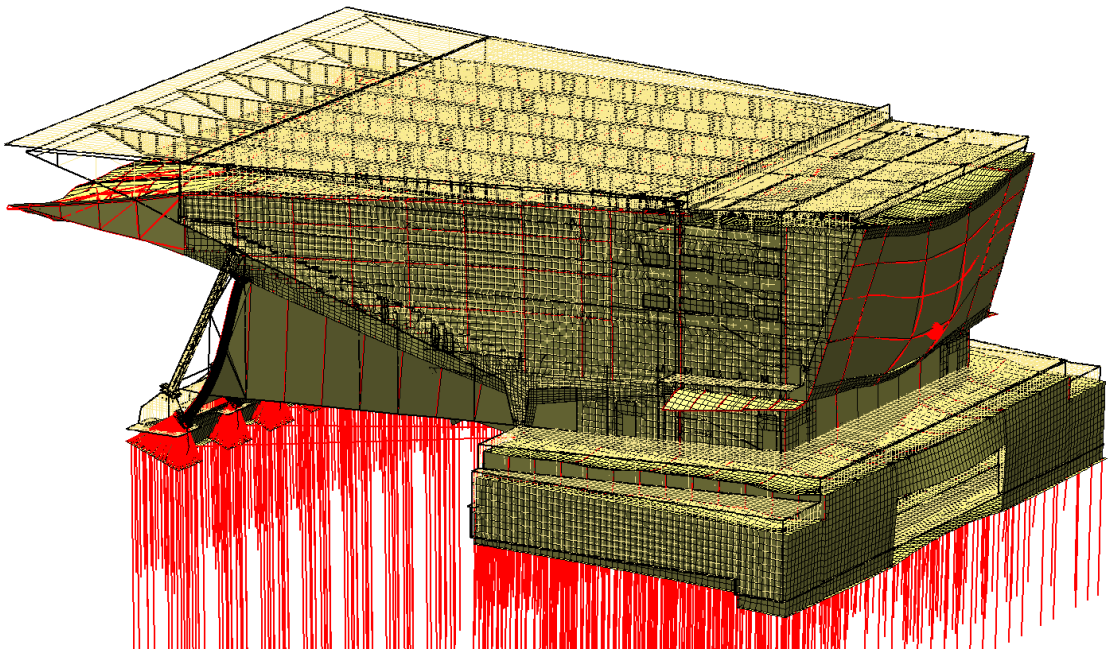


Рис. 8. Горизонтальные перемещения верха здания [14]

https://www.stsg-donstu.ru

Максимальные горизонтальные перемещения верха здания от нормативных величин нагрузок составляют 19,3 мм, что не превышает предельно допустимое значение, равное 36 мм.

Результаты расчета первой формы потери устойчивости и соответствующий ей критический параметр нагрузки P_{cr} приведены на рис. 9.

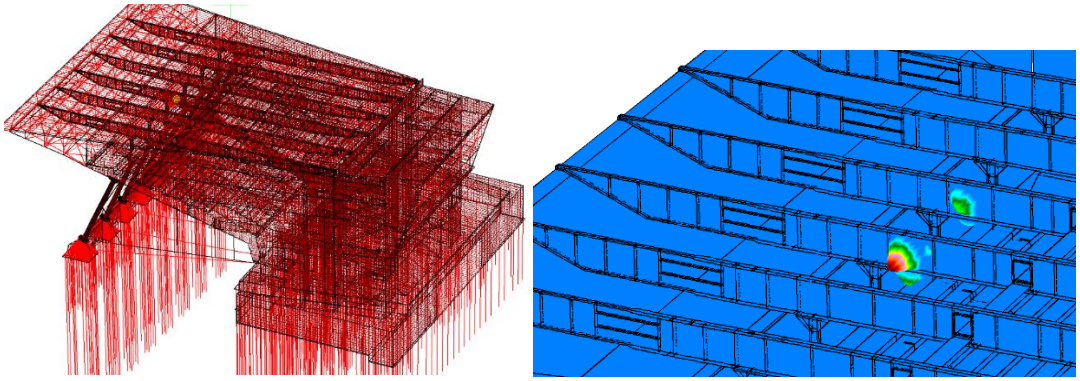
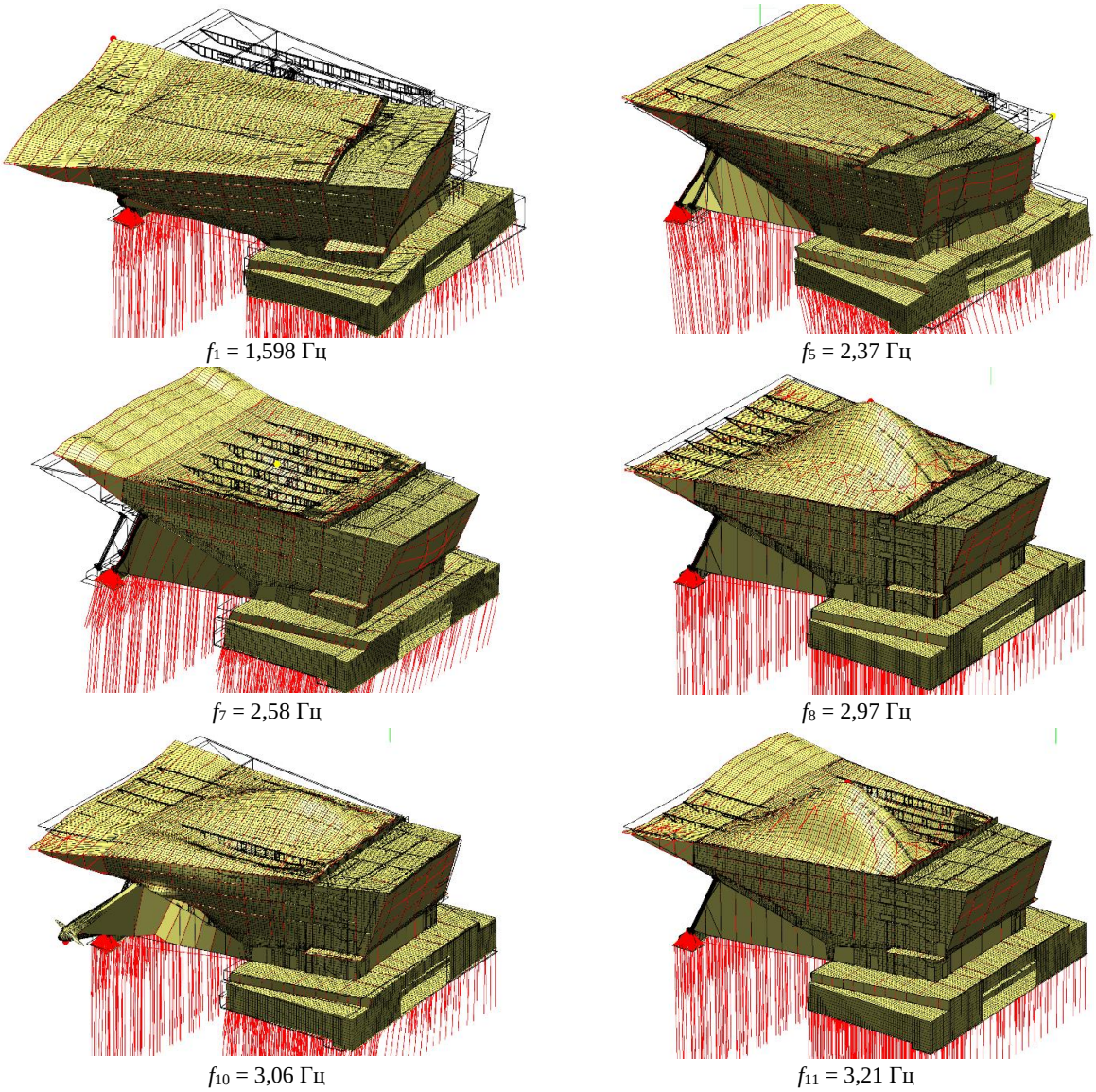


Рис. 9. Форма 1 потери устойчивости [14]

Наименьший критический параметр нагрузки (запас устойчивости) с учетом коэффициента надежности по ответственности равен 1,56. Общая устойчивость несущих конструкций здания обеспечена.

Для повышения надежности исторических конструкций балок покрытия было рекомендовано увеличить устойчивость стенки в приопорных зонах до значения P_{cr} не менее 2,0.

На рис. 10 показаны первые общие формы собственных колебаний кино-эстрадного зала.



f_1 = 1,598 Гц; f_5 = 2,37 Гц; f_7 = 2,58 Гц; f_8 = 2,97 Гц; f_{10} = 3,06 Гц; f_{11} = 3,21 Гц

Рис. 10. Формы собственных колебаний, блок А1 [14]

Расчет количества арматуры выполнен при основных сочетаниях нагрузок с учетом условий прочности и трещиностойкости. Характеристики материалов железобетонных конструкций приведены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики материалов конструкций

Конструкция	Класс бетона	Класс продольной арматуры	Класс поперечной арматуры	Толщина защитного слоя			
				SO, мм	SU, мм	RO, мм	RU, мм
Фундамент	B30	A500C	A240	50	80	80	50
V-балка Б1.1 истор.	B25	AII	AII	40	40	60	60
V-балка Б1.1 усил. торкрет	B30	A500C	A240	20	20	45	45

Результаты подбора необходимого армирования фундамента приведены ниже на рис. 11–14.

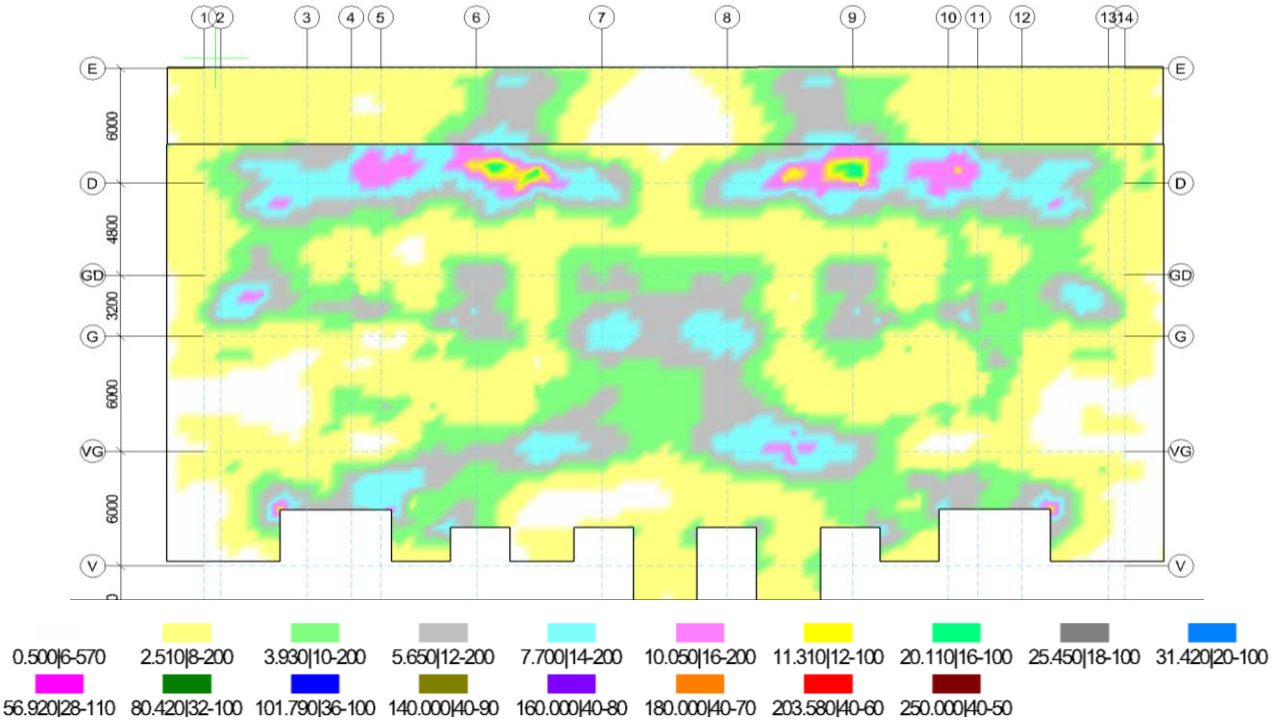


Рис. 11. Армирование фундамента. Верхняя продольная арматура в направлении оси *R*, см^2/м [14]

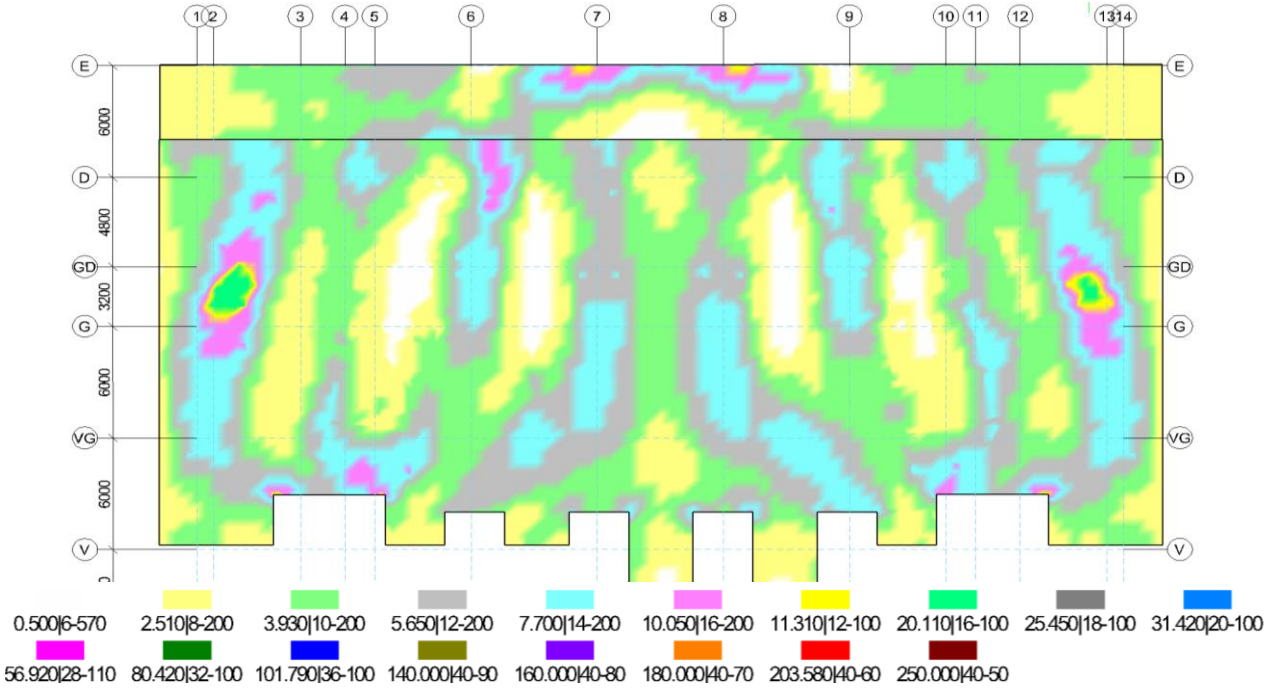


Рис. 12. Армирование фундамента. Верхняя продольная арматура в направлении оси *S*, см^2/м [14]

https://www.stsg-donstu.ru

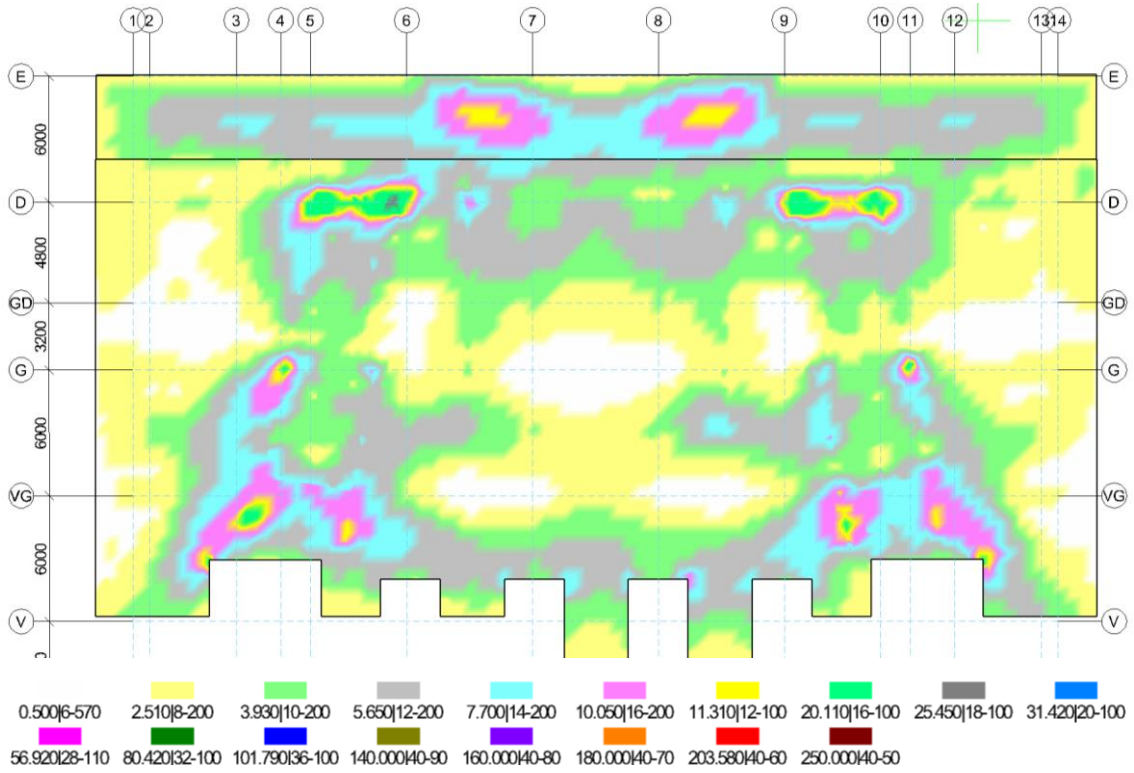


Рис. 13. Армирование фундамента. Нижняя продольная арматура в направлении оси *R*, см^2/м [14]

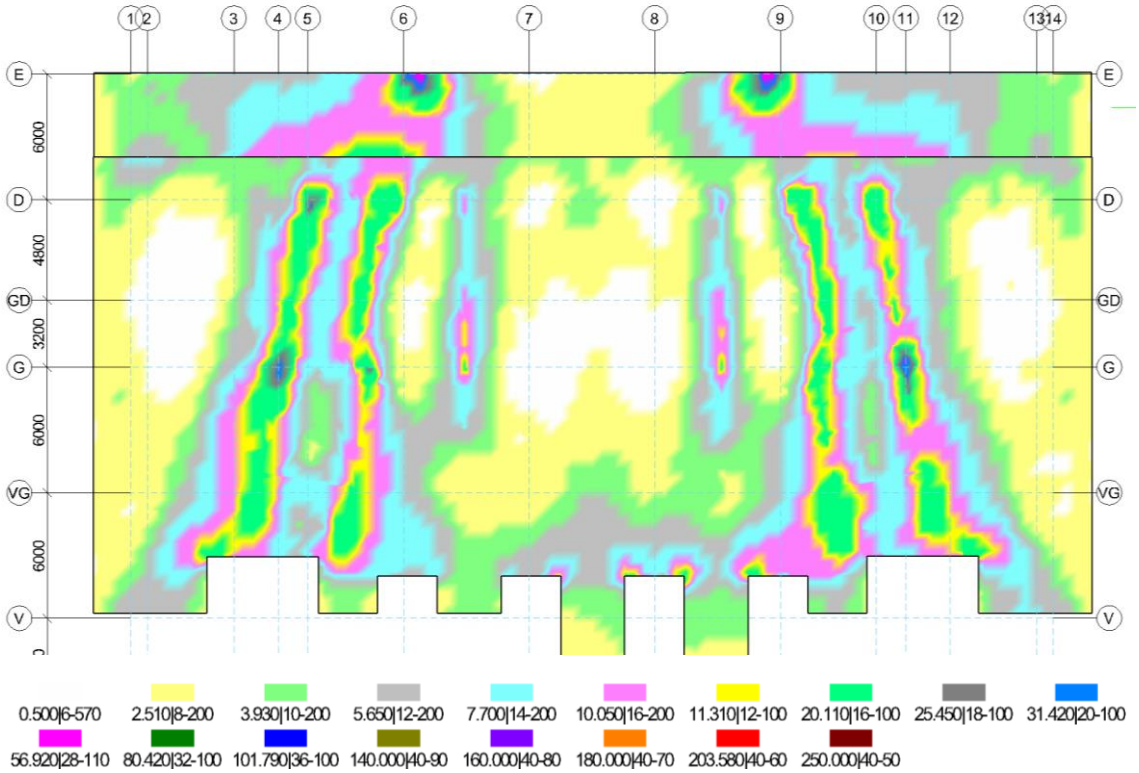


Рис. 14. Армирование фундамента. Нижняя продольная арматура в направлении оси *S*, см^2/м [14]

Требуемое армирование существующей V-балки показано на рис. 15–16.

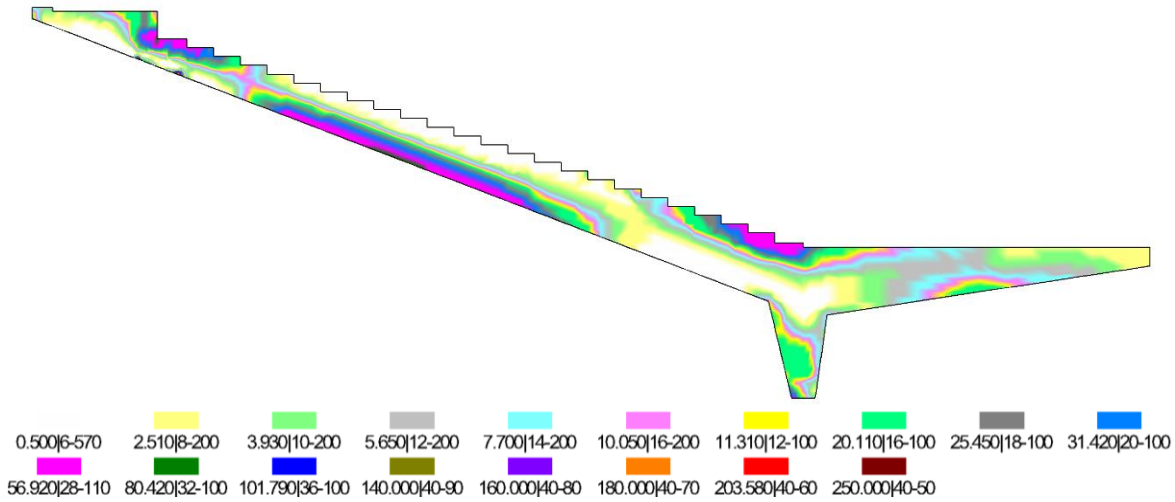


Рис. 15. Армирование существующей V-балки. Верхняя и нижняя продольная арматура в направлении оси *R*, см^2/м [14]

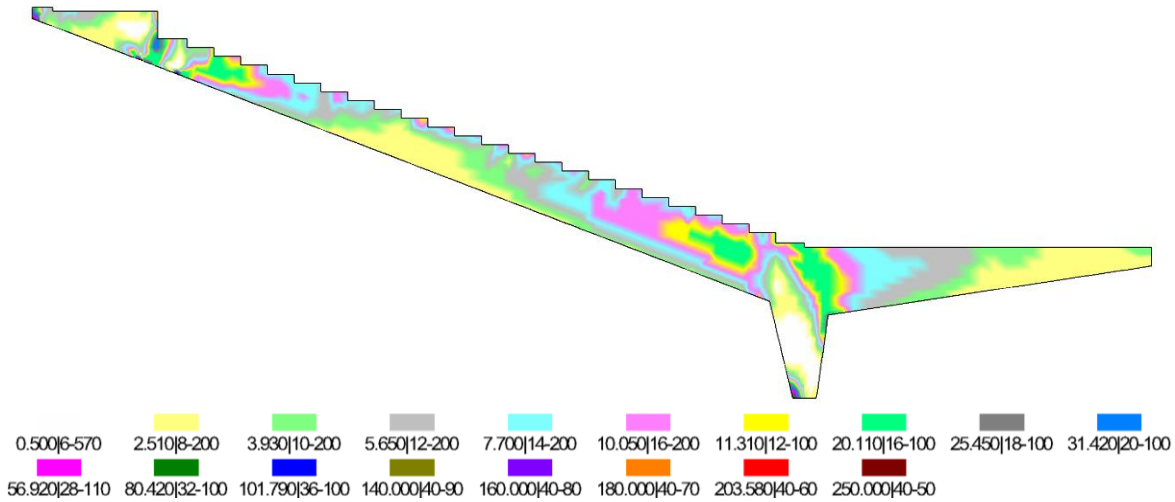


Рис. 16. Армирование существующей V-балки. Верхняя и нижняя продольная арматура в направлении оси *S*, см^2/м [14]

Напряжения в стальных балках покрытия оценены по теории прочности Губера-Мизеса для *min/max* наложения при различных комбинациях. Результаты показаны на рис. 17–18.

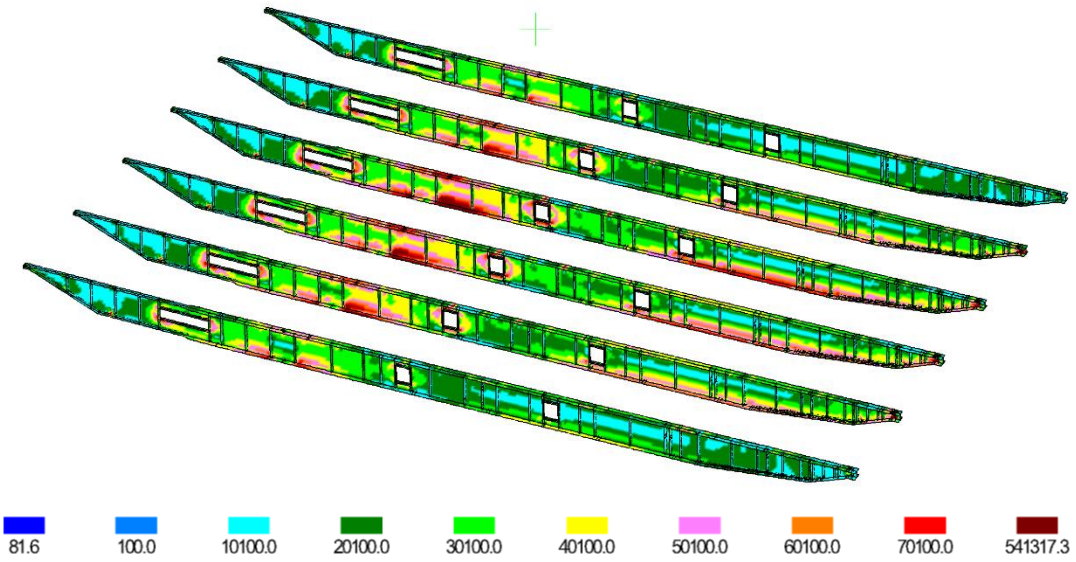


Рис. 17. Напряжения в стальных балках покрытия для *min* наложения при различных комбинациях [14]

https://www.stsg-donstu.ru

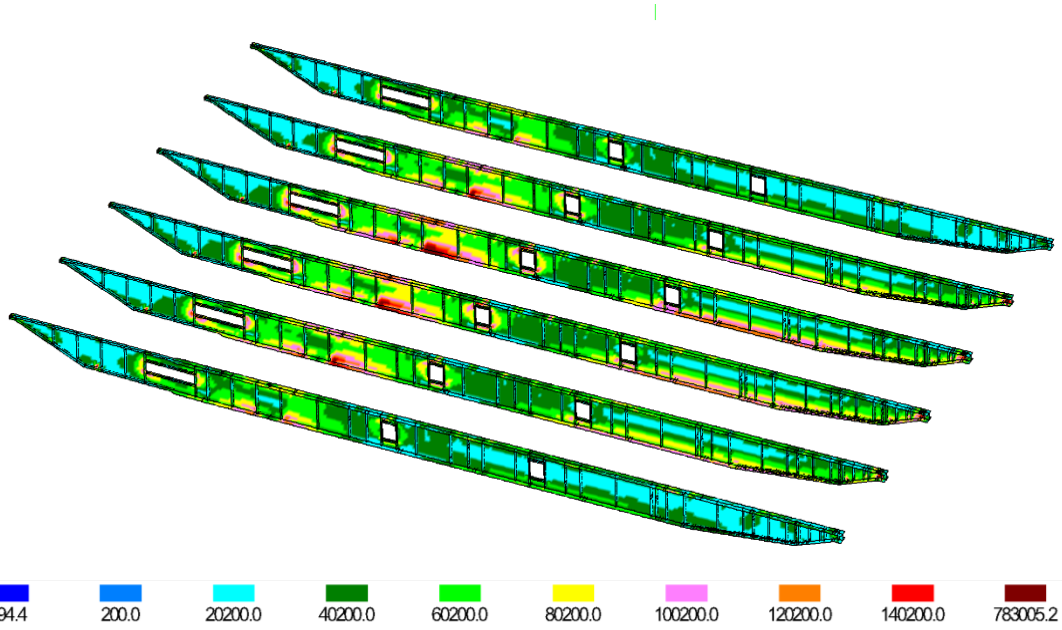


Рис. 18. Напряжения в стальных балках покрытия для *max* наложения при различных комбинациях [14]

Несущая способность элементов балок покрытия в осях А–В при основных и особых сочетаниях нагрузок обеспечена.

Обсуждение и заключение. В рамках расчетов несущих конструкций кино-эстрадного зала (блок А1) были выполнены следующие работы:

1. Анализ проектной документации, материалов исследований.
2. Формирование пространственной расчетной схемы здания с использованием апробированного и сертифицированного программного комплекса ПК STARK ES.
3. Сбор нагрузок на конструкции на основании предоставленной документации с учетом требований норм.
4. Расчет форм и частот собственных колебаний конструкций.
5. Проверка общей линейно-упругой устойчивости несущей системы здания при основных сочетаниях нагрузок и воздействий.
6. Проверка общей жесткости несущей системы здания, осадок фундамента, вертикальных прогибов плит при основных сочетаниях нагрузок и воздействий.
7. Расчет основных элементов железобетонных и стальных конструкций здания по предельным состояниям.

На основании анализа результатов проверочного расчета несущих конструкций кино-эстрадного зала, выполненного при основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий (с учетом особых нагрузок от сейсмического воздействия, пожарного автомобиля и аварийного воздействия снега), можно заключить следующее:

1. Общая жесткость и линейно-упругая устойчивость несущей системы здания обеспечены.
2. Осадка фундамента, горизонтальные перемещения конструкций здания не превышают предельных значений.
3. Напряжения в элементах стальных конструкций не превышают расчетных сопротивлений стали.
4. Количество арматуры в железобетонных конструкциях здания должно быть принято не меньше, чем в результатах расчета.

Таким образом, принятые в проекте кино-эстрадного зала (блок А1) конструктивные решения обеспечивают надежность, прочность, жёсткость и устойчивость несущих строительных конструкций при основных и особых сочетаниях расчетных нагрузок и воздействий.

При разработке проектной документации на стадии РД, а также в процессе строительства рекомендуется:

1. Выполнить испытания конструкций фасада с целью проверки проектных решений и подтверждения механической безопасности.
2. Разработать РД на усиление стальных балок покрытия с учетом всех стадий монтажа (демонтажа) конструкций на основании соответствующих расчетов. Необходимо учесть возможные изменения расчетной схемы работы балки и изменение схемы раскрепления конструкций поясов и стенки.
3. Предусмотреть НТС при разработке усиления железобетонных V-балок трибун на стадии РД и при производстве работ. При расчете усиления необходимо учесть стадии монтажа и совместную работу старого и нового материала, а также требования к огнестойкости конструкций.

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/bitstream/handle/10399/2170/ThemelisS_1008_sbe.pdf?sequence=1 (дата обращения 24.02.2025).

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 Impact of the Control Earthquake Level by the Nonlinear Static Method on the Example of the Adyghe Wind Farm. *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/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1333 (дата обращения 24.02.2025).

Mailyan DR, Muradyan VA. Method of Calculating Eccentrically Compressed Concrete Columns. *Engineering Bulletin of the Don.* 2012;4(2):182. (In Russ.) URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1333 (accessed: 24.02.2025)

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/ru/magazine/archive/n11y2023/8786 (дата обращения 24.02.2025)

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 Bulletin of the Don.* 2023; 11(107):386–400. (In Russ.) URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8786 (accessed: 24.02.2025)

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, Stelmakh SA, Shcherban EM. Calculation and Design of Building Structures Taking into Account the Variotropy of Structure, Sections and Differentiation of Structural Characteristics of 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. Маилян Л.Р., Язьев 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 Buildings. *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., Кусаинов 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-sejsmostojkost-sooruzhenij.html (дата обращения 24.02.2025).

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-sejsmostojkost-sooruzhenij.html (accessed: 24.02.2025).

https://www.stsg-donstu.ru

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 DK-S, 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 жизнесберегающих 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 жизнесберегающего 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. *Научно-техническое заключение по теме: «Научно-техническое сопровождение проектирования объекта культурного наследия регионального значения «Кинотеатр Аврора», 1967г., расположенного по адресу: г. Краснодар, ул. Красная, 169, лит.А. Реконструкция и приспособление для современного использования». Том 1. Киноэстрадный зал (Блок А1)».* Москва: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»; 2024. 65 с.

Scientific and Technical Expertise on the Topic: "Scientific and Technical Support for the Design of a Cultural Heritage Site of Regional Significance "Aurora Cinema", 1967, located at Krasnodar, Krasnaya St., 169, lit. A. Reconstruction and Adaptation for Modern Use." Volume 1. Cinema and Variety Hall (Block A1). Moscow: Central Research Institute of Building Structures named after VA Kucherenko, JSC "Research Center "Construction"; 2024. 65 p. (In Russ.)

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

Recommendations for Accounting for the Wave Nature of Seismic Impact and Protection against Emergencies. Moscow, V.A. Kucherenko Central Research Institute of Structures, 2024. (In Russ.)

Об авторах:

Хасан Нажоевич Мажиев, 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

Казбек Хасанович Мажиев, кандидат технических наук, 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); старший научный сотрудник Комплексного научно-исследовательского института им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук (364051, Российская Федерация, Чеченская Республика, г. Грозный, ул. В. Алиева, 21а), ORCID, seismofund@mail.ru

Юрий Вячеславович Панасенко, 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

Амина Хасановна Мажиева, 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

Аслан Хасанович Мажиев, 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); 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

Адам Хасанович Мажиев, 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.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Building Structures of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Grozny State Oil Technological University named after Academician M.D. Millionshchikov (100 Kh.A. Isaev pr-t, Grozny, Chechen Republic, 364051, Russian Federation), ORCID, seismofund@mail.ru

Kazbek K. Mazhiev, Cand.Sci. (Eng.), Scientific Director of the Scientific and Technical Center "Safety of Buildings and Structures under Natural and Man-Made Impacts", Associate Professor of the Building Structures Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Grozny State Oil Technological University named after Academician M.D. Millionshchikov" (100 Kh.A. Isaev pr-t, Grozny, Chechen Republic, 364051, Russian Federation); Senior Researcher, Federal State Budgetary Institution of Science "Integrated Research Institute named after Kh.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences" (21a V. Aliyev str. Grozny, Chechen Republic, 364051, Russian Federation), ORCID, seismofund@mail.ru

Yuri V. Panasenko, Head of the expert calculations group of the Laboratory of Automation of Research and Design of Structures, Central Research Institute of Building Structures named after V.A. Kucherenko, JSC "Research Center "Construction" (6, 2-ya Institutskaya St., Moscow, 109428, Russian Federation), ORCID, panyuriy@eurosoft.ru

Amina K. Mazhieva, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Building Structures, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov" (100 Kh.A. Isaev pr-t, Grozny, Chechen Republic, 364051, Russian Federation), ORCID, seismofund@mail.ru

Aslan K. Mazhiev, Researcher, Department of Physical, Mathematical and Technical Sciences, Center for Materials Science Problems, State Scientific Institution "Academy of Sciences of the Chechen Republic" (19a Vahi Aliyev str., Grozny, Chechen Republic, 364043, Russian Federation); Senior Lecturer, Department of Building Structures, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, Grozny State Oil Technological University named after Academician M.D. Millionshchikov" (100 Kh.A. Isaev pr-t, Grozny, Chechen Republic, 364051, Russian Federation), ORCID, seismofund@mail.ru

Adam K. Mazhiev, Researcher, Department of Physical, Mathematical and Technical Sciences, Center for Materials Science Problems, State Scientific Institution "Academy of Sciences of the Chechen Republic" (19a Vahi Aliyev str., Grozny, Chechen Republic, 364043, Russian Federation), ORCID, seismofund@mail.ru

Claimed Contributorship:

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

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

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

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

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

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

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

Поступила в редакцию / Received 02.03.2025
Поступила после рецензирования / Reviewed 15.03.2025
Принята к публикации / Accepted 09.04.2025

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

FOUNDATIONS AND UNDERGROUND STRUCTURES

CC BY

Check for updates

УДК 624.15:699.841
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-38-48

Original Empirical Research

Performance-Based Plastic Design of a Reinforced Concrete Frame for Seismic Loads Considering the Soil-Pile-Structure Interaction

Mohamed Abdelhamid Elsayed Mohamed, Albert Yu. Prokopov ✉
Don State Technical University, Rostov on Don, Russian Federation
✉ prokopov72@rambler.ru

EDN: VWWGDC

Abstract

Introduction. The authors make use of Performance-Based Plastic Design (PBPD) method that is commonly employed overseas for calculations and design of building structures in seismic hot spots. A pre-selected target drift and yield mechanisms is used as the key performance objectives. In this research, reinforced concrete special moment frames (RC SMF) were analyzed for high-rise concrete structures perceiving seismic loads.

Materials and Methods. Two designs were considered in the analysis, one according to ACI-318/ASCE-07, and the other according to PBPD. RC SMF was also combined with pile caps and piles foundation system to provide a soil-pile-structure interaction (SPSI) model. Nonlinear lateral load-transfer from the foundation to the soil is modeled using p-y curves for soft clay soil that was considered in this study.

Results. Numerical results obtained using soil-pile- structure interaction model conditions were compared to those corresponding to fixed-base support conditions, such as fundamental time period, structural capacity, story displacement and story drift. Frames designed using PBPD were less affected by SPSI, in spite of having greater values in general than frames designed following the standards (codes).

Discussion and Conclusions. The PBPD method as a direct design method where the drift control and the selection of yield mechanism are initially assumed in the design work, proved that it is an effective method to reach a better performance for reinforced concrete moment resisting frames with fixed base support.

Keywords: Performance-Based Plastic Design (PBPD); Reinforced Concrete Special Moment Frames (RC SMF); Soil-Pile-Structure Interaction (SPSI); P-Y Curve; Pushover Analysis

For citation. Mohamed AEM, Prokopov AYu. Performance-Based Plastic Design of a Reinforced Concrete Frame for Seismic Loads Considering the Soil-Pile-Structure Interaction. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2025;4(2):38–48. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-38-48

Оригинальное эмпирическое исследование

Расчет железобетонного каркаса на сейсмические нагрузки с учетом взаимодействия системы «грунт-свая-конструкция» в нелинейной постановке

Мохамед Абдельхамид Эльсаед Мохамед, А.Ю. Прокопов
Донской государственный технический университет, Ростов на Дону, Российская Федерация
✉ prokopov72@rambler.ru

Аннотация

Введение. В статье применен «метод пластического проектирования на основе эксплуатационных характеристик» (PBPD), который получил широкое распространение в зарубежной практике расчета и проектирования строительных конструкций в сейсмически опасных регионах. В качестве допустимых параметров используются предварительно выбранные значения смещений конструкций и текучести материалов. В данном исследовании были проанализированы специальные железобетонные «моментные» рамы (RC SMF) для высотных зданий, воспринимающих сейсмические нагрузки.

https://www.stsg-donstu.ru

© Мохамед Абдельхамид Эльсаед Мохамед, Прокопов А.Ю., 2025

Материалы и методы. Для анализа рассматривалось проектирование двух вариантов конструкций: первый — в соответствии с международными стандартами ACI-318/ASCE-07, второй – в соответствии с методом PBPD. Каркас из железобетонных рам RC SMF был объединен с ростверком и системой свайных фундаментов для создания модели взаимодействия «грунт-свая-конструкция» (SPSI-модель). Нелинейная передача боковой нагрузки от фундамента к грунту моделируется с помощью кривых P-Y (нагрузка – перемещение) для мягкопластичного глинистого грунта, рассматриваемого в данном исследовании.

Результаты исследования. Численные результаты, полученные с использованием условий модели взаимодействия грунта со сваями, сравнивались с результатами, соответствующими условиям неподвижного основания, по таким факторам, как фундаментальный период, прочность конструкции, горизонтальные и вертикальные перемещения узлов на разных этажах. Рамы, спроектированные с использованием метода PBPD, были менее подвержены влиянию взаимодействия системы «грунт-свая-конструкция» SPSI, хотя в целом имели более высокие значения армирования, чем рамы, спроектированные по действующим нормам (кодам).

Обсуждение и заключение. Метод PBPD как метод прямого проектирования конструкций, при котором в расчетной схеме изначально предполагается контроль смещения конструкций, доказал, что он обеспечивает наиболее корректные параметры железобетонных рам, воспринимающих моменты от проектных нагрузок при задании неподвижной опоры здания.

Ключевые слова: пластическое проектирование на основе эксплуатационных характеристик (PBPD); железобетонные специальные моментные рамы (RC SMF); взаимодействие «грунт-свая-конструкция» (SPSI); кривая P-Y; анализ продавливания

Для цитирования. Мохамед Абдельхамид Эльсаед Мохамед, Прокопов А.Ю. Расчет железобетонного каркаса на сейсмические нагрузки с учетом взаимодействия системы «грунт-свая-конструкция» в нелинейной постановке. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2025;4(2):38–48. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-38-48

Introduction. Performance-Based Plastic Design (PBPD) method was derived from the Performance based Seismic design PBSD method. Performance-based Plastic design method starting from the pre-defined performance objectives, in which the intended yield mechanism is achieved through performing plastic design. Plastic design controls drift and yielding of frame members from the beginning to minimize the lengthy iterations to reach the final design [1–7].

Soil-structure interaction (SSI) analysis simulates the combined response of the three connected systems: structure, foundation, and soil supporting the foundation. The ratio, h / (Vs T), is the structure-to-soil stiffness ratio, and can be used to determine when the soil-structure-interaction effect is significant so that h is approximately two-thirds of the building height, this height represents the center of mass height for the first mode shape, Vs is shear wave velocity of the soil, and T is the fundamental time period of the structure with fixed-base supports [8]. Soil-structure interaction can lengthen the structure time period significantly when structure-to-soil stiffness ratio exceeds 0.1, the change in time period will directly change the design base shear compared with fixed-base analysis [8 and 9]. In some cases when the increase in time period due to soil-structure interaction causes an increase in spectral acceleration, the SSI effect must be evaluated [10].

The numerical model that simulates the soil resistance to lateral displacement as predefined nonlinear springs is called *p–y* curve, where p is the soil pressure per unit length of the pile and y is the pile lateral deflection. The soil is represented by a series of nonlinear *p–y* curves that vary with depth and soil type. The *p–y* curves are used to relate pile deflections to the nonlinear soil reactions [11-13].

The Matlock theory [11] is used for laterally loaded piles in soft clays to determine *p–y* curves as illustrated in Equations 1 and 2. Fig. 1 presents the schematic shape of *p–y* curve for soft clay as per Matlock model. Nonlinear lateral load-transfer from the foundation to the soil is modeled using *p–y* curves generated by the PyPile v.0.6.3 software program for soft clay soil.

$$p = 0{,}5p_u\left(\frac{Y}{Y_{50}}\right)^{\frac{1}{3}}, \frac{Y}{Y_{50}} \le 8 \quad (1)$$

$$p = p_u, \frac{Y}{Y_{50}} > 8 \quad (2)$$

$$Y_{50} = 2{,}5\varepsilon_{50}D \quad . \quad (3)$$

where, ε_{50} is the strain which occurs at one-half the maximum stress on laboratory unconsolidated undrained compression tests of undisturbed soil samples, and D is the pile diameter.

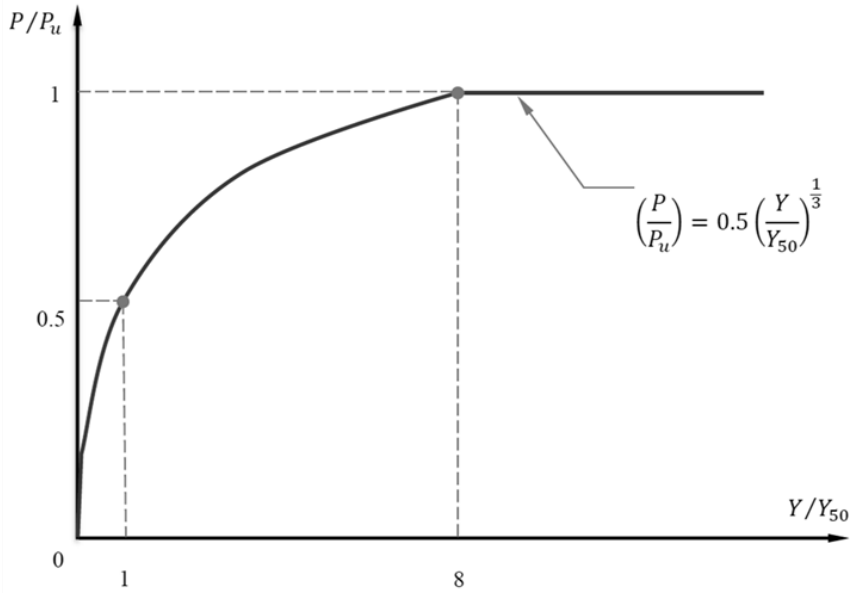


Fig. 1. Soft clay (Matlock) model

Materials and Methods

Statement of the Problem. Three baseline RC structures (8, 12 and 20-floor internal RC special moment frame structure) as used in the FEMA P695 [14], was selected for this study. The frames are used to support both vertical and lateral loads. These (code-based design) structures were redesigned by means of the PBPD approach as shown in Table 1 [1]. The baseline structure and the PBPD structure were subjected to extensive inelastic pushover analysis, then tested considering soil-pile-structure interaction (SPSI).

Input Data

The building is designed to sustain the following loading data:

– Design floor dead load = 8.38 kN/m^2 (175 psf).

– Design floor live load = 2.40 kN/m^2 (50 psf).

Material Properties

– Concrete cylinder compressive strength *fc*' = 34.5–41.4 MPa (5.0–6.0 ksi)

– Reinforcement rebar yield strength *fy* = 413.7 MPa (60.0 ksi)

Soil Properties

Soft clay soil is used for soil-pile-structure interaction modeling. Properties for this type of soil are as follows [15]:

– Dry Density = 17.50 kN/m^3

– Poisson's Ratio = 0.4

– Young's Modulus = 8 N/mm^2

Table 1

Building configuration and design parameters

Design Parameters	8–floor	12–floor	20–floor
ID Number	1012	1014	1021
Number of Floors	8	12	20
First Floor Height, m (ft)	4.572 (15)		
Upper Floor Height, m (ft)	3.962 (13)		
Bay Size, m (ft)	6.096 (20)		
Total Height, m (ft)	32.309 (106)	48.158 (158)	79.858 (262)
Code Compliant Base Shear, kN (kip)	418.1 (94)	547.1 (123)	907.4 (204)
PBPD Compliant Base Shear, kN (kip)	632.5 (142.2)	746 (167.7)	1567.1 (352.3)

Model Description. SAP2000 v20 software analysis package was used in this study to perform pushover analysis. Twelve models were produced as described in Table 2. 2D-models were created for each case and P-Delta effect was considered in all of them (Fig. 2). The foundation soil-pile system is modeled by replacing the support by thick shell elements representing pile cap supported on piles as indicated, and joined to link elements that simulates the soil resistance using p-y curves, in addition to a linear spring at the bottom end of the pile to provide a vertical support with elastic

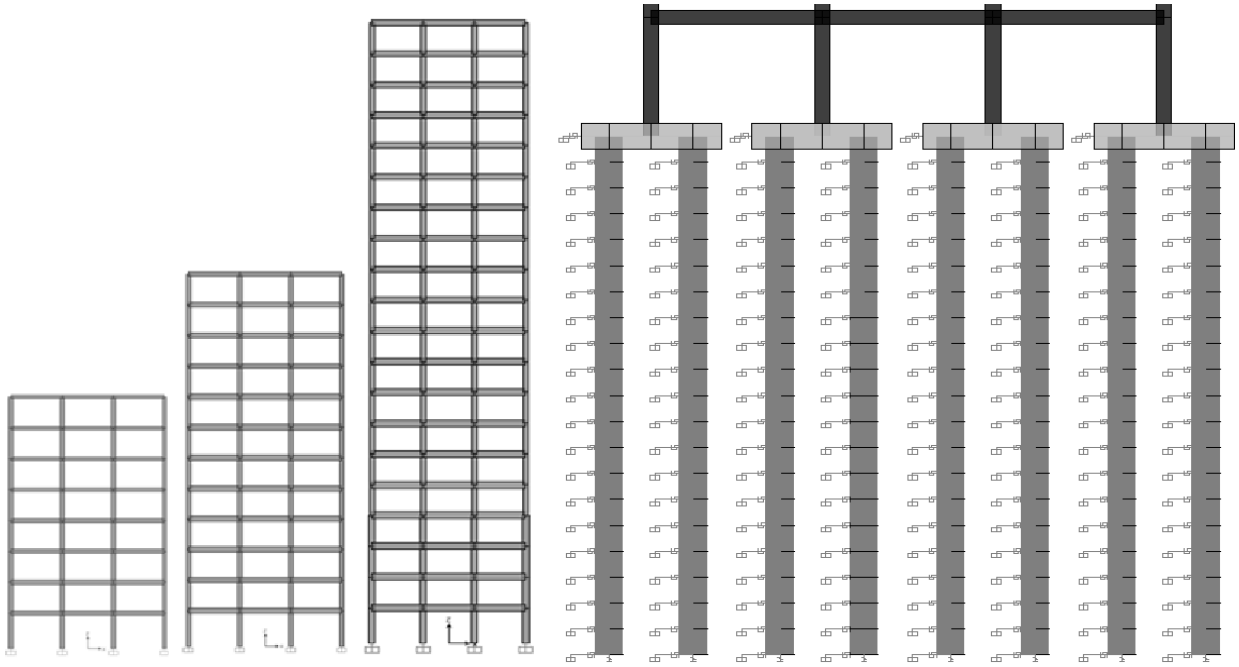
https://www.stsg-donstu.ru

stiffness equals pile capacity divided by 0.01 m as an accepted allowable settlement. For SPSI models, the piles were 20 and 25 m long for the 8- and (12-, 20-) floor buildings, respectively, and having a diameter of 1.0 m and 1.2 m for the (8-, 12-) and 20-floor buildings, respectively.

Table 2

Analysis models produced

Model Description	Design Following					
	The Code			PBPD		
	8	12	20	8	12	20
Without SPSI	√	√	√	√	√	√
With SPSI	√	√	√	√	√	√



a) *b)*

Fig. 2. 2D-models *a* — SAP2000 2D-Model – Without SPSI;
b — SAP2000 2D-Model – With SPSI

Results

Fundamental Time Period. Fundamental time period values for fixed-base structures and those with soil-pile-foundation system are listed in Table 3. Deep foundation is expected to provide a rigid support for the structure in the vertical direction, but the lateral stiffness of the system (soil-pile-foundation) is affected by the soil. The time period of frames used to study SPSI increased depending on structural flexibility (reflected by the building height). The frames designed using PBPD showed a smaller increase in time period than those designed following the code.

Table 3

Analysis models produced

Model Description	Design Following					
	Code			PBPD		
	8	12	20	8	12	20
Without SPSI	1.79	2.29	2.91	1.82	2.03	2.41
With SPSI	2.27	2.78	3.14	2.20	2.37	2.64
Percent increase	27 %	21 %	8 %	21 %	17 %	10 %

Drift and Displacement. The outputs of pushover analysis (P-Delta Curve) were used to compare the changes in the inter-floor drift and roof displacement. The maximum inter-story drift at the structural capacity, and roof displacement at the maximum base shear (reference to the base) were collected, summarized and presented in Table 4 and Fig. 3 and 4. Both inter-floor drift and roof displacement were affected by the soil flexibility. Frames designed using PBPD were less affected by SPSI, in spite of having greater values in general than those designed following the code.

Table 4

Maximum inter-floor drift ratios and roof displacement at the maximum base shear

Model Description	Design Following					
	The Code			PBPD		
	8	12	20	8	12	20
Max. Inter-Floor Drift						
Without SPSI	0.89%	0.86%	1.26%	1.87%	1.80%	1.67%
With SPSI	0.82%	0.92%	1.30%	1.88%	1.80%	1.70%
Max. roof displacement (m)						
Without SPSI	0.182	0.207	0.433	0.467	0.528	0.730
With SPSI	0.174	0.226	0.455	0.476	0.535	0.756

Capacity and Base Shear. As per FEMA 356 [10], structural performance level "Life Safety (LS)" means the post-earthquake damage state in which significant damage to the structure has occurred, but some margin against either partial or total structural collapse remains. While structural performance level "Collapse Prevention (CP)" means the post- earth-quake damage state in which the building is on the verge of partial or total collapse. However, all significant components of the gravity-load-resisting system must continue to carry their gravity load demands. Structural performance levels for allowable drift will not exceed 2% and 4% for LS and CP, respectively. In this study the allowable drift for CP will be limited to 3% only.

The P-Delta curves results from pushover analysis for all the 12 models, modified to be Base shear ratio versus Lateral drift ratio, are presented in Fig. 5 and 6. The structural capacity at a 2% drift ratio, a 3% drift ratio and the maximum capacity base shear are presented in Table 5 and 6.

In general, (for fixed-base frames) the frame capacity for frames designed using PBPD is less than that for those designed following the code, and exceeds the targeted design base shear. When introducing SSI into the equation, the capacity of all the frames depends on the soil flexibility.

Table 5

Structural capacity at a 2% drift ratio and at a 3% drift ratio of the structures

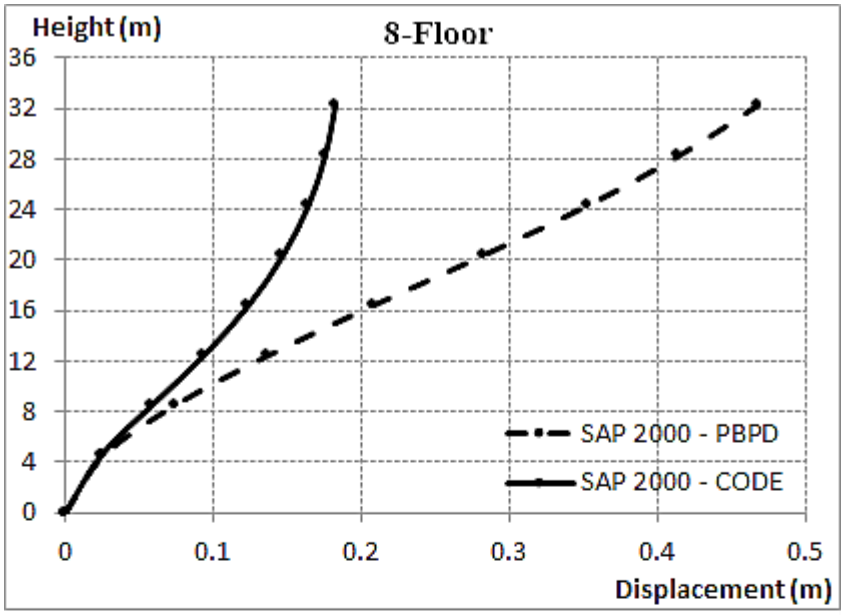
Model Description	Design Following					
	The Code			PBPD		
	8	12	20	8	12	20
Structural capacity at a 2% drift ratio						
Without SPSI	NR	NR	NR	685	812	1033
With SPSI	NR	NR	NR	685	812	1073
Structural capacity at a 3% drift ratio						
Without SPSI	NR	NR	NR	577	NR	NR
With SPSI	NR	NR	NR	577	NR	NR
NR = Not Reached, Structure did not maintain the capacity to this drift ratio						

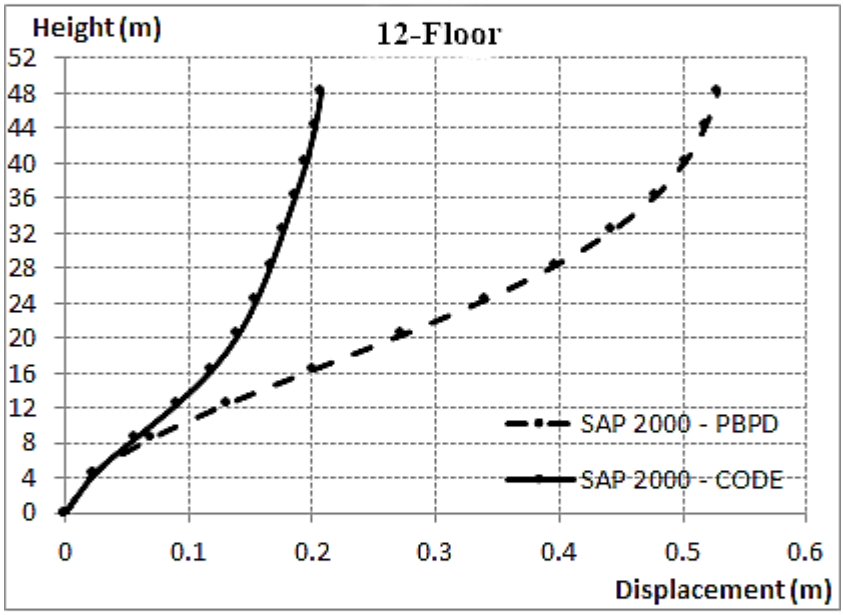
Table 6

Maximum capacity base shear of the structures

Model Description	Design Following					
	The Code			PBPD		
	8	12	20	8	12	20
Without SPSI	876	982	1520	714	902	1770
With SPSI	870	973	1508	707	891	1763

https://www.stsg-donstu.ru





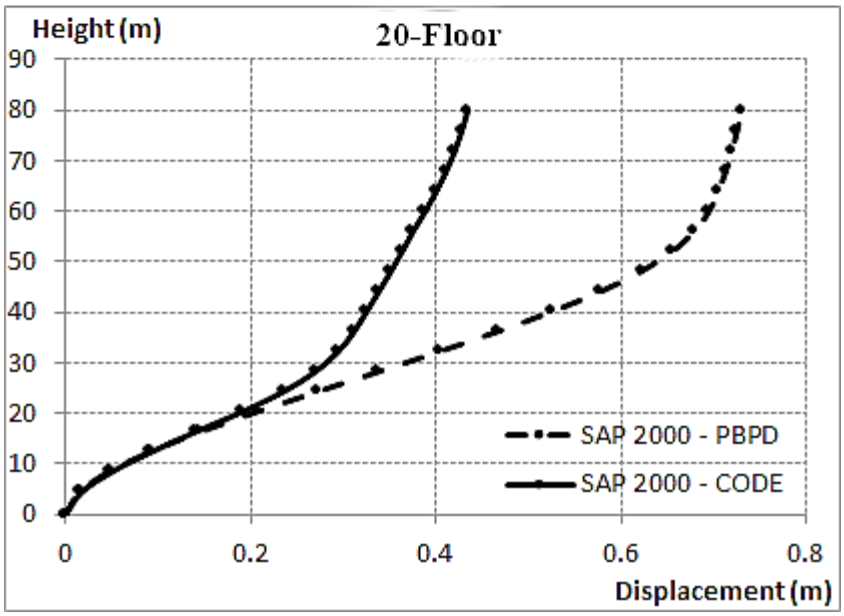


Fig. 3. Floor Displacement – Without SPSI – Fixed-base support, for 8-, 12- and 20- floor

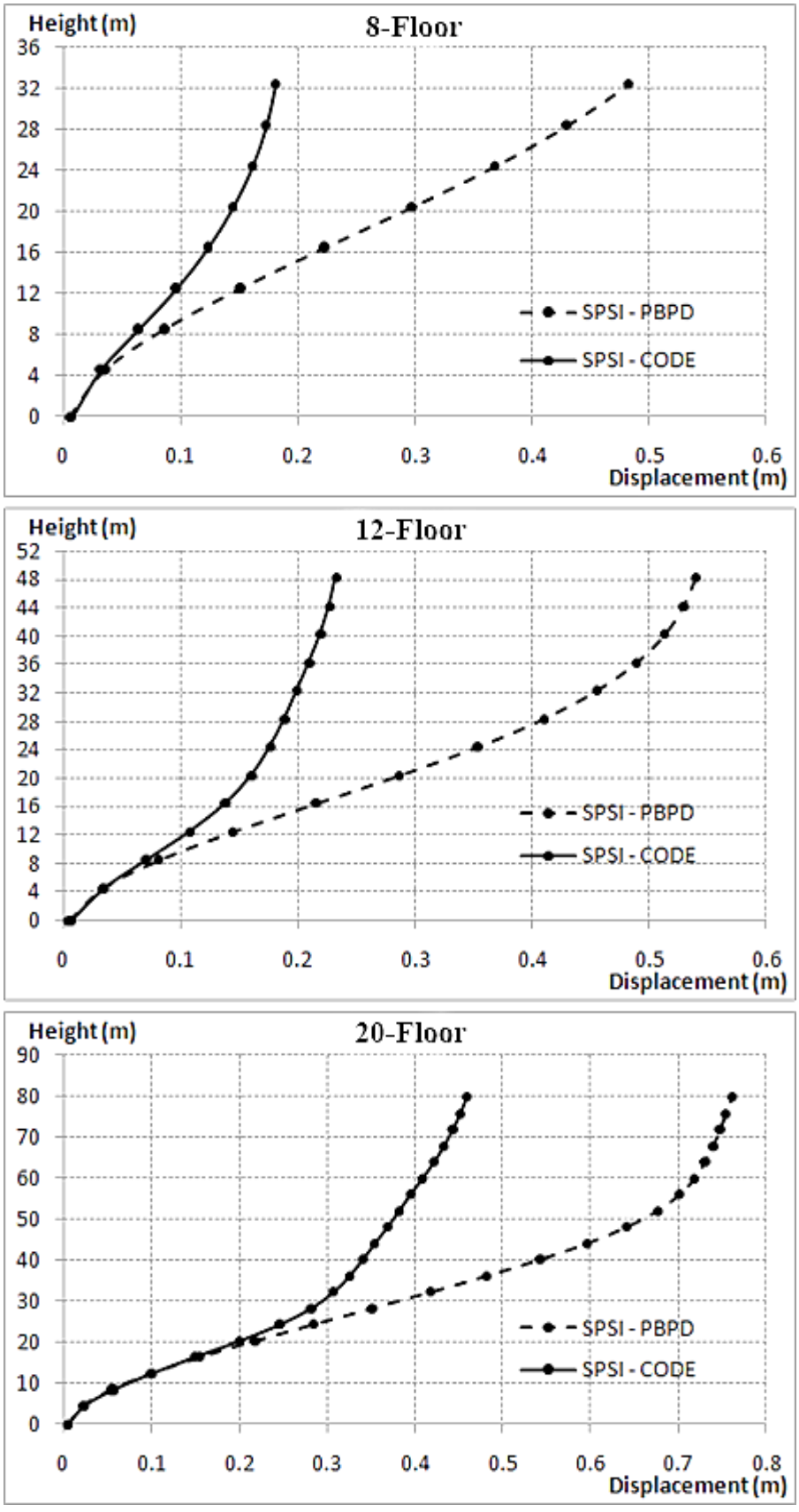


Fig. 4. Floor Displacement – With SPSI, for 8, 12 and 20 floor

https://www.stsg-donstu.ru

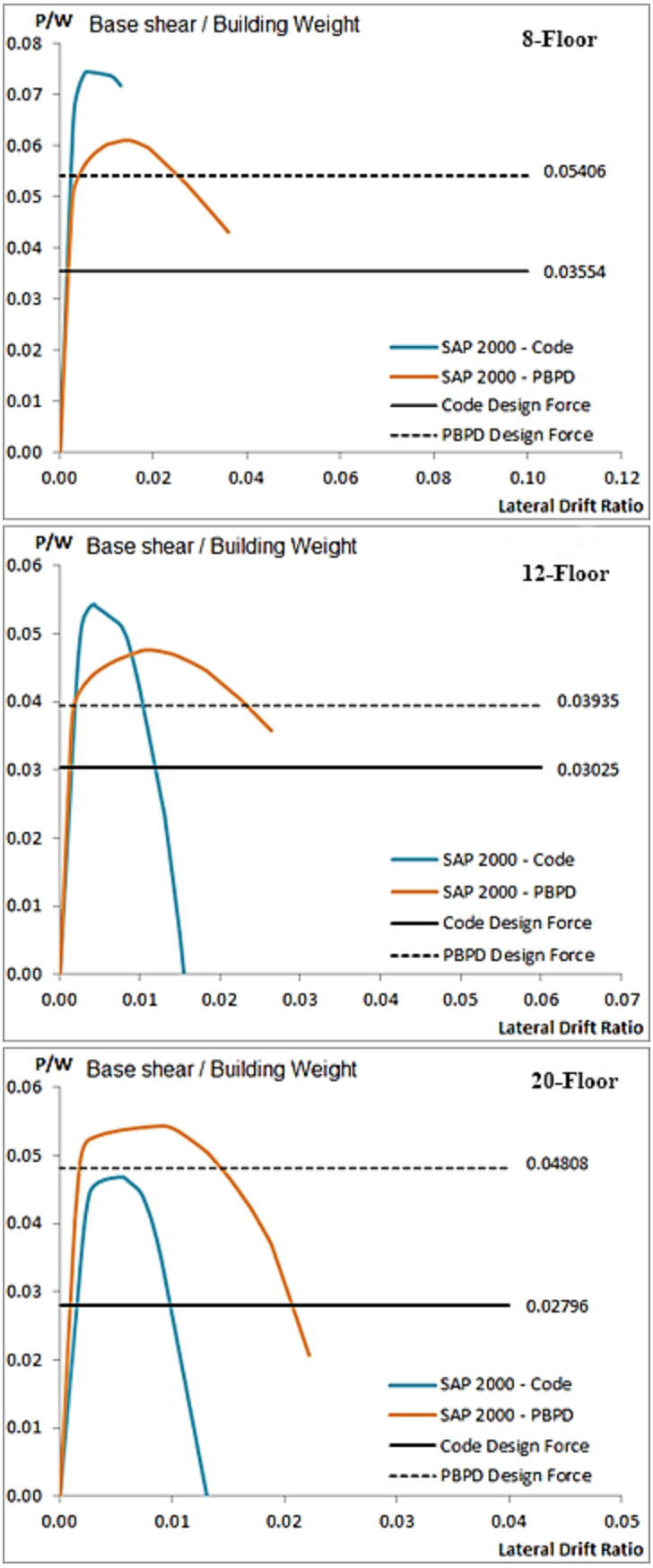


Fig. 5. Base shear ratio versus lateral drift ratio for a fixed base, for 8-, 12- and 20- floor

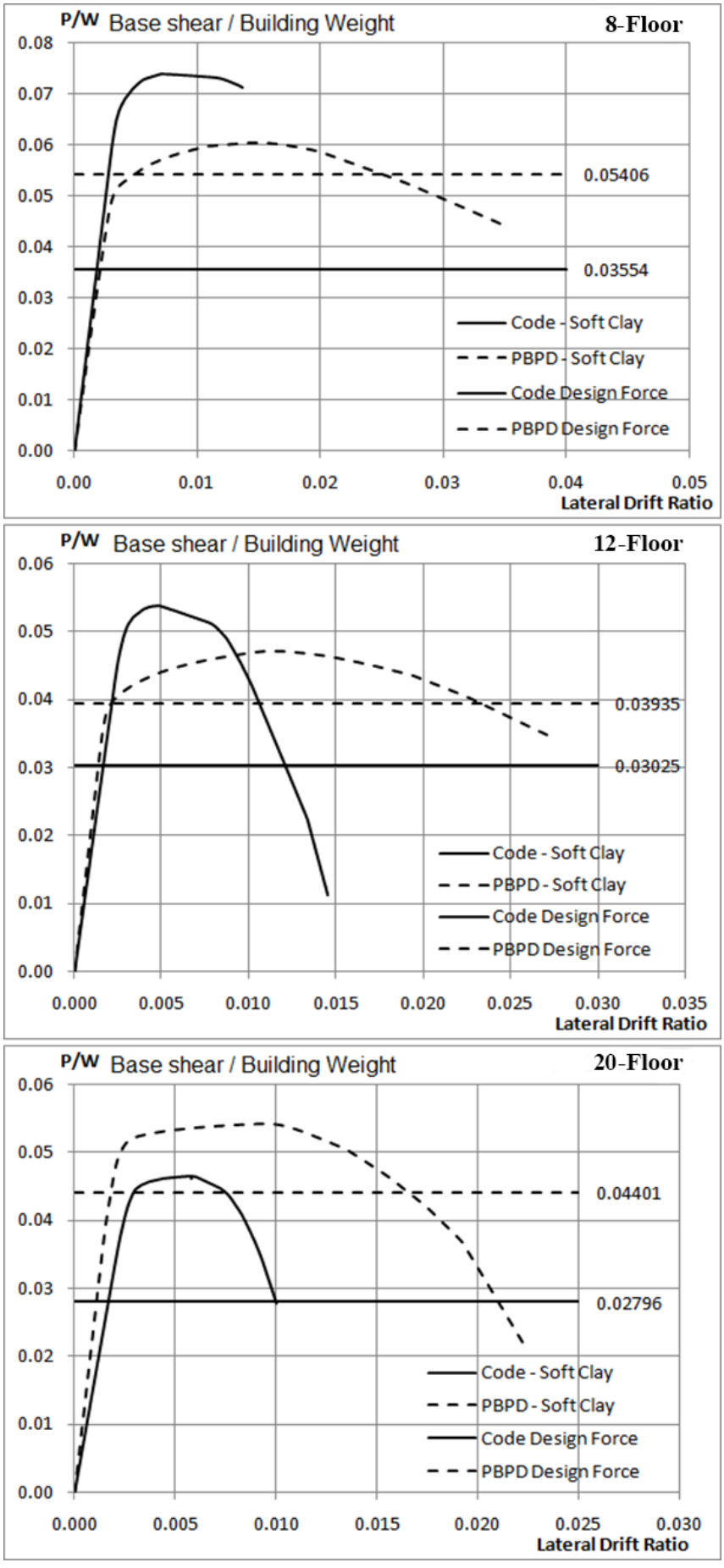


Fig. 6. Base shear ratio versus lateral drift ratio considering SPSI

https://www.stsg-donstu.ru

Discussion and Conclusion. The PBPD method as a direct design method where the drift control and the selection of yield mechanism are initially assumed in the design work proved that it is an effective method to reach a better performance for reinforced concrete moment resisting frames with a fixed-base support. It does not need lengthy iterations to achieve a suitable final design. On the other hand, considering the soil-structure interaction introduces other variables to the equation. SPSI can change the behavior of the fixed-base structure. This paper presents an assessment of the original code design and the PBPD methods to design RC SMF systems considering the soil-pile-structure interaction. The main conclusions are as follows.

1. *The Natural Time Period*
   - The natural time period varies significantly from a fixed-base to a flexible base structure (considering SPSI).
   - Considering SPSI leads to an increase in time period.
   - Time period due to SPSI increases as does the building height; while period lengthening decreases as the building height increases.
2. *Drift and Displacement*
   - The use of the PBPD method increases an inter-floor drift ratio.
   - Considering SPSI increases an inter-floor drift and roof displacement for both design methods.
3. *Capacity and Base shear*
   - PBPD can produce structures that meet preselected performance objectives in terms of the yield mechanism and target drift.
   - Frame capacity designed using PBPD is generally less than that of code elastic design.
   - Considering SPSI reduces the capacity of frames designed following the code elastic design and PBPD.

Frames with a fixed base and designed following the code elastic design failed to reach the 2% Life Safety drift limit and the 3% Collapse Prevention drift limit, while the one designed following PBPD method reached a capacity exceeding the design base shear, except in the case of the 20-floor structure. The 12-floor structure almost reached a 3% drift limit reaching 2.8%.

At a 2% Life Safety drift limit, frames designed using PBPD maintained its capacity, with minor loss in strength. When considering SPSI minor losses in strength occurs, except for the 20-floor structure where major strength loss happens.

For models following the code elastic design method, considering SPSI causes a significant loss in strength, ductility and a 3% drift limit is not reached. On the other hand, PBPD improves the ductility of the frames but did not reach a 3% drift limit at the ultimate drift, except in the case of the 8-floor structure.

Список литературы / References

1. Liao WC, Goel SC Performance-Based Seismic Design of RC SMF Using Target Drift and Yield Mechanism as Performance Criteria. *Advances in Structural Engineering*, 2014;17(4):529–542. https://doi.org/10.1260/1369-4332.17.4.529

2. Goel SC, Liao WC, Reza Bayat M, Chao SH Performance-Based Plastic Design (PBPD) Method for Earthquake-Resistant Structures: an Overview. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2010;19(1–2):115–137. https://doi.org/10.1002/tal.547

3. Banihashemi MR, Mirzagoltabar AR, Tavakoli HR Development of the Performance Based Plastic Design for Steel Moment Resistant Frame. *International Journal of Steel Structures*, 2015;15(1):51–62. https://doi.org/10.1007/s13296-015-3004-6

4. Banihashemi MR, Mirzagoltabar AR, Tavakoli HR Performance-Based P lastic D esign M ethod for S teel C oncentric B raced Frames. *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, 2015;7(3):281–293. https://doi.org/10.1007/s40091-015-0099-0

5. Goel SC, Chao SH, Leelataviwat S, Lee Soon-Sik Performance-Based Plastic Design (PBPD) Method for Earthquake-Resistant Structures. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. (2008, October 12–17). Beijing, China. https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_05-01-0036.PDF (accessed: 23.03.2024)

6. Lee SS, Goel SC, Chao SH Performance-Based Seismic Design of Steel Moment Frames Using Target Drift and Yield Mechanism. *13th World Conference on Earthquake Engineering*. (2004, August) Vancouver, BC: Canada. https://www.researchgate.net/publication/265099359_Performance-based_design_of_steel_moment_frames_using_target_drift_and_yield_mechanism (accessed: 23.03.2024)

7. Zameeruddin M, Sangle KK Review on Recent Developments in the Performance-Based Seismic Design of Reinforced Concrete Structures. Elsevier. *Structures*, 2016;6:119–133. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2016.03.001

8. Soil-Structure Interaction for Bbuilding S tructures. US Department of Commerce. NISTGCR 12-917-21, 2012. https://www.nist.gov/publications/soil-structure-interaction-building-structures (accessed: 22.03.2024)

9. Federal Emergency Management Agency. Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. FEMA 440, Applied Technology Council (ATC-55 Project). 2005.

10. Council BSS Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Report FEMA-356, Washington, DC. 2000.

11. Matlock H. Correlation for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay. *Offshore Technology in Civil Engineering's Hall of Fame Papers from the Early Years*, 1970:77–94. https://doi.org/10.4043/1204-ms

12. Boulanger RW, Curras CJ, Kutter BL, Wilson DW, Abghari A. Seismic Soil-Pile-Structure Interaction Experiments and Analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999;125(9):750–759. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:9(750)

13. Naggar MHE, Bentley KJ. Dynamic Analysis for Laterally Loaded Piles and Dynamic *p-y* Curves. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000;37(6):1166–1183. https://doi.org/10.1139/t00-058

14. Applied Technology Council. Quantification of Building Seismic Performance Factors. US Department of Homeland Security, *FEMA P-695*. 2009. https://nehrpsearch.nist.gov/static/files/FEMA/fema_p695.pdf (accessed: 22.03.2024)

15. Budhu M. *Soil Mechanics and Foundations*. John Wiley & Sons. 2008

Об авторах:

Мохамед Абдельхамид Эльсаед Мохамед, магистрант кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов Донского государственного технического университета (344003, Россияская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, Abdelhameed1443@gmail.com

Альберт Юрьевич Прокопов, заведующий кафедрой инженерной геологии, оснований и фундаментов Донского государственного технического университета (344003, Россияская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ResearcherID, ScopusID, ORCID, prokopov72@rambler.ru

Заявленный вклад авторов:

Мохамед Абдельхамид Эльсаед Мохамед: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, расчеты на математических моделях, формирование и оформление библиографического списка.

Прокопов А.Ю.: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, формулировка выводов и рекомендаций.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

Mohamed Abdelhamid Elsayed Mohamed, Master's student of the Department of Engineering Geology, Foundations and Foundations, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), ORCID, Abdelhameed1443@gmail.com

Albert Yu. Prokopov, Dr.Sci. (Eng), Professor, Head of the Engineering Geology, Footings and Foundations Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation, 344003), ResearcherID, ScopusID, ORCID, prokopov72@rambler.ru

Claimed contributorship:

Mohamed Abdelhamid Elsayed Mohamed: development of the idea, aims and objectives of the study, calculations, analysis and drawing conclusions, manuscript preparation, revision of the manuscript.

Prokopov AYu: scientific guidance, formation of the basic concept, revision of the manuscript; formulation of the conclusions and recommendations.

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 05.04.2024
Поступила после рецензирования / Revised 15.05.2024
Принята к публикации / Accepted 30.05.2024

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

CC BY

Check for updates

УДК 691.328.1

Оригинальное эмпирическое исследование

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-49-56

Оптимизация технологии производства сборного железобетона

Е.А. Шляхова ✉, **И.О. Егорочкина**

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

✉ shlyahovae@list.ru

EDN: EHEJVC

Аннотация

Введение. Статья посвящена проблемам повышения эффективности технологии производства сборного железобетона для решения задачи обеспечения требуемых показателей строительно-технических свойств продукции на действующих предприятиях строительной индустрии без дополнительных инвестиционных затрат на их реконструкцию и техническое перевооружение. Целью работы по повышению эффективности производства сборных железобетонных изделий является оптимизация параметров процессов приготовления бетонной смеси и тепловлажностной обработки изготавливаемой продукции за счет разработки двухстадийного способа приготовления бетонной смеси и внедрения в процесс тепловлажностной обработки ступенчатого режима.

Материалы и методы. В статье кратко излагаются содержательные аспекты оптимизации параметров технологических операций по приготовлению бетонной смеси и тепловлажностной обработки сборных железобетонных изделий на примере производства брусковых перемычек типа ПБ. В качестве базового объекта исследований принято производство сборных железобетонных изделий с использованием местных заполнителей с повышенным содержанием пылевато-глинистых частиц, предопределяющим увеличение расхода цемента.

Результаты исследования. Предложенная технология оптимизации режимов производства сборного железобетона позволяет на действующих предприятиях стройиндустрии без дополнительных материальных и инвестиционных затрат на реконструкцию и техническое перевооружение снизить расход цемента и добавки суперпластификатора при использовании местных заполнителей с повышенным содержанием пылевато-глинистых частиц.

Обсуждение и заключение. Применение комплекса разрабатываемых мероприятий улучшает условия бездефектного структурообразования бетона и обеспечивает возможность снижения расхода наиболее дорогостоящих компонентов бетонной смеси — цемента и химической добавки суперпластификатора. Оптимизация технологии производства сборного железобетона обеспечивает направленное структурообразование бетона и достижение на этой основе нормируемых показателей качества продукции. В каждом конкретном случае оптимизации технологических решений на каждом конкретном предприятии обязательным условием является корректировка предложенных в работе рецептурно-технологических решений. Дополнительным эффектом от внедрения разработанных в настоящих исследованиях технологических приемов будет повышение показателей экологического состояния окружающей среды и снижение затрат на обогащение местных заполнителей.

Ключевые слова: технология сборного железобетона, приготовление бетонной смеси, тепловлажностная обработка, оптимизация, повышение качества

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

Для цитирования. Шляхова Е.А., Егорочкина И.О. Оптимизация технологии производства сборного железобетона. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(2):49–56. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-49-56

© Шляхова Е.А., Егорочкина И.О., 2025

Original Empirical Research

Optimization of precast concrete production technology

Elena A. Shlyakhova ✉, **Inna O. Egorochkina**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ shlyahovae@list.ru

Abstract

Introduction. The article deals with the problems of increasing the efficiency of precast concrete production technology in order to solve the issue of ensuring the required indicators of construction and technical properties of products at existing enterprises of the construction industry with no additional investment costs for their reconstruction and technical re-equipment. The aim of the work of increasing the efficiency of the production of precast reinforced concrete products is to optimize the parameters of the processes of preparing the concrete mixture as well as heat and humidity treatment of manufactured products by means of developing a two-stage method of preparing the concrete mixture and introducing a step-by-step mode into heat and humidity treatment.

Materials and Methods. The article provides a brief description of the substantive aspects of optimizing the parameters of technological operations for the preparation of concrete mixtures as well as heat and moisture treatment of precast reinforced concrete products using the example of the production of PB-type bar bridges. The manufacturing of precast reinforced concrete products using local aggregates with a high content of dusty clay particles, which determines an increase in cement consumption, is accepted as the basic object of the research.

Research Results. The proposed technology for optimizing the production modes of precast reinforced concrete makes it possible to reduce the consumption of cement and superplasticizer additives at the existing enterprises of the construction industry with no additional material and investment costs for reconstruction and technical re-equipment while using local aggregates with a high content of dusty clay particles.

Discussion and Conclusion. The application of the set of measures being developed improves the conditions for defect–free structuring of concrete and makes it possible to reduce the consumption of the most costly components of the concrete mixture, i.e., cement and the chemical additive superplasticizer. Optimization of the precast concrete production technology ensures the directed structuring of concrete and the achievement of standardized product quality indicators. In each specific case of optimizing technological solutions at each specific enterprise, it is a prerequisite to adjust the prescription and technological solutions put forward in the study. An additional effect of the implementation of the technological techniques developed in the study will be an increase in the indicators of the ecological state of the environment and a reduction in the cost of enriching local aggregates.

Keywords*:* precast concrete technology, preparation of concrete mix, heat and moisture treatment, optimization, quality improvement

Acknowledgements. The authors appreciate the reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions helped to significantly improve the quality of this article.

For citation. Shlyakhova EA, Egorochkina IO Optimization of Precast Concrete Production Technology. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2025;4(2):49–56. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-49-56

Введение. Железобетон как сборный, так и монолитный является в настоящее время основным строительным материалом и в обозримой перспективе таковым останется [1, 2]. Актуальность проблемы повышения эффективности технологии производства сборного железобетона на предприятиях стройиндустрии обусловлена тем, что его использование позволяет резко сократить сроки возведения, монтажа строительных объектов и введения их в эксплуатацию. При этом следует отметить одно из обязательных условий изготовления железобетонных конструкций — обеспечение надлежащего качества строительной продукции.

Ускоренный набор прочности в заводских условиях обеспечивается за счет различных видов тепловой обработки изготавливаемых железобетонных изделий и конструкций. Однако ускоренное структурообразование бетона сборных изделий и конструкций в условиях тепловлажностной обработки (ТВО) зачастую приводит к снижению качества продукции и долговечности возводимых зданий и сооружений [3]. Снизить отрицательное воздействие ускоренного твердения бетона за счет тепловлажностной обработки возможно за счет стадийного ступенчатого повышения температуры в пропарочных камерах [4]. Этот прием позволяет сохранить целостность структуры бетона, обеспечить нормируемые показатели качества железобетона. Негативные явления от тепловлажностной обработки особенно усиливаются при использовании местных заполнителей с повышенным содержанием пылеватых и глинистых частиц (ПГЧ) [5–7].

Устранить эти недостатки заполнителей возможно путем их промывки и обогащения [8]. Однако это не только удорожает заполнители, но и требует решения проблемы утилизации промывочных вод и пылевидных отходов, а также выделения дополнительных площадей для хранения промытых заполнителей.

В результате многочисленных исследований разработаны весьма эффективные способы активации заполнителей с использованием специального оборудования [9–11]. Однако их широкое промышленное применение сдерживается необходимостью больших затрат на реконструкцию и техническое перевооружение действующих предприятий стройиндустрии.

Чаще всего недостатки местной сырьевой базы заполнителей компенсируют повышенным расходом цемента, являющимся наиболее дорогостоящим и сравнительно дефицитным компонентом бетонной смеси [12, 13].

Целью настоящих исследований была поставлена разработка методов повышения эффективности технологии сборного железобетона на действующих предприятиях стройиндустрии без их реконструкции и технического перевооружения, а также без перерасхода цемента.

Исследования проводились на действующем предприятии города Ростова-на-Дону ООО «ТД «КСМ 10»» на примере производства железобетонных брусковых перемычек типа ПБ, относящихся к категории сборных изделий массового применения в жилищном, гражданском и промышленном строительстве.

На основе анализа предшествующих работ [12–14] для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

– разработка и оптимизация технологических параметров двухстадийного приготовления бетонной смеси;

– разработка ступенчатого режима тепловлажностной обработки изделий;

– оценка эколого-экономической результативности исследований;

– определение перспективной области применения полученных результатов.

Материалы и методы. В качестве базового варианта было принято производство сборных железобетонных перемычек типа ПБ. Для изделий данного вида принят класс бетона по прочности на сжатие В15, что при нормативном коэффициенте вариации 13 % составляет 19,2 МПа. Прочность бетона после тепловлажностной обработки (ТВО) нормируется в зависимости от времени года:

– в холодное время года — $R_{тво}$ не менее 15,4 МПа (80 % от проектного класса прочности);

– в теплое время года — $R_{тво}$ не менее 13,4 МПа (70 % от проектного класса прочности).

Марка бетонной смеси по удобоукладываемости для изготовления перемычек в соответствии с действующей на заводе ООО «ТД «КСМ 10»» технологией принята П2. Это составляет 5–9 см при оценке подвижности по осадке бетонной смеси стандартного конуса (ОК).

Расход материалов на 1 кубометр бетонной смеси для изготовления перемычек приведен в таблице 1.

Таблица 1

Расход материалов

Вид материала	Единица измерения	Количество
Цемент ЦЕМ I 42,5	кг/м^3	260
Песок кварцевый	кг/м^3	750
Щебень фракции 5–20 мм	кг/м^3	1200
Вода	л/м^3	190
Добавка суперпластификатор ST BV2, % (Ц)	%/кг/м^3	2,0/5,6

В качестве вяжущего вещества был взят портландцемент без добавок нормальнотвердеющий ЦЕМ I 42,5Н ЖИ, соответствующий требованиям ГОСТ 55224-2020, произведённый на заводе Евроцемент АО «Мордовцемент».

В качестве мелкого заполнителя был взят карьерный кварцевый песок с модулем крупности $М_{кр}$ = 1,1.

Основные характеристики песка:

– насыпная плотность в сухом состоянии — 1530 кг/м^3;

– содержание пылевидных и глинистых частиц — 5,2 %;

– модуль крупности песка — 1,1.

Поставляемый песок в основном отвечает требованиям ГОСТ 8736, по модулю крупности песок относится к группе очень мелкого песка.

Вредные примеси в песке отсутствуют, ПГЧ превышают допустимые ГОСТом пределы (для очень мелких — не более 5 %).

Песок может быть использован для приготовления бетонных смесей в соответствии с положением ГОСТ 26633 в том случае, если подтвердится прямыми испытаниями в бетоне эффективность его применения.

Крупный заполнитель — местный щебень из песчаника — доставляется на предприятие железнодорожным транспортом в виде фракции 5–20 мм. Материалы соответствуют требованиям ГОСТ 26633.

Основные характеристики щебня:

– истинная плотность — 2,67 г/см^3;

– насыпная плотность — 1,46 т/м^3;

– пустотность — 45,3 %;

– водопоглощение — 1,2 %.

Содержание пылевидных и глинистых частиц — 0,40 %; зёрен слабых пород — 0,3 %; зёрен пластинчатой и игловатой формы — 10,73 %; глины в комках — отсутствует. Содержание аморфных разновидностей SiO_2 — 17,6 ммоль/л; содержание сульфидов и сульфатов в пересчёте на SO_3 — 0,07 %; содержание галоидных соединений в пересчёте на ион хлора Cl^- — 0,02 %. Марка щебня по прочности (по дробимости в цилиндре) 1000 позволяет готовить бетоны класса В10; В15; В20; В22,5; В27,5. Марка щебня по морозостойкости — F200, истираемость — И-1. Содержание в заполнителе естественных радионуклидов Аэфф составляет 115 ± 15 Бк/кг.

Для изготовления бетонных смесей на действующем предприятии ООО «ТД «КСМ 10» используется комплексная химическая добавка — суперпластификатор ST BV2 с эффектом ускорения твердения. Поставщик добавки — ООО «Бетонные строительные решения», г. Санкт Петербург. В соответствии с рекомендациями изготовителя добавки основная область ее применения — для железобетонных и бетонных конструкций, твердеющих в условиях тепловой обработки. Добавка не снижает защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре. Добавка доставляется автотранспортом в виде жидкости от прозрачно-желтого до светло-коричневого цвета 30 %-ой концентрации. Суперпластификатор ST BV2 вводится в бетонные и растворные смеси в виде рабочего раствора в количестве 0,1–1,2 % массы цемента в пересчете на сухое вещество.

Вода (чистая водопроводная) подаётся на предприятие от городской водопроводной сети. Вода, используемая для затворения бетонных и растворных смесей, не содержит вредных примесей, препятствующих нормальному схватыванию и твердению цемента, и соответствует требованиям ГОСТ 23732.

Для получения данных, сопоставимых с литературными, а также с базовыми производственными, в исследованиях применяли стандартные методы испытаний материалов и бетонных образцов.

Технологии совершенствования способов приготовления бетонных смесей, в том числе на низкокачественных заполнителях, достаточно хорошо освещаются отечественными и зарубежными исследователями [14–16]. Основной причиной того, что результаты этих исследований не нашли широкого распространения, была необходимость дополнительных затрат на техническое перевооружение действующих предприятий стройиндустрии.

Кроме того, предложенные способы зачастую характеризуются увеличением продолжительности гомогенизации смеси и снижением производительности бетоносмесителей и бетоносмесительных цехов.

В свое время при непосредственном участии Е.А. Шляховой был разработан двухстадийный способ приготовления бетонных смесей, лишенный указанных недостатков. Сущность этого способа заключается в предварительной обработке заполнителей с повышенным содержанием загрязняющих пылевато-глинистых частиц в бетоносмесителе частью воды затворения с добавкой поверхностно-активного отхода производства пентаэритрита Рубежанского химкомбината. В связи с необходимостью решения проблемы импортозамещения одной из задач данных исследований было изучение возможности замены отходов пентаэритрита доступными добавками ПАВ, в первую очередь, используемым на базовом производстве суперпластификатором ST BV2.

Для получения сравнительных данных исследуемые бетонные смеси готовили традиционным одностадийным способом перемешивания и разрабатываемым двухстадийным. Отформованные сравниваемые образцы-балочки размерами 40×40×160 мм после двухчасовой предварительной выдержки подвергали тепловлажностной обработке с температурой изотермической выдержки 80 ºС по базовому, принятому на производстве, режиму.

Для образцов с оптимальными постадийными расходами исследуемых компонентов бетонной смеси был разработан ступенчатый график тепловлажностной обработки, предусматривающий промежуточный период выдержки бетона. Двухступенчатый график тепловлажностной обработки состоял из нескольких этапов, длительность которых приведена в таблице 2.

https://www.stsg-donstu.ru

Таблица 2

Основные параметры тепловлажностной обработки

Параметры	Обозначение	Величина
Длительность предварительной выдержки (при t = 20–25 ºС), ч	$\tau_в$	2
Температура изотермического прогрева, ºС	$t_{из}$	80
Скорость подъема температуры, ºС/ч	v	15–20
Длительность периода подъёма температуры (1 ступень ТВО), ч	$\tau^1_п$	1
Температура изотермического обогрева (1 ступень ТВО), ºС	$t^1_{из}$	40
Длительность изотермического обогрева (1 ступень ТВО), ч	$\tau^1_{из}$	1
Длительность периода подъёма температуры (2 ступень ТВО), ч	$\tau^2_п$	2
Температура изотермического обогрева (2 ступень ТВО), ºС	$t^2_{из}$	80
Длительность изотермического обогрева (2 ступень ТВО), ч	$\tau^2_{из}$	4
Длительность остывания после ТВО, ч	$\tau_{ост}$	2
Температура бетона после остывания, ºС	$t_{ост}$	40

Результаты исследования. Экспериментально проверена эффективность предлагаемого двухстадийного способа приготовления бетонных смесей. В качестве контрольного (базового) принят традиционный одностадийный способ. Результаты исследований приведены в табличной форме (таблица 3).

Таблица 3

Результаты сравнительной оценки способов приготовления бетонных смесей для бетона перемычек

Способ приготовления бетонной смеси	Расход материалов, кг/м³ / %				Дозировка добавки, % Ц / кг/м³	Режим ТВО	Прочность при сжатии, МПа / % В15	
	Ц	П	Щ	В			после ТВО	через 28 суток
Базовый	260 / 100	750 / 100	1200 / 100	190 / 100	0,8 / 2,0	базовый	13,6 / 71	19,6 / 102
Двухстадийный: I стадия	0	750 / 100	1200 / 100	75 / 40	0,2 / 0,5	базовый	15,2 / 78	22,8 / 116
II стадия	260 / 100	0	0	115 / 60	0,6 / 1,5			
Двухстадийный: I стадия	0	750 / 100	1200 / 100	70 / 40	0,2 / 0,4	ступен-чатый	14,3 / 73	20,1 / 105
II стадия	220 / 85	0	0	110 / 60	0,6 / 1,3			

Как видно из данных, приведенных в таблице 3, применение двухстадийного способа приготовления бетонной смеси по сравнению с базовым повысило прочность бетона после ТВО на 7 % (с 13,6 до 15,2 МПа) и на 14 % — в возрасте 28 суток (с 19,6 до 22,8 МПа). Это дало основание для снижения расхода цемента на 15 % (с 260 до 220 кг/м³) и суммарного расхода добавки суперпластификатора с 2,0 до 1,7 кг/м³ без потери прочности по сравнению с базовым вариантом как после ТВО, так и в возрасте 28 суток.

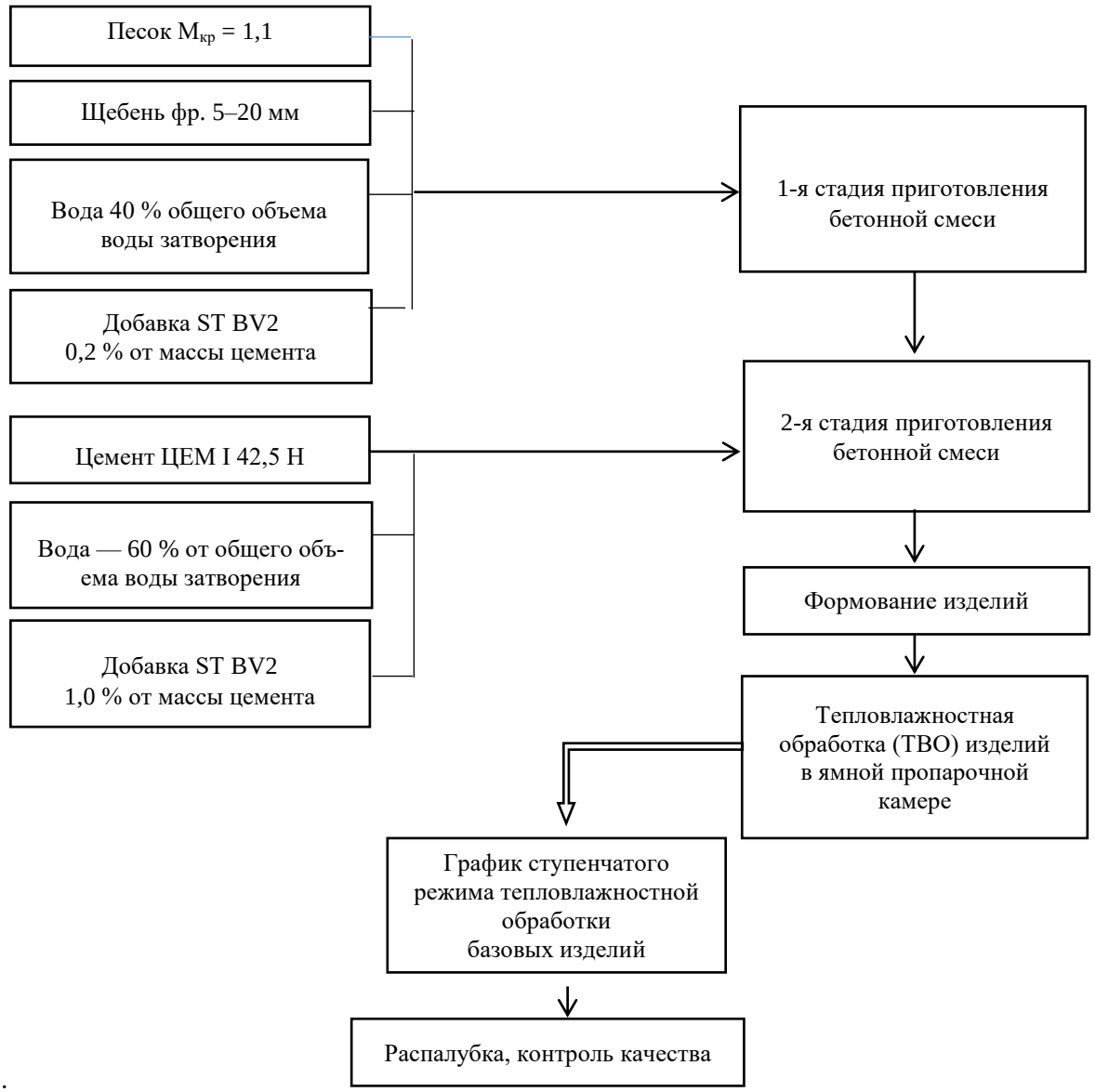
Обсуждение и заключение. Суть разработанного двухстадийного способа приготовления бетонной смеси для базовых изделий заключается в том, что на первой стадии приготовления бетонной смеси в бетоносмесителе перемешивают заполнители с частью воды затворения и добавки ST BV2. На второй стадии к этой смеси добавляют цемент, остальную часть воды затворения и добавки суперпластификатора, после чего осуществляют окончательное перемешивание всех компонентов до получения однородной бетонной смеси требуемой удобоукладываемости.

В результате экспериментальных исследований с варьированием в достаточно широких пределах расходов воды затворения и добавки суперпластификатора на каждой стадии приготовления бетонной смеси были установлены оптимальные значения указанных факторов: на первой стадии вводится 40 % от общего расхода воды затворения и 0,2 % добавки ST BV2 (в расчете на безводное вещество) от массы цемента; на второй стадии приготовления бетонной смеси вводили остальные части воды затворения и добавки.

Изготовление изделий осуществлялось по агрегатно-поточной технологии производства с использованием стандартного технологического оборудования. Доставка бетонной смеси осуществлялась с помощью заводского миксера объемом 5 м³. Высота выгрузки бетонной смеси не превышала 100 см во избежание ее расслоения и ухудшения технологических свойств.

Для тепловлажностной обработки изделий использовалась ямная пропарочная камера с подачей в качестве теплоносителя нагретого пара от выносной котельной. Полный цикл процессов твердения состоит из ступенчатого подъема температуры с периодами начальной и промежуточной выдержки бетонной смеси с последующим периодом изотермической выдержки изделий при максимальной температуре 80 ºС. Такой прием позволяет нивелировать неравномерность температурного поля по сечению изделия, тем самым стабилизировать кинетику химических реакций и значительно снизить деструктивные процессы в структуре материала. Тепловлажностная обработка ведется до достижения 70 % проектной прочности бетона.

В общем виде технологическая блок-схема двухстадийного способа приготовления бетонной смеси для базовых изделий представлена на рис. 1.



.

Рис. 1. Блок-схема двухстадийного способа приготовления бетонной смеси для железобетонных изделий заводского изготовления

Разработанные в соответствии с поставленной целью исследований способы повышения эффективности технологии сборного железобетона на примере производства перемычек для перекрытия оконных и дверных проемов жилых, гражданских и промышленных зданий позволяют на действующих предприятиях стройиндустрии без дополнительных затрат на реконструкцию и техническое перевооружение снизить на 15 % расход цемента и на 0,3 кг/м^3 уменьшить расход суперпластификатора без ухудшения качества продукции.

Предложенные способы повышения эффективности технологии производства беспрепятственно распространяются на большинство сборных железобетонных изделий и конструкций. При этом в каждом конкретном случае требуется корректировка рецептурно-технологических решений с учетом требований к продукции, местной сы-

https://www.stsg-donstu.ru

рьевой базы и специфики действующего предприятия. Такая корректировка может выполняться силами и средствами заводской лаборатории.

Помимо экономического эффекта непосредственно на предприятии стройиндустрии предложенные методы будут способствовать улучшению экологического состояния окружающей среды и снижению затрат на обогащение местных заполнителей и утилизацию образующихся при этом отходов.

Список литературы/References

1. Фотин О.В. Строительство из сборного железобетона. *Строительные материалы.* 2023;4:32–34. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-32-34

Fotin OV Construction of Precast Reinforced Concrete. *Building Materials*. 2023;4:32–34, (In Russ.) https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-32-34

2. Давидюк А.Н. Бетон в строительстве — новые вызовы и перспективы. *Вестник НИЦ Строительство.* 2017;1(12):5–13. URL: https://elibrary.ru/item.asp?edn=YINMWP&ysclid=m830uuh8d0610542454 (дата обращения 14.04.2025).

Davidyuk AN Concrete in Construction - New Challenges and Prospects. *Bulletin of NIC Construction*. 2017;1(12):5–13. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?edn=YINMWP&ysclid=m830uuh8d0610542454 (accessed: 14.04.2025).

3. Елишев К.С. Формирование структуры тяжёлого бетона для производства стеновых панелей. *The Scientific Heritage*. 2021;78-1(78):13–15. https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-78-1-13-15

Yelishev KS Formation of the Structure of Heavy Concrete for the Production of Wall Panels. *The Scientific Heritage*. 2021;78-1(78):13–15. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-78-1-13-15

4. Зеленковская Ж.Л., Ковшар С.Н. Назначение и обоснование традиционных режимов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий. *Наука и техника.* 2023;22(2):150–157. https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-150-157

Zelenkovskaya ZhL, Kovshar SN Purpose and Justification of Traditional Modes of Heat Treatment of Concrete and Reinforced Concrete Products. *Science & Technique*. 2023;22(2):150–157. (In Russ.) https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-150-157

5. Serebryanaya I, Egorochkina I, Shlyakhova E, Matrosov A Investigation of the Contact Zone Between Cement Stone and Various Types of Aggregates in Concrete. *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles.* 2022;509:1615–1622. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11058-0_164

6. Bazhenov YuM, Murtazaev S-AYu, Bataev DK-S High-strength concretes based on anthropogenic raw materials for earthquake resistant high-rise construction. *Engineering Solid Mechanics.* 2021;9(3):335–346. https://doi.org/10.5267/j.esm.2021.1.004

7. Джабаров А.С., Белов В.В. Отсев как альтернатива применяемым заполнителям для бетона. *Строительные материалы*. 2024;5:28–33. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-824-5-28-33

Dzhabarov AS, Belov VV Screening as an Alternative to the Used Aggregates for Concrete. *Building Materials*. 2024;5:28–33. (In Russ.) https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-824-5-28-33

8. Курбатов В.Л., Печеный Б.Г., Киреев В.Г., Комарова Н.Д. Влияние загрязняющих примесей в заполнителях на свойства бетонных смесей и бетонов. *Современные наукоемкие технологии.* 2017;9:34–41. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36797 (дата обращения 14.04.2025).

Kurbatov VL, Pecheny BG, Kireev VG, Komarova ND Influence of Pollutants in Aggregates on the Properties of Concrete Mixtures and Concretes. *Modern Science-Intensive Technologies*. 2017;9:34–41. (In Russ.) URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36797 (accessed: 14.04.2025).

9. Fediuk R, Mochalov A, Timokhin R Review of methods for activation of binder and concrete mixes. *AIMS Mater. Sci.* 2018;5(5):916–931. https://doi.org/10.3934/matersci.2018.5.916

10. Лотов В.А., Сударев Е.А., Кутугин В.А. Предварительная активация цементно-песчаной смеси с целью повышения прочности бетона. *Химия и химическая технология.* 2022;65(8):94–101. https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226508.6595

Lotov VA, Sukharev EA, Kutugin VA Preliminary Activation of a Cement-Sand Mixture in Order to Increase the Strength of Concrete. *Izv. vuzov. Chemistry and Chemical Technology*. 2022;65(8):94–101. (In Russ.) https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226508.6595

11. Ibragimov R, Fediuk R. Improving the early strength of concrete: Effect of mechanochemical activation of the cementitious suspension and using of various superplasticizers. *Construct. Build. Mater.* 2019;226:839–848. https://doi.org/10.1016/j. conbuildmat.2019.07.313

12. Velichko E, Polkovnikov N, Sadchikova Yu. Efficient concrete increased water resistance modified with mineral and polymeric additives. *E3S Web of Conferences*. 2019;97:02017. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199702017

13. Несветаев Г.В., Лопатина Ю.Ю. Проектирование макроструктуры самоуплотняющейся бетонной смеси и её растворной составляющей. *Науковедение.* 2015;7(5). http://dx.doi.org/10.15862/48TVN515

Nesvetaev GV, Lopatina YuYu Design of Macrostructure of Self-Compacting Concrete and its Mortar Component. *Internet Magazine "Naukovedenie"* 2015;7(5). (In Russ.) http://dx.doi.org/10.15862/48TVN515

14. Шляхова Е.А. *Способ приготовления бетонной смеси*. Патент на изобретение № RU2714895C1. 2020.

Shlyahova EA *Method of Preparing Concrete Mixture.* Patent RU 2714895 C1 (2020) (In Russ.)

15. Саканов Д.К., Чистова Т.А. Эффективные заполнители для верхнего слоя бетонных покрытий. *Проблемы современного бетона и железобетона*. 2016;8:213–224. https://doi.org/10.23746/2016-8-12

Sakanov DK Effective Massive Aggregates for Top Layer of Concrete Pavement. *Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete.* 2016;8:213–224. https://doi.org/10.23746/2016-8-12

16. Кадырова Д.Ш., Сайдуллаев А.Б. Прочностные и деформативные свойства бетонов на основе местного сырья и отходов промышленности. *Современное промышленное и гражданское строительство*. 2021;17(2):93–101. URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2021-2/03_kadyrova_saydullaev.pdf (дата обращения 14.04.2025).

Kadyrova DSh Strength and Deformative Properties of Concrete Based on Local Raw Materials and Industrial Waste. *Modern Industrial and Civil Construction*. (In Russ.) 2021;17(2):93–101. URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2021-2/03_kadyrova_saydullaev.pdf (accessed: 14.04.2025).

Об авторах:

Елена Альбертовна Шляхова, кандидат технических наук, доцент кафедры технологического инжиниринга и экспертизы в стройиндустрии Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162), ScopusID, ORCID, shlyahovae@list.ru

Инна Олеговна Егорочкина, кандидат технических наук, доцент кафедры технологического инжиниринга и экспертизы в стройиндустрии Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162), ScopusID, ORCID, arin77@bk.ru

Заявленный вклад авторов:

Е.А. Шляхова: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, подготовка текста, формирование выводов.

И.О. Егорочкина: анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов, формирование списка литературы.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Elena A. Shlyakhova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technological Engineering and Expertise in the Construction Industry at the Don State Technical University (162 Sotsialisticheskaya str., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), ScopusID, ORCID, shlyahovae@list.ru

Inna O. Egorochkina, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technological Engineering and Expertise in the Construction Industry at the Don State Technical University (162 Sotsialisticheskaya str., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), ScopusID, ORCID, arin77@bk.ru

Claimed contributorship:

EA Shlyakhova: development of the idea, aims and objectives of the study, calculations, analysis and drawing conclusions, manuscript preparation, revision of the manuscript.

IO Egorochkina: analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions, formation of the list of references.

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 20.04.2025
Поступила после рецензирования / Reviewed 14.05.2025
Принята к публикации / Accepted 30.05.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

CC BY

Check for updates

УДК 691.3

Оригинальное эмпирическое исследование

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-57-66

Исследование факторов, влияющих на эффективность мелкозернистого самоуплотняющегося бетона с песком из дроблёного бетона

Л.И. Касторных ✉, **А.В. Каклюгин**, **М.Г. Холодняк**, **Д.В. Кузьменко**

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

✉ likas9@mail.ru

EDN: NOGHXW

Аннотация

Введение. Обоснованное применение минерального сырья из строительных отходов для приготовления виброуплотняемых бетонных смесей экономически выгодно и экологически эффективно, однако влияние заполнителей из бетонного лома на реологические характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся смесей и структуру затвердевшего бетона изучено недостаточно. Цель настоящей работы — исследование факторов, влияющих на эффективность мелкозернистого самоуплотняющегося бетона с песком из дроблёного бетона.

Материалы и методы. Для определения эффективности составов мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов готовили смеси равной удобоукладываемости марки РК1 на портландцементе ЦЕМ0 52,5Н. В качестве укрупняющего компонента в состав мелкого природного песка местных карьеров вводили песок из дроблёного бетона. Для придания смесям требуемой текучести и самоуплотняемости применяли добавку Полипласт ПК — поликарбоксилатный суперпластификатор. Оценку зернового состава мелкого заполнителя проводили по изменению модуля крупности в соответствии со стандартной методикой. Реологические и технологические характеристики самоуплотняющихся бетонных смесей устанавливали по методикам ГОСТ Р 59715-2022. Трещиностойкость мелкозернистого самоуплотняющегося бетона оценивали по коэффициенту, отражающему соотношение прочностных характеристик бетона.

Результаты исследования. В ходе исследований установлено, что при условии получения высокостабильной бетонной смеси оптимальная структура мелкозернистого бетона достигается при содержании в составе мелкого заполнителя 30 % зерен дробленого бетона и дозировке поликарбоксилатного суперпластификатора Полипласт ПК — 1 %.

Обсуждение и заключение. Обоснована техническая эффективность мелкозернистого самоуплотняющегося бетона с использованием укрупняющих зерен песка из дробленого бетона. За счет оптимизации рецептурных факторов мелкозернистого бетона с заполнителем из строительных отходов и применения безвибрационной технологии монолитных железобетонных конструкций из самоуплотняющихся смесей достигается экономический эффект.

Ключевые слова: мелкозернистые самоуплотняющиеся смеси, песок из дроблёного бетона, поликарбоксилатный суперпластификатор, стабильность бетонной смеси, трещиностойкость мелкозернистого бетона

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

Для цитирования. Касторных Л.И., Каклюгин А.В., Холодняк М.Г., Кузьменко Д.В. Исследование факторов, влияющих на эффективность мелкозернистого самоуплотняющегося бетона с песком из дроблёного бетона. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(2):57–66. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-57-66

© Касторных Л.И., Каклюгин А.В., Холодняк М.Г., Кузьменко Д.В., 2025

Original Empirical Research

Investigation of the Factors Influencing the Effectiveness of Fine-Grained Self-Compacting Concrete with Crushed Concrete Sand

Lyubov I. Kastornykh ✉, **Alexander V. Kaklyugin**, **Mikhail G. Kholodnyak**, **Denis V. Kuzmenko**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ likas9@mail.ru

Abstract

Introduction. The justified use of mineral raw materials from construction waste for the preparation of vibro-compacted concrete mixtures is economically beneficial and environmentally efficient, however, the effect of aggregates from scrap concrete on the rheological characteristics of fine-grained self-compacting mixtures and the structure of hardened concrete has not been sufficiently studied. The aim of this work is to study the factors influencing the effectiveness of fine–grained self-compacting concrete with crushed concrete sand.

Materials and Methods. To determine the effectiveness of the compositions of fine-grained self-compacting concretes, mixtures of equal workability of the PK1 grade were prepared on Portland cement CEM0 52.5N. Sand from crushed concrete was introduced into the fine natural sand of local quarries as a reinforcing component. Polyplast PC, a polycarboxylate superplasticizer, was used to give the mixtures the required fluidity and self–compacting properties. The evaluation of the grain composition of the fine aggregate was carried out by changing the grain size modulus in accordance with the standard methodology. Rheological and technological characteristics of self-sealing concrete mixtures were established according to the methods of GOST R 59715-2022. Crack resistance of fine-grained self-compacting concrete was assessed by a coefficient reflecting the ratio of strength characteristics of concrete.

Results. Throughout the course of the research, it was found that, provided a highly stable concrete mixture is obtained, the optimal structure of fine-grained concrete is achieved with a content of 30% crushed concrete grains in the fine aggregate and a dosage of polycarboxylate superplasticizer Polyplast PC – 1%.

Discussion and Conclusion. The technical efficiency of fine-grained self-compacting concrete using coarsening sand grains from crushed concrete is substantiated. By optimizing the formulation factors of fine-grained concrete with aggregate from construction waste and using vibration-free technology of monolithic reinforced concrete structures made of self-compacting mixtures, an economic effect is ensured.

Keywords: fine-grained self-compacting mixtures, sand from crushed concrete, polycarboxylate superplasticizer, stability of the concrete mix, crack resistance of fine-grained concrete

Acknowledgements. The authors appreciate the reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions helped to significantly improve the quality of this article.

For citation. Kastornykh LI, Kaklyugin AV, Kholodnyak MG, Kuzmenko DV. Investigation of Factors Influencing the Effectiveness of Fine-Grained Self-Compacting Concrete with Crushed Concrete Sand. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2025;4(2):57–66. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-57-66

Введение. Основными факторами, определяющими техническую и экономическую эффективность виброуплотняемого бетона, являются вид, расход и качество материалов. Наиболее действенным фактором из вышеперечисленных является зерновой состав заполнителя, так как именно гранулометрия заполнителя определяет водопотребность и расход вяжущего в бетонной смеси и, следовательно, формирует её стоимость [1].

Для самоуплотняющихся бетонных смесей решающее значение имеет не только гранулометрическая характеристика заполнителя, но и форма его зерен. При выборе вида заполнителя предпочтение следует отдавать материалам с окатанной формой частиц, обеспечивающей свободное течение и самоуплотняемость смеси [2].

Использование минерального сырья из «старого» бетона для приготовления бетонных смесей обосновано нормативной документацией и многочисленными исследованиями, подтверждающими технический и экологический эффект рециклинга строительных отходов [3–6]. Для получения крупного и мелкого заполнителя из бетонного лома применяются дробильно-сортировочные установки, которые способствуют формированию обломочной весьма развитой шероховатой формы зерен заполнителя [7]. Применение такого материала для самоуплотняющихся бетонных смесей должно быть обосновано предварительными исследованиями [8–10].

Для мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесей (МСУБ), применяемых для бетонирования тонкостенных и густоармированных конструкций, гранулометрическая характеристика заполнителя также играет решающую роль для обеспечения требуемой текучести. В ряде случаев для получения бетона высокой прочности

в состав мелкого заполнителя следует вводить укрупняющий компонент. В роли укрупняющей добавки для оптимизации зернового состава мелкого заполнителя традиционно используют отсевы камнедробления природного щебня по ГОСТ 31424-2010 «Материалы строительные нерудные из отсевов дробления плотных горных пород при производстве щебня» и продукты рециклинга строительных отходов [11–13]. Роль крупных зерен песка из дробленого бетона на формирование структуры самоуплотняющегося бетона изучена недостаточно, поэтому целью настоящей работы явилось исследование факторов, влияющих на эффективность мелкозернистого самоуплотняющегося бетона с песком из дроблёного бетона.

Материалы и методы. Для проведения исследований использовали мелкий заполнитель, в состав которого включали:

– песок природный (далее $П_{ПР}$), соответствующий требованиям ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ»: истинная плотность 2650 кг/м^3; насыпная плотность 1410 кг/м^3; модуль крупности 1,15 (группа — очень мелкий); пустотность 46,6 %;

– песок из дроблёного бетона (далее $П_{ДР}$), удовлетворяющий требованиям ГОСТ 32495-2013 «Щебень, песок и песчано-щебеночные смеси из дробленого бетона и железобетона», смеси трех фракций: 0,63–1,25 мм, 1,25–2,5 мм, 2,5–5,0 мм в соотношении по массе 20:30:50 соответственно. Оптимальное соотношение фракций песка из дробленого бетона принимали по результатам ранее проведенных исследований [14].

Мелкозернистые бетонные смеси готовили на основе бездобавочного портландцемента типа ЦЕМ0 52,5Н, удовлетворяющего требованиям ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные»: прочность на сжатие в возрасте 28 сут — 63,3 МПа; прочность на сжатие после тепловой обработки — 48,2 МПа; нормальная густота цементного теста — 27,8 %; удельная поверхность — 382,5 м^2/кг; начало схватывания — 90 мин.

Для обеспечения самоуплотняемости и требуемой текучести бетонной смеси применяли суперпластификатор Полипласт ПК (далее СП ПК) на основе эфиров поликарбоксилатов. Добавка, являющаяся универсальной для товарных бетонных смесей и сборного железобетона, по рекомендациям производителя используется для регулирования сохраняемости смесей при одновременном быстром наборе ранней прочности бетона. Диапазон дозирования химического модификатора для мелкозернистых бетонных смесей установили по ранее выполненным исследованиям [15–17].

Оценку зернового состава заполнителя при добавлении укрупняющих зерен из дробленого бетона проводили по изменению модуля крупности по методике ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ».

Реологические и технологические характеристики мелкозернистых бетонных смесей устанавливали по методикам ГОСТ Р 59715-2022 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся». Оценку смеси по показателям самоуплотняемости РК и текучести Т выполняли с использованием блокировочного кольца с 16 стержнями (рис. 1).

Рис. 1. Прибор для определения самоуплотняемости и текучести бетонных смесей

Вязкость мелкозернистой смеси t_{500} определяли, фиксируя время, за которое смесь при растекании впервые коснется отметки 500-миллиметровой окружности.

Для оценки стабильности смеси (устойчивости к расслаиванию) использовали индекс VSI, определяемый визуальным методом в процессе растекаемости смеси.

Для определения физико-механических характеристик мелкозернистого самоуплотняющегося бетона из смеси каждого состава готовили контрольные образцы-кубы с номинальным размером ребра 100 мм. Изготовление, хранение и испытание образцов бетона выполняли по методике ГОСТ 10180-2012 «Бетоны».

Трещиностойкость мелкозернистого бетона оценивали по коэффициенту $K_{ТР}$ — косвенной характеристике, отражающей отношение прочности бетона при изгибе к прочности при сжатии [10, 18]:

$$K_{ТР} = R_{bt}/R_b,$$

где R_{bt} — предел прочности бетона при изгибе, МПа; R_b — предел прочности бетона при сжатии, МПа.

Структурные характеристики мелкозернистого бетона оценивали по микрофотографиям среза образцов, выполненным в поляризованном свете с помощью оптического микроскопа с камерой LEVENHUK C310 (диаметр поля зрения — 18 мм; спектральный диапазон — 400–650 нм; активный диапазон — 75 dB; чувствительность — 1,5 нм; максимальное разрешение — 2048×1536).

Результаты исследования. В ходе исследований выполнен анализ гранулометрического состава мелких заполнителей при использовании песка из дробленого бетона в качестве укрупняющей добавки (таблица 1).

Таблица 1

Анализ гранулометрического состава мелких заполнителей

Вид и состав заполнителя, %	Наименование остатка	Остатки, % по массе, на ситах размером, мм					Проход через сито с сеткой N016, % по массе	Модуль крупности
		2,5	1,25	0,63	0,315	0,16		
$\frac{П_{пр}}{100}$	Частный	0,03	0,10	0,405	27,505	58,00	13,96	1,15
	Полный	0,03	0,13	0,535	28,040	86,04	100,0	
$\frac{П_{пр} + П_{др}}{80 + 20}$	Частный	8,615	5,235	3,760	23,060	44,685	14,645	1,66
	Полный	8,615	13,85	17,61	40,670	85,355	100,0	
$\frac{П_{пр} + П_{др}}{70 + 30}$	Частный	12,60	7,605	4,220	21,820	40,030	13,725	1,90
	Полный	12,60	20,205	24,425	46,245	86,275	100,0	
$\frac{П_{пр} + П_{др}}{60 + 40}$	Частный	16,81	10,16	6,420	20,775	34,900	10,935	2,20
	Полный	16,81	26,97	33,39	54,165	89,065	100,0	

Проведенные исследования показали, что природный песок местных карьеров, относящийся к группе очень мелких, в бетонных смесях способствует увеличению водопотребности и расхода цемента, следовательно, его применение возможно только после обосновывающих испытаний в бетоне. При обогащении природного песка зернами дробленого бетона в интервале от 20 до 40 % гранулометрическая характеристика заполнителя улучшается за счет увеличения количества зерен размерами 0,63–5,0 мм.

Для оценки влияния зернового состава заполнителя на основные свойства мелкозернистых самоуплотняющихся смесей и бетонов на их основе готовили смеси марки РК1 по удобоукладываемости (растекаемость конуса 55–65 см по ГОСТ Р 59714-2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся») при номинальном расходе цемента 510 кг/м^3. В ходе определения растекаемости смеси устанавливали её вязкость, текучесть и стабильность.

В качестве факторов, влияющих на реологические и физико-механические свойства МСУБ, приняли:

– содержание зерен из дробленого бетона в природном мелком заполнителе в диапазоне от 20 до 40 % с интервалом 5 %;

– дозировку суперпластификатора СП ПК в диапазоне от 0,5 до 1,5 % массы цемента с интервалом 0,5 %.

Состав и реологические характеристики исследованных бетонных смесей приведены в таблице 2. Зависимость вязкости и текучести смесей от состава заполнителя и дозировки суперпластификатора представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

https://www.stsg-donstu.ru

Таблица 2

Характеристики и оценка стабильности мелкозернистых бетонных смесей

Состав	Содержание $П_{др}$, %	Дозировка СП ПК, %	В/Ц	Вязкость, с	Текучесть, мм	Средняя плотность, кг/м^3	Визуальная характеристика смеси	Индекс стабильности VSI по ГОСТ Р 59715
1FC	20	1,0	0,49	5,3	25,0	2128	Однородная, но быстро загустевает	1 — стабильная
2FC	25	1,5	0,49	6,0	25,5	2185	На поверхности смеси светлый налёт	2 — нестабильная
3FC	25	0,5	0,69	2,0	10,5	2082	Однородная, но сразу растекается	1 — стабильная
4FC	30	1,0	0,49	6,5	26,5	2145	Однородная, хорошо течет	0 — высоко стабильная
5FC	35	1,5	0,45	4,4	17,5	2215	На поверхности смеси светлый налёт	2 — нестабильная
6FC	35	0,5	0,54	2,0	23,0	2195	Однородная, но сразу растекается	1 — стабильная
7FC	40	1,0	0,47	2,8	14,5	2208	Заметное водоотделение смеси	3 — высоко нестабильная

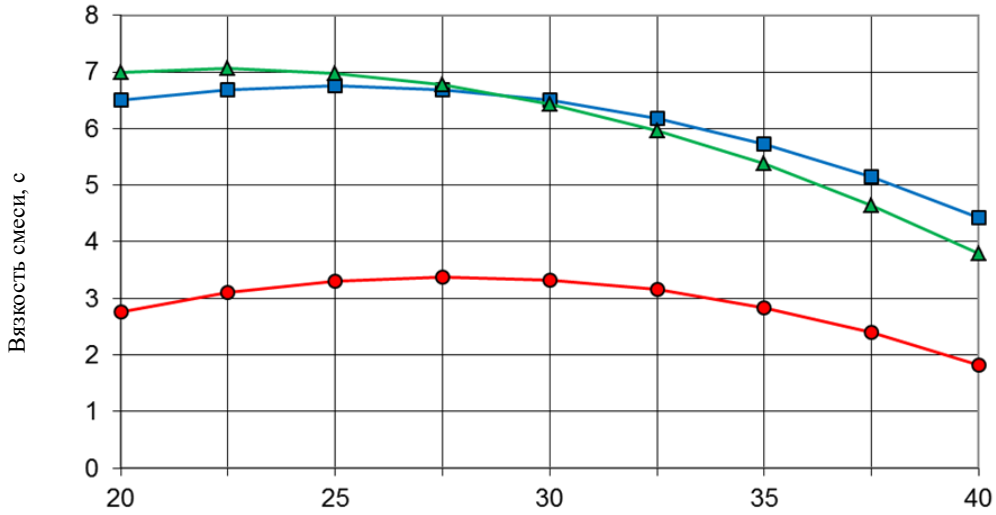


Рис. 2. Зависимость вязкости смесей от состава заполнителя и дозировки суперпластификатора: ○ — дозировка СП ПК 0,5 %; □ — дозировка СП ПК 1,0 %; Δ — дозировка СП ПК 1,5 %

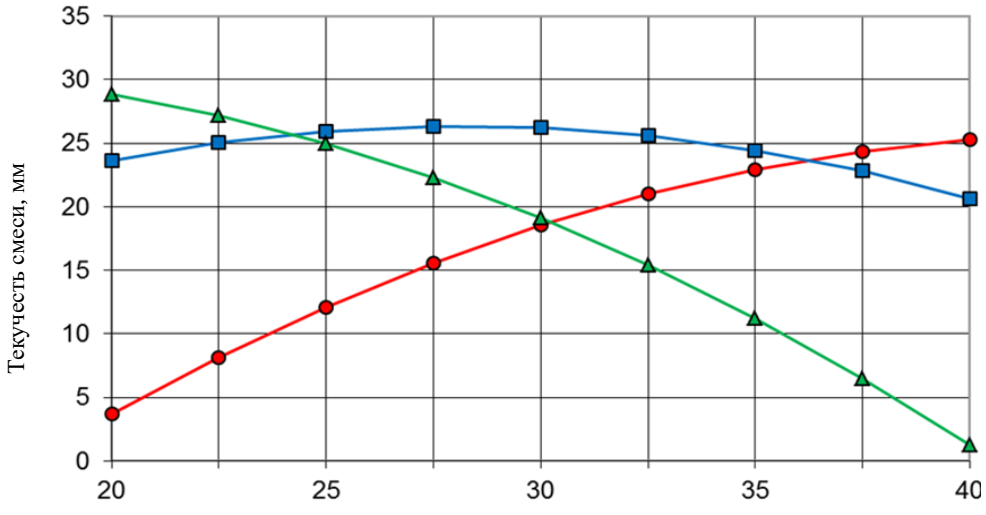


Рис. 3. Зависимость текучести смесей от состава заполнителя и дозировки суперпластификатора: ○ — дозировка СП ПК 0,5 %; □ — дозировка СП ПК 1,0 %; Δ — дозировка СП ПК 1,5 %

При проведении исследований установлено, что для получения стабильных самоуплотняющихся мелкозернистых смесей дозировку дробленого песка следует принимать не более 30 % (состав 4FC). Увеличение количества зерен с шероховатой развитой формой поверхности неизбежно приводит к расслоению смеси, а повышение дозировки суперпластификатора усиливает этот эффект, приводя к заметному водоотделению.

Анализ зависимости реологических характеристик мелкозернистых смесей от состава заполнителя и дозировки суперпластификатора показывает, что при увеличении доли крупных зерен песка из дробленого бетона вязкость смесей понижается, а текучесть изменяется неоднозначно. Повышение показателя текучести зафиксировано при увеличении расхода крупных зерен в составах с минимальной дозировкой суперпластификатора. В составах с максимальной дозировкой СП ПК, наоборот, наблюдается снижение показателя текучести смесей с увеличением доли укрупняющей добавки в составе песка. Такой характер изменения текучести смесей подтверждает значительное влияние зернового состава заполнителя на реологические свойства самоуплотняющихся смесей. Для исследованных составов высокостабильная, однородная, нерасслаивающаяся смесь получена при расходе зерен дробленого песка в составе заполнителя в количестве 30 % и дозировке СП ПК — 1,0 %.

Показатели конструктивности и физико-механические характеристики мелкозернистого самоуплотняющегося бетона исследованных составов приведены в таблице 3. Влияние состава заполнителя и дозировки суперпластификатора на прочность мелкозернистого бетона, испытанного в раннем (1 сут) и проектном (28 сут) возрасте, представлены на рис. 4.

Таблица 3

Показатели конструктивности и физико-механические характеристики МСУБ

Состав	Расход материалов на 1 м^3, кг			Ц/В	Средняя плотность бетона, кг/м^3	Предел прочности, МПа		Коэффициент K_{TP}
	$П_{ПР}$	$П_{ДР}$	СП ПК			при сжатии	при изгибе	
1FC	1093	274	5,1	2,04	2116	46,1	6,46	0,140
2FC	1052	351	7,4	2,04	2126	48,6	5,51	0,113
3FC	960	319	2,7	1,45	2068	33,1	4,30	0,129
4FC	965	414	5,1	2,04	2156	52,6	6,37	0,121
5FC	933	502	7,6	2,22	2179	55,4	6,10	0,110
6FC	907	488	2,9	1,85	2157	45,9	4,63	0,101
7FC	855	570	5,3	2,13	2182	52,6	7,08	0,135

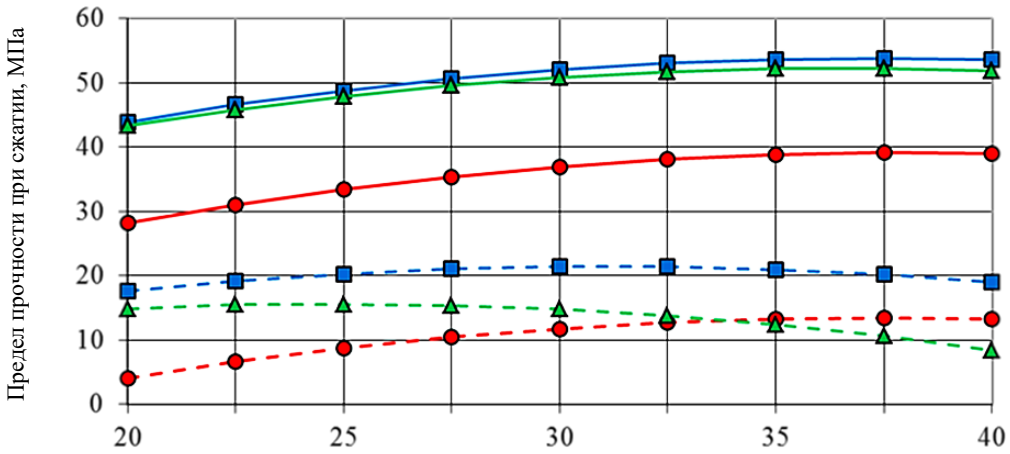


Рис. 4. Зависимость прочности мелкозернистого бетона от состава заполнителя и дозировки суперпластификатора:
○ — дозировка СП ПК 0,5 %; □ — дозировка СП ПК 1,0 %; Δ — дозировка СП ПК 1,5 %;
- - - - — прочность бетона в возрасте 1 сут; —— — прочность бетона в возрасте 28 сут

Анализ полученных данных свидетельствует, что на формирование начальной структурной прочности бетона влияние расхода укрупняющих зерен и дозировки суперпласификатора оказывается незначительно. Для бетонов, испытанных в проектном возрасте, установлено, что увеличение содержания крупных зерен песка из дробленого бетона в интервале от 32,5 до 40 % приводит к повышению прочности при сжатии на 25 %. При этом максимальная прочность бетона зафиксирована для составов с максимальной дозировкой суперпластификатора.

https://www.stsg-donstu.ru

Влияние рецептурно-технологических факторов на трещиностойкость мелкозернистого самоуплотняющегося бетона показано на рис. 5. Установлено, что при увеличении содержания укрупняющих зерен дробленого песка в составе заполнителя коэффициент трещиностойкости бетона K_{TP} изменяется нелинейно. Формирование структуры мелкозернистого бетона, способной сопротивляться развитию трещин, связано с рациональным гранулометрическим составом заполнителя и оптимальным содержанием цементного камня.

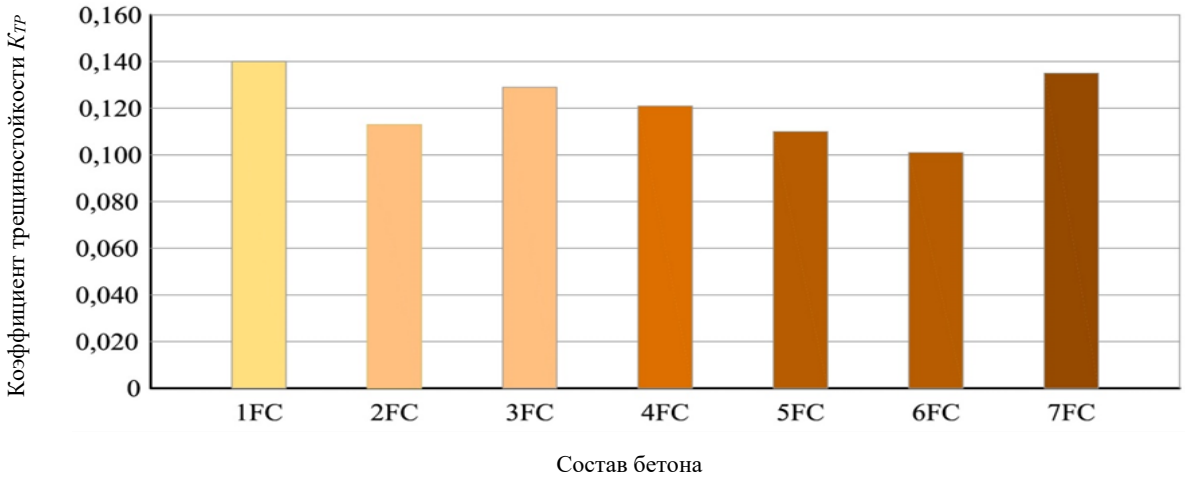
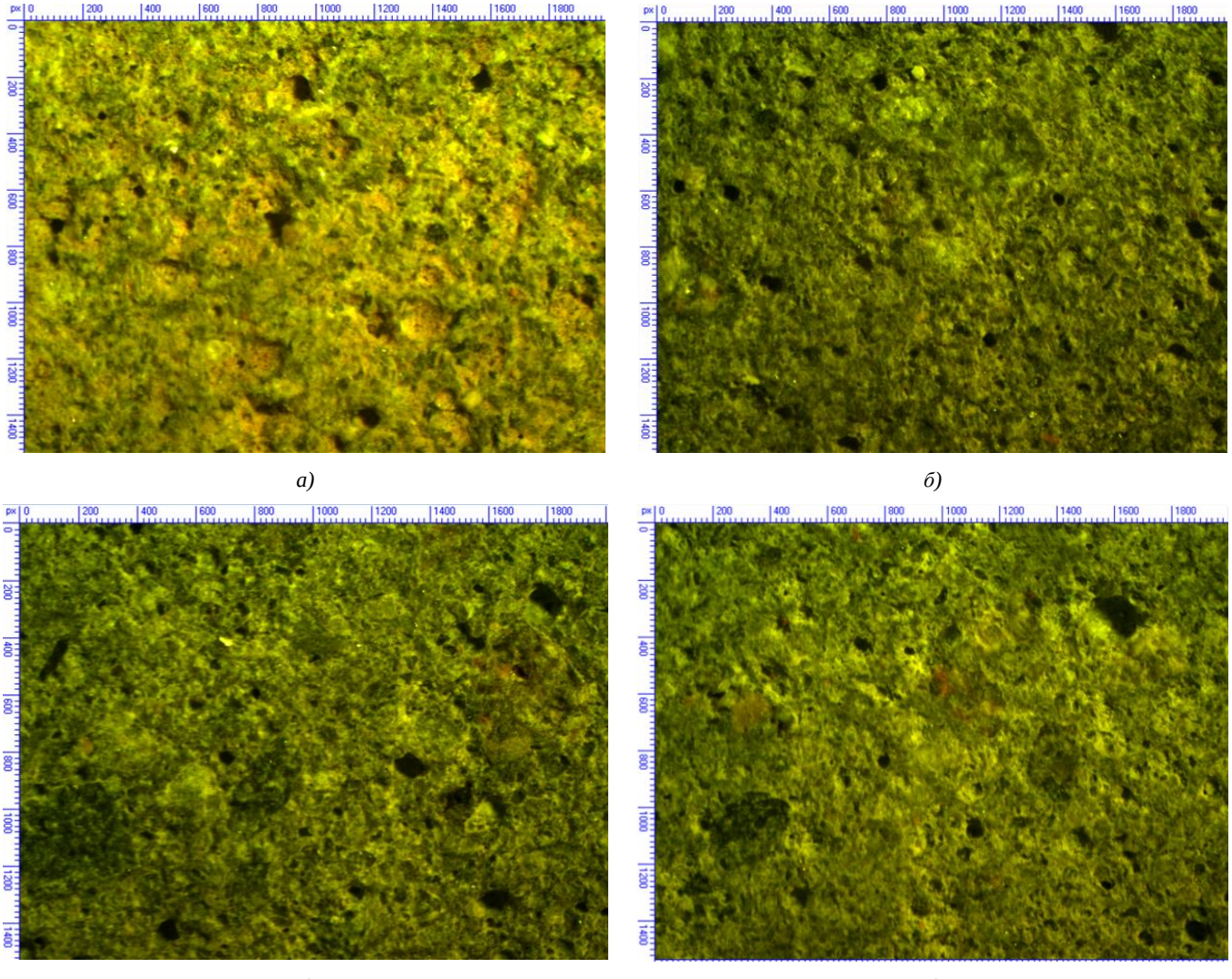


Рис. 5. Зависимость коэффициента трещиностойкости МСУБ от рецептурных факторов

На рис. 6 представлены микрофотографии среза образцов МСУБ, наглядно показывающие структуру бетона с различным содержанием укрупняющих зерен песка из дробленого бетона.



а) *б)*

в) *г)*

Рис. 6. Микрофотографии среза образцов МСУБ с содержанием зерен дробленого песка: *а* — 20 %; *б* — 25 %; *в* —30 %; *г* — 40 %

В проведенных нами исследованиях установлено, что при условии получения высокостабильной смеси оптимальная структура мелкозернистого бетона достигается при содержании в составе заполнителя 30 % крупных зерен дробленого бетона и дозировке СП ПК — 1 % (состав 4FC на рис. 6 *в*).

Обсуждение и заключение. Выполненные исследования показали, что обогащение природного мелкого песка местных карьеров зернами размерами 0,63–5,0 мм из песка дробленого бетона в оптимальном количестве улучшает гранулометрический состав заполнителя и без потери показателей текучести смеси способствует повышению прочности бетона. Выявлено, что рецептурные факторы оказывают значительное влияние на реологические показатели мелкозернистых самоуплотняющихся смесей. Для получения стабильных смесей, характеризующихся связностью и нерасслаиваемостью, доля крупных зерен дробленого песка в составе заполнителя не должна превышать 30 %, а дозировка поликарбоксилатного суперпластификатора — 1,0 % массы цемента.

Анализ прочностных характеристик мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов с песком из дробленого бетона показал, что формирование рациональной структуры связано с рецептурой смеси и технологией её транспортирования и укладки. Применение безвибрационной бетононасосной технологии при возведении монолитных железобетонных конструкций из самоуплотняющихся смесей с песком из строительных отходов будет способствовать снижению сметной стоимости работ и улучшению экологической обстановки в Донском регионе [14, 19].

Список литературы/References

1. Баженов Ю.М., Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы. *Строительные материалы*. 2014;3:6–14. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/konstruirovanie-struktur-sovremennyh-betonov-opredelyayuschie-printsipy-i-tehnologicheskie-platformy (дата обращения 29.03.2025).

Bazhenov YuM, Chernyshov EM, Korotkikh DN Designing of Modern Concrete Structures: Determining Principles and Technological Platforms. *Building Materials*. 2014;3:6–14. (In Russ.) https://cyberleninka.ru/article/n/konstruirovanie-struktur-sovremennyh-betonov-opredelyayuschie-printsipy-i-tehnologicheskie-platformy (accessed: 29.03.2025).

2. Касторных Л.И., Черепанов В.Д., Березовой В.Э. Оптимизация зернового состава заполнителя для мелкозернистого самоуплотняющегося бетона. *Молодой исследователь Дона*. 2020;5(26):40–48. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44048323 (дата обращения 29.03.2025).

3. Ларсен О.А., Наруть В.В., Воронин В.В. Технология переработки бетонного лома с целью получения самоуплотняющегося бетона. *Строительство и реконструкция*. 2020;2(88):61–66. https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-88-2-61-66

Larsen OA, Narut VV, Voronin VV Technology of Processing Concrete Scrap in Order to Obtain Self-Compacting Concrete. *Construction and Reconstruction*. 2020;2(88):61–66. (In Russ.) https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-88-2-61-66

4. Булдыжов А.А., Алимов Л.А. Самоуплотняющиеся бетоны с наномодификаторами на основе техногенных отходов. *Промышленное и гражданское строительство*. 2014;8:86–88.

Buldyzhov AA, Alimov LA Self-Compacting Concretes with Nanomodifiers Based on Technogenic Waste. *Industrial and Civil Construction.* 2014;8:86–88. (In Russ.).

5. Красиникова Н.М., Кириллова Е.В., Хозин В.Г. Вторичное использование бетонного лома в качестве сырьевых компонентов цементных бетонов. *Строительные материалы*. 2020;1(2):56–65. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-56-65

Krasinikova NM, Kirillova EV, Khozin VG Recycling of Concrete Scrap as Raw Materials of Cement Concretes. *Building Materials*. 2020;1-2:56–65. (In Russ.) https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-56-65

6. Kastornykh L., Kosenko V., Kaklyugin A., Kholodnyak M., Fedorchenko A. Vibration–Free Decorative Concrete Technology is the Key to Sustainable Development of Landscape Architecture. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023;575. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_328

7. Lopatin N.A., Motornaja A.I., Neguliaeva E.Yu. The most effective crushing equipment and testing of recycled concrete aggregates. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015;10(37):34–45. URL: https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/10(37)/3_lopatin_37.pdf (дата обращения 29.03.2025).

8. Пуляев С.М. Исследование процесса раннего структурообразования бетона на щебне из бетонного лома. *Вестник Московского государственного строительного университета*. 2012;1:68–71. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protsessa-rannego-strukturoobrazovaniya-betona-na-schebne-iz-betonnogo-loma-1 (дата обращения 29.03.2025).

Pulyaev SM Research of Early Structure Formation Process of Concrete Where Concrete Waste are Used as Crushed Stone. *Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering*. 2012;1:68–71. (In Russ.) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protsessa-rannego-strukturoobrazovaniya-betona-na-schebne-iz-betonnogo-loma-1 (accessed: 29.03.2025).

9. Alwaeli M., Alshawaf M. Waste Utilization in Concrete Technology as a Substitute for Natural Aggregates in the Context of Circular Economy: an Overview. *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019.* 2019;19:151–158. https://doi.org/10.5593/sgem2019V/4.2/S05.021

10. Kastornykh L, Kaklyugin A, Kholodnyak M, Osipchuk I. Modified Concrete Mixes for Monolithic Construction. *Materials Science Forum.* 2021;1043:81–91. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.81

11. Гончарова М.А., Борков П.В., Аль-Суррайви Х.Г.Х. Рециклинг крупнотоннажных бетонных и железобетонных отходов при реализации контрактов полного жизненного цикла. *Строительные материалы*. 2019;12:52–57. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-52-57

Goncharova MA, Burkov PV, Al-Suraimi HGH Recycling of Large-Capacity Concrete and Reinforced Concrete Waste During the Implementation of Full-Life Cycle Contracts. *Building Materials*. 2019;12:52–57. (In Russ.) https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-52-57

12. Modani PO, Mohitkar V. Self-compacting concrete with recycled aggregate: a solution for sustainable development. *International Journal of Civil Structural Engineering*. 2014;4:430–440.

13. Трищенко И.В., Касторных Л.И., Фоминых Ю.С., Гикало М.А. Оценка эффективности инвестиционного проекта реконструкции предприятий крупнопанельного домостроения. *Жилищное строительство*. 2018;10:39–44. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-investitsionnogo-proekta-rekonstruktsii-predpriyatiy-krupnopanelnogo-domostroeniya (дата обращения 29.03.2025).

Trischenko IV, Kastornykh LI, Fominych YuS, Gikalo MA Evaluation of Effectiveness of Investment Project of Reconstruction of Large-Panel Construction Enterprises. *Housing Construction*. 2018;10:39–43. (In Russ.) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-investitsionnogo-proekta-rekonstruktsii-predpriyatiy-krupnopanelnogo-domostroeniya (accessed: 29.03.2025).

14. Касторных Л.И., Гикало М.А., Каклюгин А.В., Серебряная И.А. Математическое моделирование технологических процессов бетонирования монолитных конструкций из мелкозернистых смесей. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023;2(4):84–93. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-84-93

Kastornykh LI, Gikalo MA, Kaklyugin AV, Serebryanaya IA Mathematical Modeling the Processes of Concreting the Monolithic Structures Made of the Fine-Grained Mixes. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2023;2(4):84–93. (In Russ.) https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-84-93

15. Smirnova OM. Compatibility of portland cement and polycarboxylate-based superplasticizers in high-strength concrete for precast constructions. *Magazine of Civil Engineering*. 2016;6:12–22. https://doi.org/10.5862/MCE.66.2

16. Kastornykh LI, Trischenko IV, Kakljugin AV, Shershen DR. Heat Curing Efficiency Estimation of Concrete with Superplastificators on Polycarboxylates Basis. *Materials Science Forum*. 2019;974:231–236. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.974.231

17. Муртазаев С.-А.Ю., Шеина С.Г., Муртазаев И.С.-А., Межидов Д.А. Самоуплотняющиеся бетоны с использованием химических добавок на основе эфиров полиарилов и поликарбоксилатов. *Вестник ГГНТУ. Технические науки*. 2023;1(31):88–95. https://doi.org/10.34708/GSTOU.2023.74.53.009

Murtazaev YuS-A, Sheina SG, Murtazaev IS-A, Mezhidov D.A. Self-sealing concretes using chemical additives based on polyacrylic esters and polycarboxylates. *Bulletin of GGNTU. Technical sciences.* 2023;Vol.XIV,1(31):88–95. (In Russ.) https://doi.org/10.34708/GSTOU.2023.74.53.009

18. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Ерофеев В.Т., Ерофеева И.В., Тараканов О.В., Кондращенко В.И. и др. Исследование трещиностойкости бетонов нового поколения. *Строительные материалы*. 2019;10:3–11. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-3-11

Travush VI, Karpenko NI, Erofeev VT, Erofeeva IV, Tarakanov OV, Kondrashenko VI, Kesariyskiy AG The study of crack resistance of new generation concrete. *Building Materials*. 2019;10:3–11. (In Russ.) https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-3-11

19. Larsen OA, Samchenko SV, Naruts VV, Aleksandrova OV, Bulgakov BI. Environmental Aspects of Dismantling of old Buildings During the Reconstruction in Moscow. *19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2019.* 2019;19:115–122. https://doi.org/10.5593/sgem2019/6.2/S26.015

Об авторах:

Любовь Ивановна Касторных, кандидат технических наук, доцент кафедры технологического инжиниринга и экспертизы в стройиндустрии Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, ORCID, likas9@mail.ru

Александр Викторович Каклюгин, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, ORCID, kaklugin@gmail.com

Михаил Геннадиевич Холодняк, кандидат технических наук, доцент кафедры технологического инжиниринга и экспертизы в стройиндустрии Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону , пл. Гагарина, 1), ORCID, xolodniak@yandex.ru

Денис Викторович Кузьменко, магистрант кафедры технологического инжиниринга и экспертизы в стройиндустрии Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону , пл. Гагарина, 1), ORCID, 89001270357@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Л.И. Касторных: разработка плана и проведение исследовательских работ.

А.В. Каклюгин: обработка экспериментальных данных.

М.Г. Холодняк: обработка экспериментальных данных.

Д.В. Кузьменко: проведение экспериментов, подготовка иллюстраций.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Lyubov I. Kastornykh, Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor of the Department of Technological Engineering and Expertise in the Construction Industry at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), ScopusID, ORCID, likas9@mail.ru

Alexander V. Kaklyugin, Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Building Materials of the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation) ScopusID, ORCID, kaklugin@gmail.com

Mikhail G. Kholodnyak, Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technological Engineering and Expertise in the Construction Industry at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), ORCID, xolodniak@yandex.ru

Denis V. Kuzmenko, Master's student of the Department of Technological Engineering and Expertise in the Construction Industry at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), ORCID, 89001270357@mail.ru

Claimed contributorship:

LI Kastornykh: development of a plan and conducting research.

AV Kaklyugin: processing of experimental data.

MG Kholodnyak: processing of experimental data.

DV Kuzmenko: conducting experiments, preparing illustrations.

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 30.04.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 17.05.2025

Принята к публикации / Accepted 30.05.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

CC BY

Check for updates

Оригинальное эмпирическое исследование

УДК 691.328
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-67-74

Метод оценки плотности бетонной смеси в процессе формования

С.В. Эдилян ✉, **Х.С. Явруян**

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ spartak-edilyan@yandex.ru

EDN: JHDNVD

Аннотация.

Введение. Уплотнение бетонных смесей является одной из наиболее актуальных тем современного строительства. Вибрационное уплотнение — это один из основных методов, используемых для обеспечения равномерного распределения компонентов бетонной смеси и удаления воздушных пустот. Этот процесс позволяет достичь более высокой плотности и прочности бетона, что, в свою очередь, улучшает его эксплуатационные характеристики. Процесс производства железобетонных изделий представляет собой сложный и трудоёмкий, требующий значительной ответственности и внимания, процесс. Качество уплотнения смесей влияет на физико-механические свойства формуемых изделий, включая прочность, водонепроницаемость, морозостойкость и другие важные параметры. Верно уплотненная смесь обеспечивает однотипность свойств готовой продукции, точность геометрических форм и хорошее качество его лицевой поверхности. Целью данной статьи является описание работы принципиально нового оборудования «Шар-1», направленного на совершенствование методов оценки плотности бетонной смеси непосредственно в процессе формованию.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования была выбрана бетонная смесь. Управление параметрами вибрационного уплотнения бетона требует тщательного планирования с учётом типа смеси, формы конструкции и требований к качеству. Исследование выполнялось с применением принципиально нового прибора «Шар-1».

Результаты исследования. Результаты разработки устройства для измерения плотности бетонной смеси успешно доказаны экспериментальным путем. Прибор позволяет оценивать уплотнение смеси в процессе формования, фиксируя данные в реальном времени и позволяя в дальнейшем анализировать процесс уплотнения бетонной смеси. Это способствует улучшению контроля качества бетонных смесей на стадии формования, что важно для повышения надежности и долговечности бетонных конструкций. Использование прибора «Шар-1» упрощает и ускоряет процесс испытаний, снижая влияние субъективных факторов и повышая объективность измерений.

Обсуждение и заключение. Раздел акцентируется на различии традиционных исследований по контролю уплотнения бетонной смеси и с применением прибора «Шар-1», который позволяет измерить плотность бетонной смеси в процессе формования. Метод позволяет быстро получать данные о плотности, своевременно корректировать технологию при необходимости. В дальнейшем планируется усовершенствовать прибор дополнительными функциями.

Ключевые слова: бетон, железобетон, бетонная смесь, уплотнение, виброуплотнение, виброплощадка, колебания

Для цитирования. Эдилян С.В., Явруян Х.С. Метод оценки плотности бетонной смеси в процессе формования. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(2):67–74. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-67-74

© Эдилян С.В., Явруян Х.С., 2025

Original Empirical Research

Method for Assessing the Density of a Concrete Mix during Molding

Spartak V. Edilyan ✉, **Khungianos S. Yavruyan**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉Spartak-edilyan@yandex.ru

Abstract.
Introduction. Concrete mix compaction is one of the most pressing topics in modern construction. Vibration compaction is a key method used to ensure uniform distribution of concrete mix components and removal of air voids.
The process of manufacturing reinforced concrete products is complex and labor-intensive and requires significant responsibility and attention. The quality of compaction of mixtures affects the physical and mechanical properties of molded products, including strength, water resistance, frost resistance and other important parameters. A correctly compacted mix ensures uniformity of properties of finished products, accuracy of geometric shapes and good quality of its front surface. The aim of this article is to study the existing works of the authors and identify the development area in the method of assessing the density of concrete mixture during molding with the possible development of the device necessary for this.
Materials and methods. Concrete mix was chosen as the object of the study. Control of concrete vibration compaction parameters requires careful planning, taking into account the type of mix, the shape of the structure and quality requirements. This section covers the development of a fundamentally new device “Shar-1”.
Research results. The results of the development of a device for measuring the density of concrete mixture have been successfully proved experimentally. The device makes it possible to evaluate the compaction of the mixture during the forming process, recording data in real time and allowing further analyses of the concrete mixture compaction process. This helps to improve the quality control of concrete mixtures at the stage of moulding, which is important for improving the reliability and durability of concrete structures. The use of “Shar-1” simplifies and speeds up the testing process, reducing the influence of subjective factors and increasing the objectivity of measurements.
Discussion and Conclusion. The section focuses on the difference between traditional research on control of concrete mixture compaction and with the use of the device “Shar-1”, which allows to measure the density of concrete mixture in the process of moulding. The method allows to quickly obtain data on density, timely correct the technology if necessary. It is planned to improve the device with additional functions in the future.

Key words: concrete, reinforced concrete, concrete mixture, compaction, vibration compaction, vibration platform, vibrations

For citation. Edilyan SV, Yavruyan HS. Method for Assessing the Density of a Concrete Mix during Molding. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2025;4(2):67–74. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-67-74

Введение. Первые сведения о применении вибрации для уплотнения бетонных смесей с использованием пневматических и храповиковых виброустройств появились в 1890 году. До 1915 года новые научные данные по этой теме отсутствуют. В 1915 году начались исследования виброуплотнённого бетона и ручной кладки с их сравнительной оценкой, что вызвало появление новых публикаций для сравнительного анализа. Эффективность виброформования бетонных изделий зависит от правильного выбора режимов вибрации и параметров оборудования. Например, Теличенко В.И. и Васильев В.Г. описали вибростол — подвижную платформу на подпружиненных опорах с двумя вибраторами, создающими направленные колебания, передающиеся форме и смеси [1].

Однако многие традиционные методы уплотнения бетона не всегда обеспечивают необходимое качество, особенно при работе с жесткими бетонными смесями, так как чаще всего являются либо разрушающими, либо недостаточно оперативными, что ограничивает их применение в условиях массового производства. Необходимо отметить, что качество бетона напрямую зависит от степени его уплотнения, поскольку это влияет на прочность, долговечность и эксплуатационные характеристики конструкций.

Для создания прочного и надежного бетона очень важно правильно уплотнить бетонную смесь. Мы можем добиться этого с помощью вибрации — движения, которое помогает частичкам бетона плотно прилегать друг к другу.

Вибрационные установки играют ключевую роль в уплотнении бетонных смесей, обеспечивая удаление воздуха и пустот из массы бетона, что значительно повышает его прочность и долговечность. Если смесь достаточно жидкая, то даже слабая вибрация, например, под действием собственного веса, может быть достаточной. Для более густых смесей нам понадобится более мощная вибрация и, возможно, дополнительное давление. Методы оптимизации параметров вибрационных установок, таких как частота и амплитуда колебаний, для достижения

максимальной эффективности работы машин, а также анализ и совершенствование конструкций электровибрационных машин с продольным зазором магнитопровода были подробно рассмотрены в [2].

Благодаря современным исследованиям известно, что для первоначального уплотнения бетона достаточно всего 20–30 секунд. За это время частички бетона под действием силы тяжести перераспределяются, образуя прочную и стабильную структуру. В результате воздух из смеси удаляется, и в конечном итоге его количество не превышает 3–4 % [3].

В следующей стадии выполняется лишь небольшое объединение компонентов благодаря удалению части воздуха. Длительность второй стадии технологического передела превосходит продолжительность первой стадии и достигает на стандартных виброплощадках 2–3 минут. Конец второй стадии основывается на окончании осадки бетонной смеси. По окончании этого свежеуложенный бетон можно признать готовым к дальнейшей обработке, поскольку дополнительная вибрация не приводит к существенному увеличению плотности, прочности или качества его поверхности [4].

Вибрация играет важную роль в формовании бетона, но её эффективность зависит от многих факторов. Хотя интенсивность вибрации может снижаться по мере удаления от источника из-за свойств материала и внутреннего трения, это открывает возможности для оптимизации процесса [5, 6].

Качество и прочность бетона напрямую зависят от правильной технологии укладки и уплотнения бетонной смеси, поскольку эти процессы влияют на однородность структуры материала. Понимая, как волны вибрации распространяются и взаимодействуют в бетонной смеси, мы можем разработать более эффективные методы уплотнения. Хотя затухание вибрации на расстоянии от источника является естественным явлением, вызванным свойствами материала и внутренним трением, это не является непреодолимым препятствием. Все это позволит нам добиться однородной структуры бетона даже в изделиях сложной формы. Исследования в этой области продолжаются, и мы уверены, что в будущем сможем еще больше улучшить качество и эффективность производства бетонных изделий [7–9].

Изучение взаимодействия вибрации с отраженными волнами и собственными колебаниями бетона позволит нам создать оптимальные условия для уплотнения даже в изделиях сложной формы. Разработка новых методов управления вибрацией открывает путь к повышению эффективности производства, увеличению срока службы оборудования и созданию высококачественных бетонных изделий [10].

Наряду с модернизацией оборудования ученые активно разрабатывают новый метод оценки качества бетонной смеси, который основан на её способности противостоять расслаиванию. Этот метод использует специальный коэффициент, показывающий, насколько эффективно цемент распределен в бетоне. Предполагается, что в качественной бетонной смеси, где все компоненты равномерно смешаны, вода будет вымывать больше цемента при медленном потоке, чем при быстром. Это позволит быстро и точно определить качество бетона и гарантировать его прочность и долговечность [11].

При вибрационном уплотнении бетонной смеси происходят механические воздействия, которые приводят к постоянному разрушению связей между ее составляющими частицами. Это, в свою очередь, способствует снижению сил трения и сцепления. Бетонная смесь благодаря своей особой консистенции равномерно распределяется под воздействием силы тяжести, создавая однородную массу. Для получения предельной прочности и долговечности железобетонных изделий из тяжёлых смесей необходимо достигнуть высокой плотности. Ученые стремятся к тому, чтобы реальная плотность бетона была почти идеальной. Это определяется коэффициентом уплотнения, который должен быть не менее 0,98, а предпочтительно — приближаться к единице. Такой метод обеспечивает надёжность и долговечность железобетонных изделий [12].

В течение длительного времени считалось, что эффективность виброуплотнения бетона достигает максимума при резонансной связи частиц бетонной смеси с источником вибрации. Однако каждая фракция заполнителя имеет свою уникальную частоту колебаний. Это наводит на мысль о том, что оптимальный эффект уплотнения может быть достигнут за счёт многочастотного воздействия, которое выведет в резонанс все частицы смеси. В действительности, в бетонной смеси наблюдается феномен самосинхронизации, обусловленный связующим действием цементного теста, которое объединяет отдельные зерна заполнителя. Таким образом, повышение эффективности вибрационного уплотнения может быть достигнуто путём оптимизации режима работы вибратора, способствующего синхронизации собственных колебаний всего объёма бетонной смеси с частотой его работы [13].

Частота колебаний обуславливает скорость движения частиц бетонной смеси. Изменение частоты позволяет контролировать скорость и интенсивность уплотнения. К примеру, для более плотных бетонных смесей возможно приложить более высокую частоту колебаний [14, 15].

В последние годы наблюдается рост интереса к оптимизации параметров вибрационного уплотнения с целью повышения эффективности производства и снижения затрат. В связи с этим возникает необходимость системного

анализа и управления параметрами вибрации (частотой, амплитудой, продолжительностью и режимами воздействия). В перспективе данный метод контроля качества может быть достигнут путем разработки эффективного и точного метода оценки плотности бетонной смеси непосредственно в процессе формования, что позволит повысить качество продукции и оптимизировать производственные затраты. В данной статье рассматриваются основные подходы к измерению уплотнения бетонных смесей экспериментальным путем с применением разработанного нами прибора «Шар-1».

Материалы и методы. Управление параметрами вибрационного уплотнения требует тщательного планирования и контроля. Необходимо учитывать тип бетонной смеси, размер и форму конструкции, а также требования к качеству бетона. Применение различных методов и подходов позволяет достичь оптимальных результатов и обеспечить долговечность бетонных конструкций [16].

Время действия вибрации описывает продолжительность процесса уплотнения. Оптимизация времени позволяет добиться равномерного распределения бетонной смеси и исключить появление пустот и неоднородностей. Слишком долгое воздействие вибрации может спровоцировать расслоение бетонной смеси, поэтому важно найти равновесие. На рис. 1 наглядно видно влияние продолжительности уплотнения на прочность бетона. При кратковременной и долгосрочной длительности времени уплотнения прочность не растет, то есть необходимо находить точку во времени, при которой будет зафиксировано максимальное уплотнение.

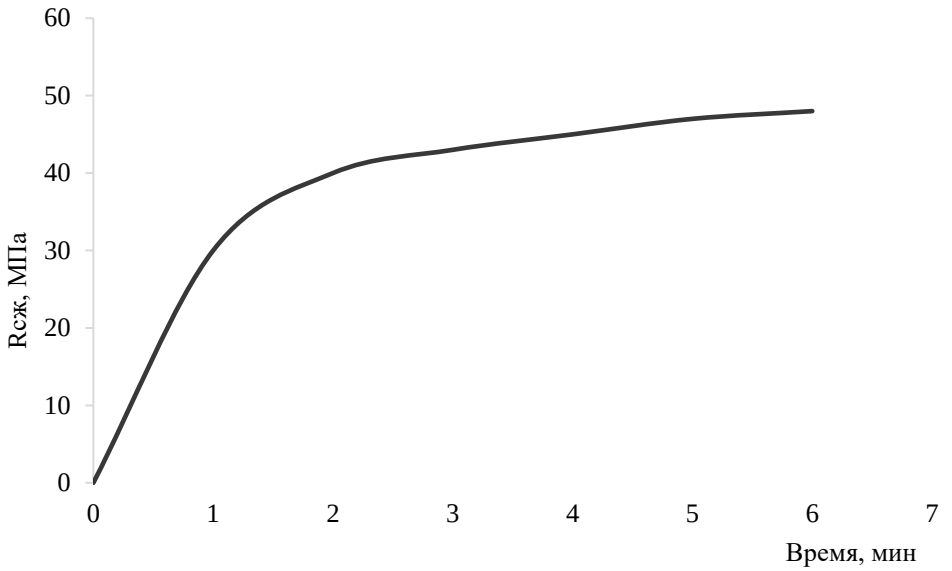


Рис. 1. Влияние продолжительности уплотнения на прочность бетона

Для понимания процессов, происходящих в бетонной смеси при её уплотнении, нами разработан принципиально новый прибор «Шар-1» (рис. 2, 3).

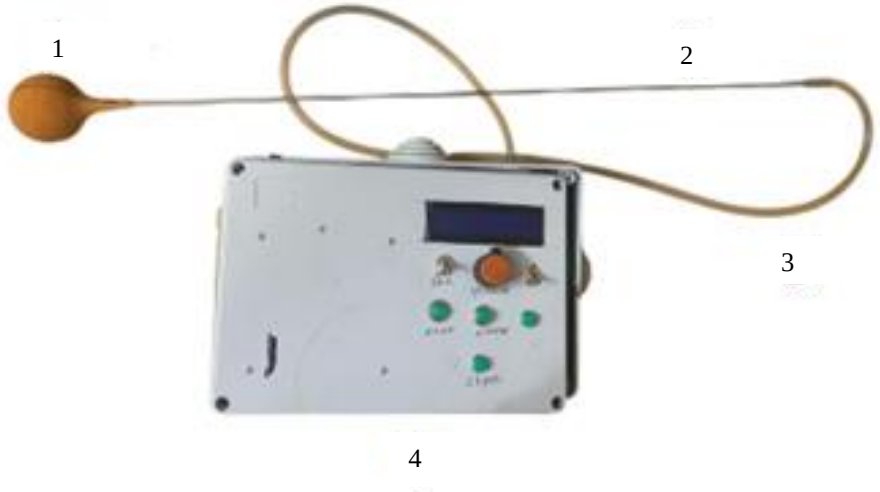


Рис. 2. Основные части прибора «Шар-1»: 1 — резиновый шарик; 2 — металлическая трубка; 3 — резиновая трубка; 4 — панель управления

https://www.stsg-donstu.ru

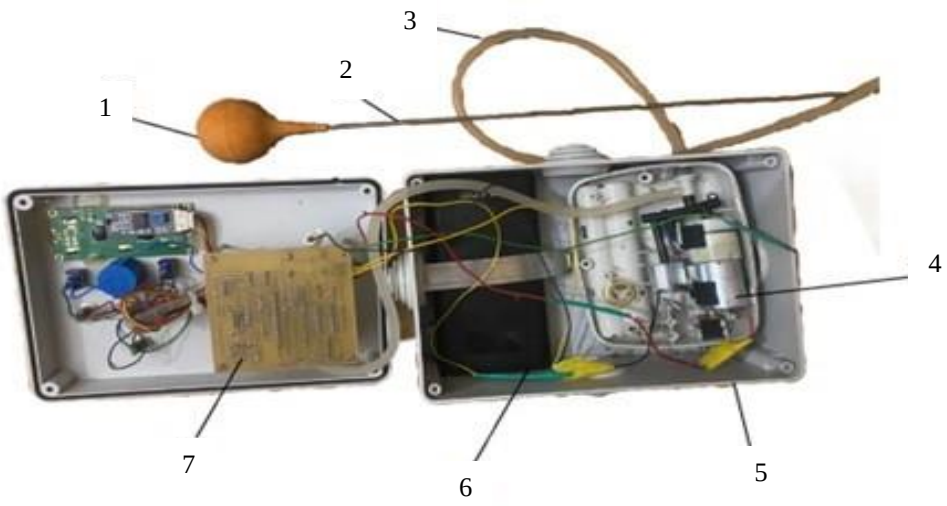


Рис. 3. Внутренние компоненты прибора «Шар-1»: *1* — резиновый шарик; *2* — металлическая трубка; *3* — резиновая трубка; *4* — панель управления; *5* — корпус устройства; *6* — аккумулятор, *7* — плата питания

Основным рабочим органом прибора является резиновый шар, находящийся под давлением, соединенный через металлическую полую трубку и резиновую трубку с насосом, расположенным в пульте управления. Внутри резинового шарика установлены: датчик давления; часы реального времени; датчик вибрации, измеряющий амплитуду и колебания. В корпусе размещены: SD-накопитель для записи параметров на плату питания; аккумулятор для автономной работы; насос, с помощью которого в шаре создается давление для тестирования.

Шарик под давлением устанавливается на половину высоты металлической формы, и начинается процесс уплотнения бетонной смеси. Исходя из физики уплотнения бетонной смеси, нам известно, что при вибрации крупные частицы стремятся вниз, а мелкие частицы, соответственно, вверх, что называется расслоением. Шарик под определенным давлением в 100 единиц, помещенный в форму, начинает сжиматься за счет давления крупной фракции бетонной смеси и достигает максимального значения. Максимальным значением прибора «Шар-1» считается то значение, когда при уплотнении бетонной смеси в системе наступит равновесие, то есть расслоения бетонной смеси не произойдет. При расслоении показания начнут стремительно падать, так как равновесие в системе исчезнет, и крупная фракция бетонной смеси окажется внизу, а мелкая (цементное тесто) фракция — сверху. Это говорит нам о том, что плотность между верхним слоем и нижним слоями разная, то есть произошло расслоение бетонной смеси.

Результаты исследования. Разработка нового прибора «Шар-1» направлена на определение оптимального количественного показателя, отражающего полную степень уплотнения бетонной смеси с сохранением ее прочностных характеристик. Для определения данного показателя, рабочий орган прибора «Шар-1» устанавливается в форму с последовательным введением бетонной смеси. При запуске процесса уплотнения прибор идентифицирует давление на рабочий орган с течением времени и фиксирует максимальные показатели, сообщающие о пиковом значении уплотнения бетонной смеси.

График, изображенный на рис. 4, показывает, как выглядит точка максимального уплотнения бетонной смести в ходе проведенных экспериментов.

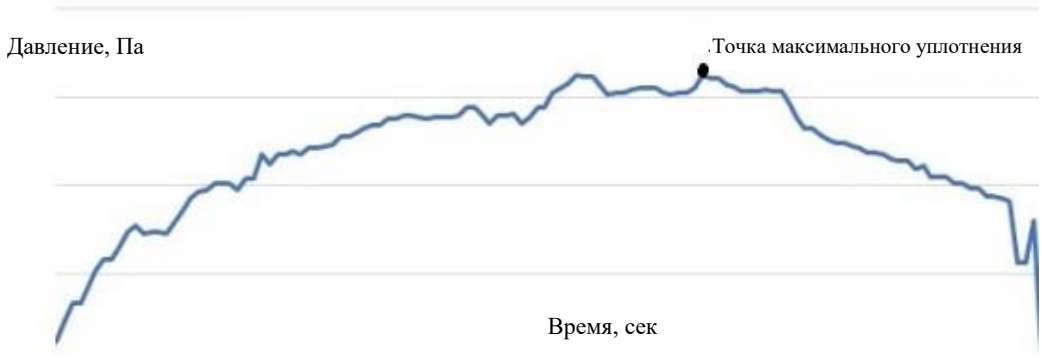


Рис. 4. Точка максимального уплотнения бетонной смеси

В настоящее время ведется тестирование и отладка прибора. Важно подчеркнуть, что применение приборов, способных измерять степень уплотнения бетонной смеси, в настоящий момент ограничено. Тем не менее внедрение данного метода и прибора «Шар-1» станет прорывом в технологии производства бетона, оказывая позитивное влияние на экономический рост предприятий.

Обсуждение и заключение. Обеспечение качественного уплотнения бетонной смеси — это важный шаг в строительстве, имеющий огромное значение для прочности будущих конструкций.

В ходе написания статьи были изучены работы многих авторов и найдена перспективная отрасль развития, а именно разработка способа контроля уплотнения бетонной смеси в процессе формования, что и вдохновило нас на разработку совершенно нового прибора «Шар-1». Данный метод оценки плотности с помощью разработанного прибора дает возможность оперативно получить данных о плотности и позволяет своевременно корректировать технологию уплотнения, что улучшает качество и долговечность бетонных изделий, а также сокращает время испытаний и снижает затраты на подготовку и проведение измерений по сравнению с традиционными лабораторными методами.

Массовое использование данной разработки на заводах по производству сборного железобетона повлечет за собой повышение качества изделий, сокращение человеческого фактора, следовательно, уменьшение вероятности частых погрешностей и уменьшение производственных затрат.

Нами планируется доработать прибор до более эргономичного вида и в ходе проведения дальнейших испытаний внести дополнительные функции, позволяющие создать ещё более комплексный и многофункциональный прибор.

Список литературы/References

1. Эдилян С.В., Явруян Х.С. Аналитический обзор способов управления параметрами вибрационного уплотнения бетонных смесей. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(3):15–21. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-3-15-21

Edilyan SV, Yavruyan HS Analytical Review of Methods for Controlling the Parameters of Vibration Compaction of Concrete Mixes. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. (In Russ.) 2024;3(3):15–21. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-3-15-21

2. Джиоев В.К., Гобозов С.Ф. Анализ электровибрационных машин и пути повышения их технических показателей. *Вестник Международной Академии Наук, экологии безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ)*. 2010;15(2).

Dzhioev VK, Gobozov SF Analysis of Electrovibration Machines and Ways to Improve their Technical Performance. *Bulletin of the International Academy of Sciences, Ecology of Life Safety (MANEB).* 2010;15(2). (In Russ.)

3. Сторожук Н.А., Дехта Т.Н. Оптимальное управление уплотнением бетонных смесей вибрационным способом и его особенности. *Вестник ПДАБА.* 2018;4:243–243. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/optimalnoe-upravlenie-uplotneniem-betonnyh-smesey-vibratsionnym-sposobom-i-ego-osobennosti (дата обращения: 05.04.2025).

Storozhuk NA, Dekhta TN Optimal Control of Concrete Mixtures Compacting by Vvibration Method and its Features.*Bulletin of PDABA.* 2018;4:243–243. (In Russ.) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/optimalnoe-upravlenie-uplotneniem-betonnyh-smesey-vibratsionnym-sposobom-i-ego-osobennosti (accessed: 05.04.2025).

4. Yavruyan KhS, Lotoshnikova EO, Edilyan SV. Production technology of small products from fine-grained concrete. *Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East (AFE-2022).* 2024;733:527–536. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37978-9_51

5. Yavruyan HS, Lotoshnikova EO, Edilyan SV, Gaishun AS. Methodology for the selection of the composition for the production of products of hard-pressed concrete with industrial wastes. *Environmental risks and safety in mechanical engineering.* 2023;376:03025. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337603025

6. Эдилян С.В., Явруян Х.С. Обзор способов оптимизации режимов виброуплотнения бетонных смесей. В: *Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники*. 2023». Ростов-на-Дону: ДГТУ; 2023. С. 997–998. URL: https://ntb.donstu.ru/conference2023 (дата обращения 05.04.2025).

Edilyan SV, Yavruyan HS Review of Methods for Optimizing Vibration Compaction Modes of Concrete Mixtures. *Actual Problems of Science and Technology*. DSTU. 2023. 997–998 p. (In Russ.) URL: https://ntb.donstu.ru/conference2023 (accessed: 05.04.2025).

7. Гараджаев А., Мырадов Й, Баллыев Г, Рахымов Б. Укладка и уплотнение бетонной смеси. *Символ науки*. 2023;12(2):173–175. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ukladka-i-uplotnenie-betonnoy-smesi (дата обращения 05.04.2025).

Garadzhaev A, Myradov Y, Ballyev G, Rakhymov B Placing and Compaction of Concrete Mixture. *Symbol of Science*. 2023;12(2):173–175. (In Russ.) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ukladka-i-uplotnenie-betonnoy-smesi (accessed: 05.04.2025).

8. Стародубцев В.Г., Горяинов Д.А. Исследование влияния технологии укладки и уплотнения бетонной смеси на однородность структуры и свойств бетона. *Auditorium.* 2018;1(17). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-tehnologii-ukladki-i-uplotneniya-betonnoy-smesi-na-odnorodnost-struktury-i-svoystv-betona (дата обращения 05.04.2025).

Starodubtsev VG, Goryainov DA Study of the Influence of Concrete Mixture Laying and Compaction Technology on the Homogeneity of the Structure and Properties of Concrete. *Auditorium.* 2018. (In Russ.) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-tehnologii-ukladki-i-uplotneniya-betonnoy-smesi-na-odnorodnost-struktury-i-svoystv-betona (accessed: 05.04.2025)

9. Фурманов Д.В., Барулев А.В., Тарасова Н.Е., Чабуткин Е.К. Динамическое торможение инерционных вибраторов виброплощадок для уплотнения бетонных смесей. *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. 2019;16(2):134–144. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-2-134-144

Furmanov DV, Barulev AV, Tarasova NE, Chabutkin EK Dynamic Braking of Inertial Vibrators of Vibratory Platforms for Compaction of Concrete Mixtures. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway Academy.* 2019;16(2):134–144. (In Russ.) https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-2-134-144

10. Бурханов Р.Х. Уплотнение жесткой бетонной смеси рабочим органом, совершающим сложное пространственное движение. *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2013;2(71). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/uplotnenie-zhestkoy-betonnoy-smesi-rabochim-organom-sovershayuschim-slozhnoe-prostranstvennoe-dvizhenie (дата обращения 05.04.2025).

Burkhanov RKh Compaction of Rigid Concrete Mixture by a Working Element Performing Complex Spatial Movement. *Bulletin of the Saratov State Technical University.* 2013;2(71) (In Russ.) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/uplotnenie-zhestkoy-betonnoy-smesi-rabochim-organom-sovershayuschim-slozhnoe-prostranstvennoe-dvizhenie

11. Меркулов С.И. Живучесть железобетонных конструкций и конструктивных систем. *Строительство и реконструкция*. 2015;3:58–61. https://cyberleninka.ru/article/n/zhivuchest-zhelezobetonnyh-konstruktsiy-i-konstruktivnyh-sistem (дата обращения 05.04.2025).

Merkulov SI Viability of Reinforced Concrete Structures and Structural Systems. *Construction and Reconstruction.* 2015;3:58–61. (In Russ.) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/zhivuchest-zhelezobetonnyh-konstruktsiy-i-konstruktivnyh-sistem (accessed: 05.04.2025)

12. Теличенко В.И., Васильев В.Г. Исследование спектра импульсов бетонной смеси при ударно-вибрационном формовании. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова.* 2017;4:80–85. URL: https://bulletinbstu.editorum.ru/ru/nauka/article/16036/view (дата обращения 05.04.2025).

Telichenko VI, Vasiliev VG. Investigation of the spectrum of concrete mixture pulses at shock-vibration moulding. *Bulletin of V.G. Shukhov BSTU*. 2017;4:80–85. (In Russ.) URL: https://bulletinbstu.editorum.ru/ru/nauka/article/16036/view (accessed: 05.04.2025).

13. Грицюк Т.В. *Влияние режимов формования на качество поверхности железобетонных изделий*. Автореф. дис. канд. технич. наук. Москва: Московский институт коммунального хозяйства и строительства; 1992. С. 9–20. URL: https://elibrary.ru/zkpudb (дата обращения 05.04.2025).

Gritsyuk TV *Influence of Molding Modes on the Surface Quality of Reinforced Concrete Products.* The Author's PhD in Engineering Disseration. Moscow; 1992. Pp. 9–20 p. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/zkpudb (accessed: 05.04.2025)

14. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. *Основы бетоноведения.* Санкт-Петербург: Строй Бетон; 2006. 692 с.

Dvorkin LI *Fundamentals of Concrete Science.* Saint Petersburg; 2006. 692 p.

15. Banfill PFG, Teixeira MAOM, Craik RJM. Rheology and Vibration of Fresh Concrete: Predicting the Radius of Action of Poker Vibrators from Wave Propagation. *Cement and Concrete Research.* 2011;41(9):932–941. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.011

16. Иткин А.Ф. *Вибрационные машины для формования бетонных смесей.* Киев: МП «Леся»; 2009. 152 с. Itkin AF. *Vibrating Machines for Molding Concrete Mixtures*. Kiev. MP "Lesya"; 2009. 152 p.

Об авторах:

Спартак Варданович Эдилян, аспирант кафедры технологического инжиниринга и экспертизы в стройиндустрии Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, spartak-edilyan@yandex.ru

Хунгианос Степанович Явруян, кандидат технических наук, доцент кафедры технологического инжиниринга и экспертизы в стройиндустрии Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, khungianos@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

С.В. Эдилян: формирование цели и задачи исследования, анализ результатов исследования, формирование выводов.

Х.С. Явруян: научное руководство, формирование основного концепции, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Spartak V. Edilyan, PhD Student of the Technological Engineering and Expertise in the Construction Industry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), ORCID, spartak-edilyan@yandex.ru

Khungianos S. Yavruyan, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Technological Engineering and Expertise in the Construction Industry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), ORCID, khungianos@mail.ru

Claimed Contributorship:

SV Edilyan: formulating the aim and objectives of the research, analysis of the research results, formulating the conclusions.

KhS Yavruyan: scientific supervision, formulating the main concept, refining the text, correcting 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 manuscr*ipt**

Поступила в редакцию / Received 10.04.2025
Поступила после рецензирования / Reviewed 26.04.2025
Принята к публикации / Accepted 12.05.2025

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES

CC BY

Check for updates

УДК 69.05
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-75-84

Оригинальное эмпирическое исследование

Оценка преимуществ и проблем внедрения 4D-моделирования в строительство

К.М. Крюков ✉
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ kkrioukov@gmail.com

EDN: DTRROH

Аннотация

Введение. Усовершенствованная визуализация — один из результатов внедрения технологии информационного моделирования. Технология информационного моделирования в основном использовалась проектировщиками при разработке цифровой 3D-модели объекта. 4D-моделирование объединяет организационно-технологическую последовательность работ в проекте с параметрической цифровой 3D-моделью строящегося объекта. 4D-моделирование потенциально может способствовать эффективной реализации проекта, но данные о масштабах внедрения 4D ограничены, в практической деятельности отсутствуют эмпирические данные о возможностях и проблемах использования данной технологии. Целью исследования является изучение состояния внедрения 4D-моделирования, преимуществ при использовании, основных проблем, мешающих эффективной реализации, а также стимулов для внедрения в строительном секторе.

Материалы и методы. В статье был использован качественный анализ функционала 4D-моделирования для формирования анкеты в целях опроса среди специалистов строительной отрасли. На основании анализа массива полученных данных проведен статистический анализ для выявления ключевых проблем и стимулов внедрения 4D-моделирования в деятельность строительных организаций.

На основании разработанной анкеты был проведен опрос среди заказчиков и подрядчиков строительной отрасли, которые были отобраны выборочным методом. Для анализа полученных данных использовались методы описательной статистики. Индекс относительной важности использовался для ранжирования показателей, чтобы понять относительную важность, как они воспринимаются респондентами. *T*-тест использовался для проверки статистической значимости предполагаемых различий между клиентами и подрядчиками. Коэффициент Альфа Кронбаха использовался для обеспечения внутренней согласованности и надежности данных для анализа.

Результаты исследования. Определены основные причины недостаточного внедрения в строительных организациях технологии 4D-моделирования наряду с высокой осведомленностью о преимуществах использования. Выделены критические проблемы, препятствующие реализации данной технологии, а также ключевые факторы, которые могут стимулировать реализацию инвестиционно-строительных проектов с применением 4D-моделирования.

Обсуждение и заключение. Результаты исследования обеспечивают основу теоретического анализа для решения проблем внедрения 4D-моделирования в строительной отрасли. Исследование использует теорию устойчивого развития и теорию полного жизненного цикла в качестве теоретической основы, сочетает в себе качественные и количественные методы исследования и проводит углубленное изучение различных факторов, которые влияют на управление инвестиционно-строительными проектами с использованием технологии 4D-моделирования.

Ключевые слова: 4D-моделирование, технология информационного моделирования, внедрение BIM технологий

Для цитирования. Крюков К.М. Оценка преимуществ и проблем внедрения 4D-моделирования в строительстве. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(2):75–84. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-75-84

© Крюков К.М., 2025

Original Empirical Research

Assessing the Benefits and Challenges of Implementing 4D Modeling in Construction

Konstantin M. Kryukov ✉
Don State Technical University, Rostov on Don, Russian Federation
✉ kkrioukov@gmail.com

Abstract

Introduction. Improved visualization is one of the results of the implementation of information modeling technology. Information modeling technology was mainly used by designers when developing a digital 3D model of an object. 4D modeling combines the organizational and technological sequence of works in the project with a parametric digital 3D model of the object under construction. 4D modeling can potentially contribute to the effective implementation of the project, but data on the scale of 4D implementation are limited, there is no empirical data in practice on the possibilities and problems of using this technology. The purpose of the study is to study the state of implementation of 4D modeling, the advantages of use, the main problems that hinder effective implementation, as well as incentives for implementation in the construction sector.

Materials and Methods. The article used a qualitative analysis of the functionality of 4D modeling to form a questionnaire for a survey among specialists in the construction industry. Based on the analysis of the array of data obtained, a statistical analysis was carried out to identify key problems and incentives for the implementation of 4D modeling in the activities of construction organizations.

Results. The main reasons for the insufficient implementation of 4D modeling technology in construction organizations are identified along with high awareness of the benefits of use. Critical problems that hinder the implementation of this technology are identified, as well as key factors that can stimulate the implementation of investment and construction projects using 4D modeling.

Discussion and Conclusion. The results of the study provide a basis for theoretical analysis to solve the problems of implementing 4D modeling in the construction industry. The study uses the theory of sustainable development and the theory of the full life cycle as a theoretical basis, combines qualitative and quantitative research methods, and conducts an in-depth study of various factors that affect the management of investment and construction projects using 4D modeling technology.

Keywords*:* 4D modeling; information modeling technology; implementation of BIM technologies

For citation. Kryukov KM Assessing the Benefits and Challenges of Implementing 4D Modeling in Construction. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2025;4(2):75–84. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-75-84

Введение. Строительство является значимой отраслью экономики России и занимает 5 место среди отраслей народного хозяйства по вкладу во внутренний валовый продукт. Отрасль динамично развивается[1] (рис. 1).

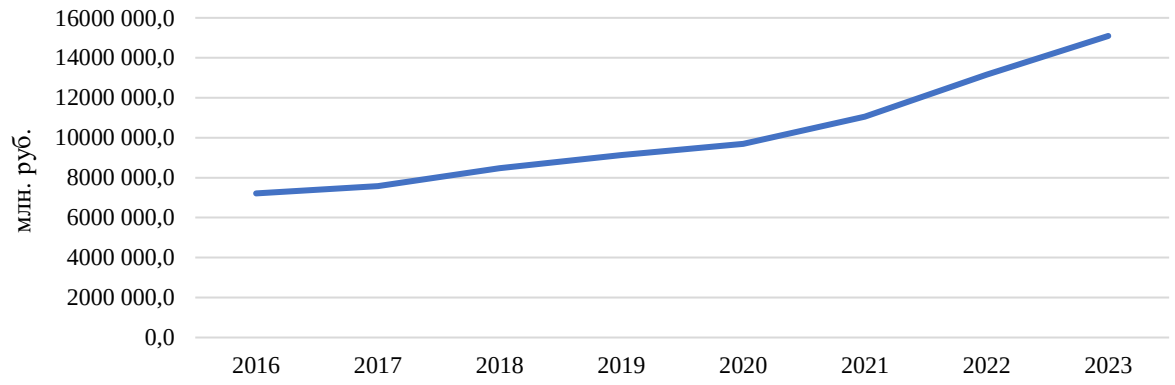


Рис. 1. Динамика показателя «Объем работ, выполненных собственными силами по виду деятельности «Строительство»»

Уровень сложности инвестиционно-строительных проектов очень высок из-за увеличивающихся требований заказчиков. Традиционные системы реализации проектов ориентированы прежде всего на сроки выполнения проекта и его стоимость. К сожалению, в сложившихся условиях проектировщикам, подрядчикам и производителям

[1] Данные статистики получены с сайта https://rosstat.gov.ru/

строительных материалов далеко не всегда удается выполнить поставленные задачи в срок, в рамках бюджета и эффективно удовлетворить потребности своих клиентов, не многие из них достигают желаемых результатов [1].

Информационное моделирование зданий предоставляет участникам инвестиционно-строительной деятельности платформу для совместной работы в общей среде данных для повышения эффективности и улучшения результатов. 3D-модель проектной документации можно использовать для планирования строительства. При добавлении к модели параметра «время» реализуется 4D-моделирование. 4D-моделирование повышает эффективность процессов за счет сокращения непродуктивных расходов и помогает своевременно завершать проекты в рамках бюджета, контролируя график строительства и повышая ценность для заказчиков [2]. Однако, несмотря на предоставляемые возможности, 4D-моделирование недостаточно широко используется участниками строительных проектов. Поэтому предлагается оценить степень использования и понять точку зрения ключевых субъектов строительства на преимущества, препятствия и мотивационные силы 4D-моделирования.

Традиционные методы планирования не связаны напрямую с моделью проектирования и строительства [3], разделы планов не полностью синхронизируются с проектом, что затрудняет для участников проекта легкое понимание плана и его влияние на управление логистикой на объекте [4]. Отсутствие данной связи приводит к таким последствиям, как переделки, неравномерность и нецелесообразное использование ресурсов, что увеличивает время и стоимость строительства [5].

4D-моделирование также помогает ускорить процесс строительства, тем самым уменьшая количество ошибок и легко их устраняя на стадии проектирования, позволяя избежать существенных проблем, решение которых зачастую довольно трудоемкое и дорогостоящее на более позднем этапе строительства [6, 7].

4D-моделирование предлагает расширенное видение планирования, проектирования и строительства, разработки или поддержки единой информационной модели, которая включает всю необходимую информацию о жизненном цикле проекта. 4D-моделирование играет важную роль в координации между проектировщиками и заказчиками на этапе планирования. Опыт подрядчиков очень важен при разработке 4D-модели для процессов планирования и может предоставить ценную информацию о возможности строительства, ориентировочной стоимости строительства и последовательности выполнения работ [4]. Это помогает заинтересованным сторонам проекта выявлять проблемы на этапе строительства и отслеживать процесс выполнения работ [2, 8]. 4D-моделирование помогает создавать виртуальные проекты и стимулировать их различными сценариями, что дает всем заинтересованным сторонам более четкое представление о рисках проекта на ранней стадии и их уменьшении путем принятия корректирующих мер.

К ключевым преимуществам и применимости 4D-моделирования можно отнести: визуализацию хода строительства в любое время с возможностью прогноза [8, 9]; планирование логистики (движение ресурсов на строительной площадке) [10]; планировку площадки (уменьшает потери, которые могут возникнуть в процессе строительства, тем самым улучшая возможности строительства) [9, 11]; планирование с учетом местоположения [9]; четкое понимание строительного процесса и методологии строительства [9]; проверку графиков с помощью моделирования [12]; обсуждение хода работы на совещаниях для лучшего понимания [12]; планирование безопасности (визуальное представление опасностей и плана безопасности) [9, 11]; анализ документации и претензий (довольно легко доказать, кто несет ответственность за задержку, и какие потенциальные результаты ожидаются) [12]; снижение риска в проекте [9]; повышение удовлетворенности клиентов [10]; мониторинг проекта с моделированием расписания, которое помогает уменьшить объем необходимых доработок [9].

Несмотря на преимущества, которые 4D-моделирование предоставляет строительной отрасли, существуют технические и нетехнические проблемы, которые препятствуют широкому распространению 4D-моделирования [8]. На широкое внедрение BIM и 4D-моделирования оказывают большее влияние нетехнические барьеры, чем технические. Информация о масштабах внедрения 4D-моделирования в России довольно ограничена. Поэтому был изучен опыт использования 4D-моделирования в зарубежных странах, где данный метод получил наибольшее распространение. К таким странам можно отнести Великобританию, Францию, Словакию, США, Иран и др. Ученые и практики этих стран отмечают проблемы, связанные с разработкой 4D-модели (объем модели, уровень детализации, временные компоненты, декомпозиция и агрегирование) и отсутствием надлежащих планов выполнения, руководств и стандартов, которым необходимо следовать, для внедрения 4D -моделирования. Также отмечается нецелесообразность затрат времени на обучение и нехватка времени для обучения у сотрудников. Одним из важных препятствий внедрения является отсутствие опыта 4D-моделирования на рынке, отсутствие стандартов для 4D-моделирования, трудности в понимании методов и более длительный процесс создания 4D-модели [9–13]. Отмечаются также отсутствие спроса со стороны клиента на использование 4D-модели, высокие затраты на инвестиции в программное обеспечение, высокие затраты на обучение, отсутствие знаний 4D-моделирования среди рабочей силы, сопротивление сотрудников отказу от традиционных

методов планирования строительства и переходу к 4D-моделированию и проблемы с обменом данными между программным обеспечением, связанные с совместимостью ПО.

Строительная отрасль в некоторой степени осознала ценность BIM и начала использовать его на этапе проектирования, но использование BIM на этапах планирования и строительства растет медленными темпами. Отсутствуют исследования реализации 4D-моделирования в России. Следовательно, возникает необходимость исследовать статус внедрения 4D-моделирования в России и изучить предполагаемые преимущества и проблемы различными субъектами инвестиционно-строительной деятельности в строительном секторе. Целью исследования является изучение масштабов использования 4D-моделирования, взгляды основных заинтересованных сторон на 4D-моделирование с точки зрения преимуществ, препятствий и мотивационных сил в российском строительстве.

Материалы и методы. Целевой аудиторией данного исследования являются заказчики и подрядчики строительной отрасли. Для отбора респондентов был использован выборочный метод. Для проведения опроса была разработана анкета, включающая информацию о демографических данных участников, а также вопросы о применимости 4D-моделирования, преимуществах 4D-моделей по сравнению с традиционными подходами к планированию строительства, проблемах внедрения 4D-моделирования и мотивационных усилиях по внедрению 4D-моделирования.

Для анализа данных использовались методы описательной статистики. Индекс относительной важности используется для ранжирования показателей, чтобы понять относительную важность, как они воспринимаются респондентами. Т-тест используется для проверки статистической значимости предполагаемых различий между клиентами и подрядчиками, если таковые имеются. Коэффициент Альфа Кронбаха (Cronbach Alpha) используется для обеспечения внутренней согласованности и надежности данных для анализа.

Инструмент анкетирования был создан в электронном виде и запросы были разосланы заказчикам-застройщикам и подрядчикам Южного Федерального округа по электронной почте. Получено 27 ответов, в том числе от 17 подрядчиков и 10 — от заказчиков-застройщиков. Cronbach Alpha используется для оценки внутренней согласованности инструмента и надежности данных, собранных для дальнейшего анализа. Рассчитанные значения Альфа Кронбаха выполнены в Excel и представлены в таблице 1. Все значения превышают 0,7 (порог для социальных исследований), и, следовательно, собранные данные являются надежными и приемлемыми для дальнейшего анализа.

Таблица 1

Статистика надежности

Наименование	Альфа Кронбаха	Количество индикаторов
Возможность использования	0,906	12
Преимущества	0,925	12
Проблемы	0,812	14
Стимулы применения	0,835	6
Всего	0,894	44

Результаты исследования. Функции технологии информационного моделирования используются для оценки возможности применения преимуществ, препятствий и движущих сил 4D-моделирования. На основании исследования использованных источников были выработаны индикаторы, которые подлежат дальнейшему исследованию (таблица 2).

Количественный подход, основанный на анкетном опросе, используется для изучения взглядов специалистов в области строительства на применимость, преимущества, препятствия и движущие силы использования 4D-моделирования при реализации инвестиционно-строительных проектов.

Было получено 27 ответов, большинство из которых представлено крупными организациями (71,8 %), а остальные — средние (10,8 %) и мелкие (17,4 %) организации. Респонденты относятся к высшему менеджменту (23,9 %), среднему управленческому (54,8 %) и операционному (21,3 %) уровню в своих организациях. Опыт работы респондентов в строительстве: 35 % имеют опыт работы более 10 лет, 36 % респондентов имеют опыт работы 5–10 лет, 19 % респондентов имеют опыт работы 2–5 лет и менее 2 лет — 10 % опрошенных.

Осведомленность и использование 4D-моделирования. Было замечено, что большинство (74 %) респондентов знают о 4D-моделировании, но не использовали его, а 11 % знают и используют его, 15 % ответили, что не знают о 4D-моделировании (рис. 2). Некоторые респонденты оперируют понятием 4D BIM, что по существу является равнозначным понятием 4D-моделирования.

https://www.stsg-donstu.ru

Таблица 2

Функции BIM, проблемы и стимулы использования 4D-моделирования

№ показателя	Наименование показателя
1. Функционал, реализуемый при внедрении 4D-моделирования	
1.1	Планирование логистики
1.2	Планирование организации площадки строительства
1.3	Взаимоувязка отдельных планов строительства подрядных организаций, участвующих в строительстве
1.4	Планирование организационно-технологической последовательности производства работ
1.5	Визуализация хода строительства
1.6	Планирование с учетом местоположения
1.7	Проверка плана строительства с использованием моделирования
1.8	Возможность проведения совещаний по ходу выполнения работ
1.9	Планирование безопасности
1.10	Документирование и анализ претензий
1.11	Управление рисками
1.12	Вариантное проектирование с моделированием графика строительства
2. Проблемы внедрения 4D-моделирования	
2.1	Отсутствие спроса со стороны клиента на использование 4D-модели
2.2	Высокие затраты на инвестиции в программное обеспечение
2.3	Высокие затраты на обучение
2.4	Недостаток знаний 4D-моделирования у сотрудников
2.5	Отсутствие опыта 4D-моделирования на рынке
2.6	Неоправданные затраты времени на обучение
2.7	Недостаток времени для обучения сотрудников
2.8	Сопротивление сотрудников изменениям
2.9	Отсутствие стандартов для 4D-моделирования
2.10	Проблемы, связанные с разработкой 4D-модели
2.11	Сложность понимания методов 4D-моделирования
2.12	Традиционные методы реализации проекта/контракта
2.13	Более длительный процесс создания 4D-моделирования
2.14	Проблемы с обменом данными между программами
3. Стимулы внедрения 4D-моделирования	
3.1	Разработка локальных стандартов для 4D-моделирования
3.2	Государственная поддержка 4D-моделирования
3.3	Улучшение функциональности программного обеспечения
3.4	Поддержка со стороны поставщиков программного обеспечения.
3.5	Осведомленность о преимуществах 4D-моделирования и рентабельности инвестиций
3.6	Наличие положительных примеров использования 4D-моделирования на рынке

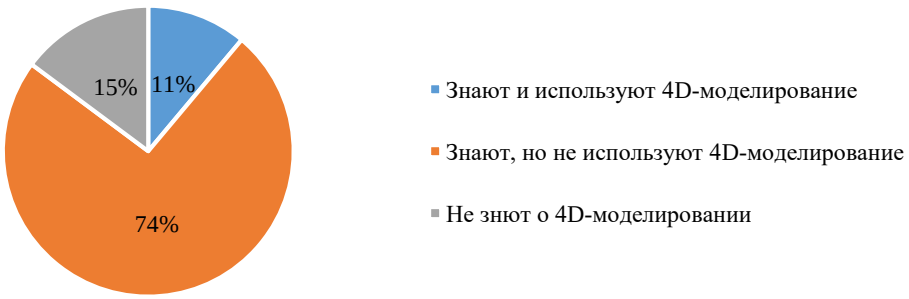


Рис. 2. Осведомленность и использование 4D-моделирования

Результаты показывают более высокий уровень осведомленности о 4D-моделировании и гораздо более низкий уровень использования. Была предпринята попытка понять план респондентов, которые знают, но не использовали 4D-моделирование. Хотя некоторые респонденты указали, что планируют использовать 4D-моделирование в ближайшем будущем (11 % в течение года и 31 % в течение 1–3 лет), значительные 58 % респондентов

планируют использовать 4D BIM только через 3 года (рис. 3). Это подразумевает ожидаемое меньшее распространение 4D BIM в краткосрочной перспективе.

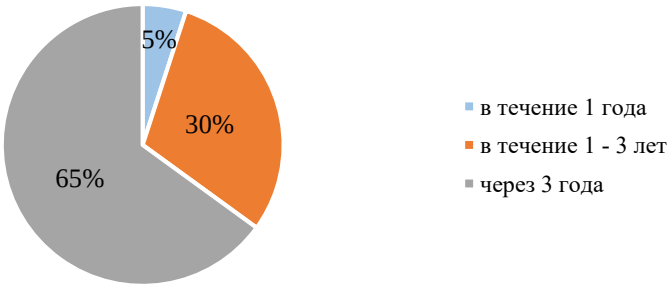


Рис. 3. Планы по внедрению 4D-моделирования

Применимость 4D BIM. Участникам было предложено высказать свое мнение о возможности использования функционала 4D-моделирования по пятибалльной шкале Лайкерта (от «совсем неприменимо» до «очень применимо») по отношению к различным функциям BIM в соответствии с перечнем, представленным в таблице 2. Распределение ответов представлено на рис. 4. По структуре ответов видно, что респонденты оценили 4D-моделирование как применимое. Среди функций BIM «Визуализация процесса строительства» (1.5), «Взаимоувязка отдельных планов строительства подрядных организаций, участвующих в строительстве» (1.3) и «Проверка плана строительства с использованием моделирования» (1.7) оказались наиболее предпочтительными. Несмотря на то, что «Планирование организации площадки строительства» (1.2) и «Планирование логистики» (1.1) получили низкий рейтинг, они могут считаться применимыми. Кроме того, клиенты оценили «Вариантное проектирование с моделированием графика строительства» (1.12) как очень применимое.

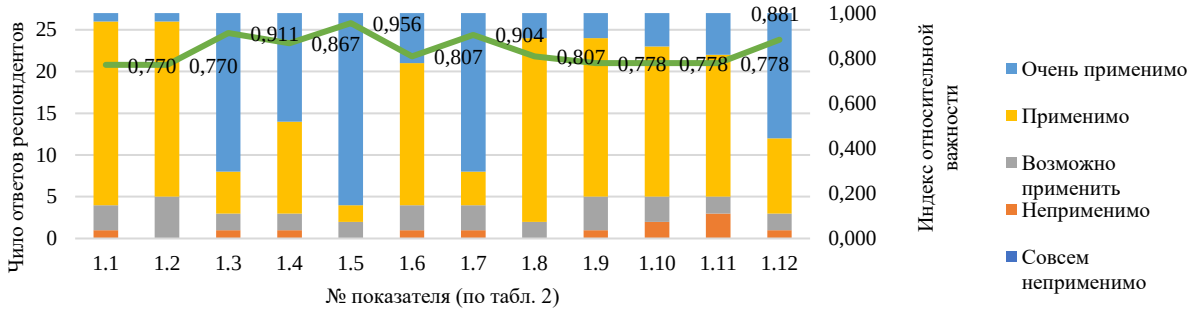


Рис. 4. Возможность использования функционала 4D-моделирования

Преимущества использования 4D-моделирования. В ответ на вопрос о преимуществах и полезности 4D-моделирования участники оценили различные функции BIM, указанные в таблице 2, по пятибалльной шкале Лайкерта (от «совсем не выгодно» до «очень выгодно»). Распределение ответов представлено на рис. 5.

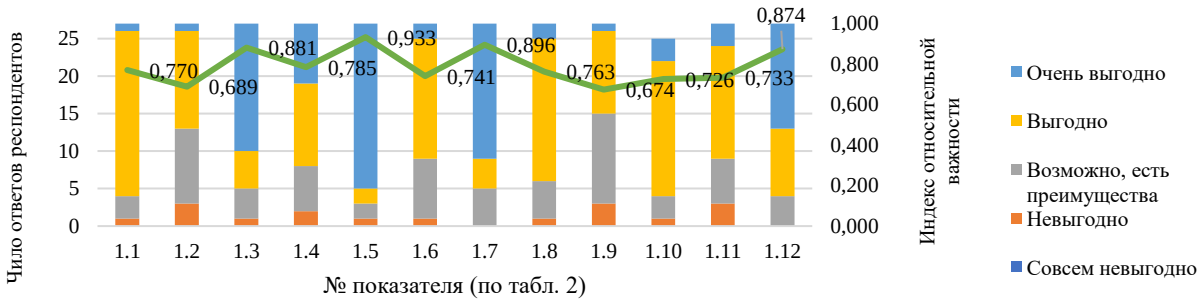


Рис. 5. Преимущества использования 4D-моделирования

Можно заметить, что картина ответа аналогична приведенной выше (рис. 4). «Визуализация процесса строительства» (1.5), «Взаимоувязка отдельных планов строительства подрядных организаций, участвующих в строи-

https://www.stsg-donstu.ru

тельстве» (1.3) и «Проверка плана строительства с использованием моделирования» (1.7) были оценены как главные преимущества 4D-моделирования. Однако респонденты считают, что «Вариантное проектирование с моделированием графика строительства» (1.12) более полезно по сравнению с «Взаимоувязкой отдельных планов строительства подрядных организаций» (1.3). Необходимо отметить, что высокие оценки по другим показателям указывают на весьма выгодный характер 4D-моделирования.

Проблемы внедрения 4D-моделирования. Респонденты считают, что «Нехватка знаний 4D-моделирования у сотрудников» (2.4), «Традиционные методы реализации проекта/контракта» (2.12) и «Отсутствие опыта 4D-моделирования на рынке» (2.5) являются главными препятствиями для внедрения и использования 4D-моделирования (рис. 6). «Неоправданные затраты времени на обучение» (2.6) и «Отсутствие времени для обучения сотрудников» (2.7) были оценены как незначительные проблемы для внедрения.

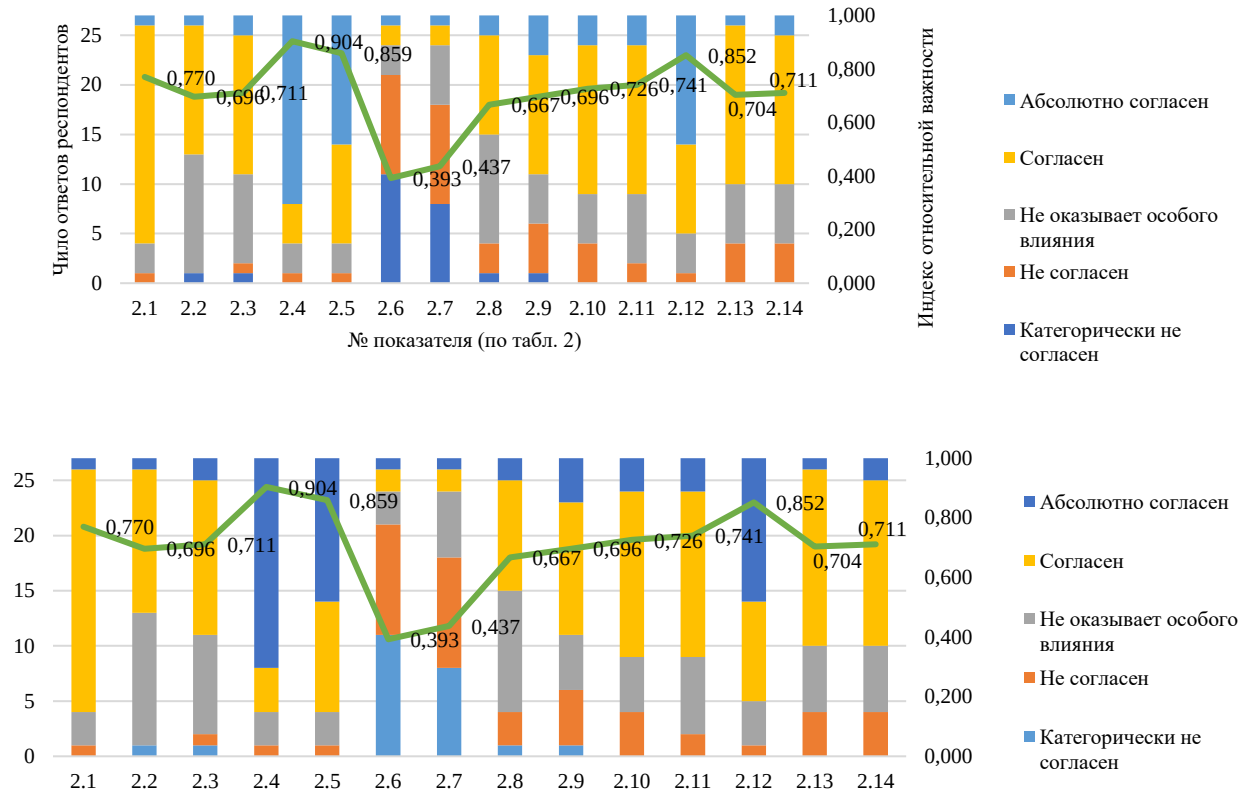


Рис. 6. Проблемы внедрения 4D-моделирования

Стимулы для использования 4D-моделирования. В ответ на вопрос о движущих силах, способствующих реализации 4D-моделирования в организациях, по пятибалльной шкале Лайкерта (от «очень низкого» до «очень высокого») респонденты оценили «Осведомленность о преимуществах 4D-моделирования и рентабельности инвестиций» (3.5) как главный критерий (рис. 7).

Наряду с 3.5 «Государственная поддержка» (3.2) и «Доступность опыта реализации 4D-моделирования на рынке» (3.6) также считаются главными факторами. Можно заметить, что «Поддержка со стороны поставщиков программного обеспечения» (3.4) получила самую низкую оценку.

Проверка гипотез. Хотя среди заказчиков-застройщиков и подрядчиков в основном было достигнуто общее согласие по поводу их ответов, была предпринята попытка проверить это статистически, чтобы убедиться, что это не случайно. Независимый *t*-критерий представляет собой статистический тест, который используется для определения разницы средних значений[2]. Кроме того, t-критерий применим, когда сравниваются только две группы, и размер выборки очень мал. Следующие гипотезы проверяются с использованием *t*-критерия для двух независимых выборок, предполагающих равную дисперсию при уровне значимости 5 %.

[2] Горлач Б.А. Теория вероятностей и математическая статистика: учебно-методическое пособие. Санкт-Петербург: Лань; 2021. 320 с.

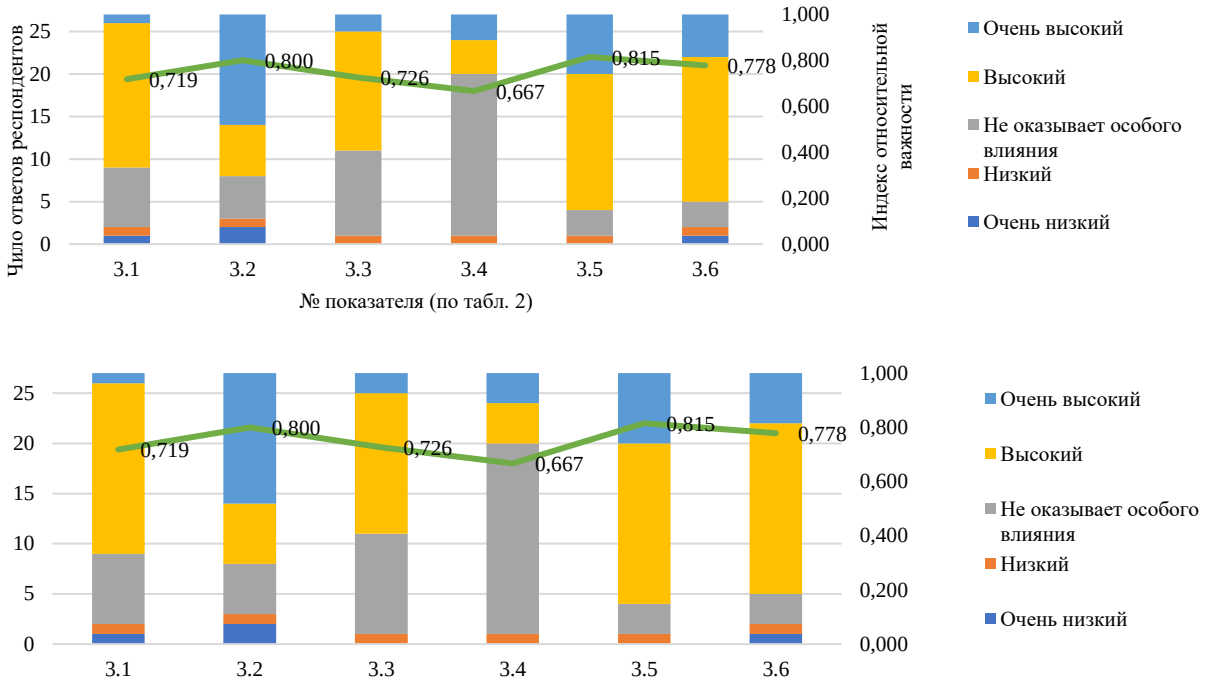


Рис. 7. Стимулы для использования 4D-моделирования

Нулевая гипотеза H_0: нет существенной разницы в восприятии заказчиками и подрядчиками применимости, преимуществ, проблем и стимулов внедрения 4D-моделирования.

Альтернативная гипотеза H_1: для проверки нулевой гипотезы существует значительная разница в восприятии заказчиков и подрядчиков относительно применимости, преимуществ, проблем и стимулов внедрения 4D-моделирования в строительной отрасли.

Результаты теста представлены в таблице 3. В качестве проверки результатов теста был применен показатель *p*-значение, который показывает вероятность получения наблюдаемых результатов при условии, что нулевая гипотеза верна, или вероятность ошибки в случае отклонения нулевой гипотезы. Поскольку *p*-значение для всех четырех переменных превышает 0,05, нет достаточных доказательств, чтобы отвергнуть H_0, и, следовательно, H_0 принимается. Это означает, что нет существенной разницы в восприятии заказчиками и подрядчиками применимости, преимуществ, проблем и стимулов внедрения 4D-моделирования.

Таблица 3

Результаты *t*-критерия для нулевой гипотезы

Переменные	*p*-значение
Применимость	0,134
Преимущества	0,707
Проблемы	0,367
Стимулы	0,132

Обсуждение и заключение. В соответствии с проведенным исследованием можно отметить, что в строительстве существует высокий уровень осведомленности о 4D-моделировании. Но задача состоит в том, чтобы превратить это знание в реализацию. Несмотря на возросшую осведомленность и готовность использовать 4D-модели, основное количество респондентов не планируют применять данную технологию информационного моделирования в ближайшие три года. Чтобы быть конкурентоспособным на рынке и успешно реализовывать инвестиционно-строительные проекты в срок с надлежащим качеством и в рамках бюджета, существует значительная необходимость как можно раньше внедрить 4D-моделирование в строительных организациях.

Отзывы о применении и преимуществах 4D-моделирования (1.5, 1.3, 1.7 и 1.12 таблицы 2) подчеркивают необходимость улучшенной визуализации для коммуникации между генподрядчиком и субподрядчиками для своевременной передачи фронта работ, возможности предварительного организационно-технологического моделирования различных вариантов управления процессом строительства в целях выполнения проекта в срок, обусловленный контрактом. Наращивание потенциала и возможностей посредством образования и обучения является ключом к реализации этих ожиданий. Заказчики-застройщики могут прогнозировать различные варианты

реализации проекта с моделированием плана строительства (1.12), что демонстрирует изменение приоритета в сторону качества проектов и своевременной логистики.

Также важно обратить внимание на препятствия на пути внедрения 4D-моделирования. «Недостаток знаний об инструментах 4D-моделирования среди сотрудников строительных организаций» (2.4) требует особого внимания к обучению и постоянному профессиональному развитию внутри организаций. Чтобы преодолеть эти проблемы, нужно изменить «Традиционный подход к реализации проекта» (2.12), применять инновационные методы закупок, такие как интегрированная реализация проекта (IPD) и смарт-контракты с помощью блокчейна. «Отсутствие опыта использования 4D-моделирования на рынке» (2.5) требует от образовательных учреждений пересмотреть учебные программы, чтобы гарантировать, что студенты заканчивают обучение с необходимыми цифровыми навыками. Поскольку «Неоправданные затраты времени на обучение» (2.6) и «Недостаток времени для обучения сотрудников» (2.7) были оценены как незначительные проблемы, это означает, что организации и их сотрудники готовы принять эти изменения и внедрять современные подходы к моделированию.

Акцентируясь на стимулах использования 4D-моделирования, можно отметить, что необходимо продвигать информацию о преимуществах внедрения 4D-моделирования, доказывать эффективность вложения инвестиций в данный этап технологии информационного моделирования (3.5). В этом контексте важную роль играет «Государственная поддержка использования 4D-моделирования» (3.2) посредством разработки соответствующих стандартов, программ обучения и других стимулирующих мероприятий. В настоящее время нет официального свода правил, отражающего подходы к использованию 4D-моделирования. Лишь в СП 331.1325800.2017 «Информационное моделирование в строительстве» приводится определение 4D.

Можно отметить, что основные преимущества применения 4D-моделирования соответствуют исследованиям в других странах. Конечно, есть некоторые различия. Например, в Великобритании [8] «Планирование логистики» (1.1) получило высокую оценку, а недостаточная осведомленность участников проекта была отнесена к критическим проблемам. В строительной отрасли Катара критическим фактором оказалась недоступность квалифицированных специалистов. В Индии использование существующих методов реализации проектов и отсутствие спроса со стороны клиентов были определены как главные проблемы для внедрения 4D-моделирования.

Учитывая относительно небольшой размер выборки, уверенность в сделанных выводах ограничена. Более широкое исследование среди заказчиков и подрядчиков с увеличенным размером выборки может дать более глубокое понимание. Также стоит изучить роль визуализации для коммуникации в принятии решений всеми участниками проекта для улучшения реализации инвестиционно-строительных проектов.

Список литературы/ References

1. Столбов И.В., Придвижкин С.В. Современные подходы к комплексному внедрению технологий информационного моделирования на всех стадиях жизненного цикла объекта капитального строительства (недвижимости). *Перспективы науки*. 2023;165(6):108–113. URL: https://moofrnk.com/assets/files/journals/science-prospects/165/science-prospect-6(165)-main.pdf (дата обращения 10.04.2025).

Stolbov IV Modern Approaches to the Integrated Implementation of Information Modeling Technologies at all Stages of the Life Cycle of a Capital Construction object /Real Estate Object. *Science Prospects.* 2023;165(6):108–113 (In Russ.) URL: https://moofrnk.com/assets/files/journals/science-prospects/165/science-prospect-6(165)-main.pdf (accessed 10.04.2025)

2. Бовтеев С.В. Современное состояние и перспективы применения 4D-моделирования в российской практике строительства. *Вестник гражданских инженеров*. 2023;97(2):65–74. http://doi.org/10.23968/1999-5571-2023-20-2-65-74

Bovteev SV Current State and Prospects for the Usage of 4D Modeling in the Sphere of Construction in the Russian Federation. *Bulletin of Civil Engineers.* 2023;97(2):65–74. (In Russ.) http://doi.org/10.23968/1999-5571-2023-20-2-65-74

3. Wang L, Lee J, Nimawat Ja. Integrated 4D Design Change Management Model for Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management - ASCE*. 2024;150(5). http://doi.org/10.1061/jcemd4.coeng-14246

4. Нечипорчук Я., Башкова Р. Краткий обзор 4d моделирования в строительстве. *Архитектура. Строительство. Образование*. 2020;15(1):35–41. http://doi.org/10.18503/2309-7434-2020-1(15)-35-41

Nechiporchuk Y, Bashkova R Brief Overview of 4Dmodeling in Construction. *Architecture. Construction. Education.* 2020;15(1):35–41. (In Russ.) http://doi.org/10.18503/2309-7434-2020-1(15)-35-41

5. Пименов С.И. Уровни декомпозиции строительных цифровых информационных моделей (4D-моделей) для задач организационно-технологического моделирования строительного производства. *Известия высших учебных заведений. Строительство.* 2023;770(2):65–78. http://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-770-2-65-78

Pimenov SI Levels of Decomposition of Construction Digital information models (4 D models) for the Tasks of Organizational and Technological Modeling of Construction Production. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2023;770(2):65–78. (In Russ.) http://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-770-2-65-78

6. Swallow M, Zulu S. Benefits and Barriers to the Adoption of 4D Modeling for Site Health and Safety Management. *Front. Built Environ*. 2019;4:86. http://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00086

7. Crowther J, Ajayi SO Impacts of 4D BIM on construction project performance. *International Journal of Construction Management*. 2021;21(7):724–737. http://doi.org/10.1080/15623599.2019.1580832

8. Doukari O, Seck B, Greenwood D. The efficient generation of 4D BIM construction schedules: A case study of the Nanterre 2 CESI project in France. *Frontiers in Built Environment.* 2022;8. http://doi.org/10.3389/fbuil.2022.998309

9. Щерба Н.В., Кужин М.Ф. Оптимизация календарно-ресурсного планирования с применением BIM-технологий в промышленном строительстве. *Строительное производство*. 2020;3:35–40. http://doi.org/10.54950/26585340_2020_3_35

Shcherba NV, Kuzhin MF Optimization of Calendar and Resource Planning Using BIM Technologies in Industrial Construction. *Construction Production.* 2020;3:35–40. (In Russ.) http://doi.org/10.54950/26585340_2020_3_35

10. Гущина Ю.В., Саушкин Д.А. Оптимизация календарных планов строительства на основе BIM-моделирования. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2020;81(4):438–447. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=44694133 (дата обращения 10.04.2025).

Gushchina YuV, Saushkin DA Optimization of construction calendar plans based on BIM modeling. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture. 2020;81(4):438–447. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=44694133 (accessed: 10.04.2025).

11. Шарманов В.В., Романович М.А., Симанкина Т.Л., Брайла Н.В., Цветков О.Ю. Управление процессом строительства с помощью цифрового проекта организации строительства. *Инженерный вестник Дона*. 2024;111(3):678–695. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-protsessom-stroitelstva-s-pomoschyu-tsifrovogo-proekta-organizatsii-stroitelstva (дата обращения 10.04.2025).

Sharmanov VV, Romanovich MA, Simankina TL Management of the Construction Process Using a Digital Construction Organization Project. *Engineering Journal of Don.* 2024;111(3):678–695. (In Russ.) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-protsessom-stroitelstva-s-pomoschyu-tsifrovogo-proekta-organizatsii-stroitelstva (accessed: 10.04.2025).

12. Биче-Оол Х.В. Практическое применение 4D-моделирования в строительных организациях Республики Тыва. *Вестник Тувинского государственного университета. Выпуск №3. Технические и физико-математические науки*. 2022;94(2):14–20. http://doi.org/10.24411/2221-0458-2022-94-14-20

Biche-Ool HV Practical Application of 4D Modeling in Construction Organizations of the Republic of Tuva. *Bulletin of the Tuva State University*. No. 3 *Technical and Physical and Mathematical Sciences.* 2022;94(2):14–20. (In Russ.) http://doi.org/10.24411/2221-0458-2022-94-14-20

13. El-Habashy Sh, Alqahtani FK, Mekawy M. Identification of 4D-BIM Barriers in Offshore Construction Projects Using Fuzzy Structural Equation Modeling. *Buildings*. 2023;13(6):1512. http://doi.org/10.3390/buildings13061512

Об авторе:

Константин Михайлович Крюков, кандидат экономических наук, доцент кафедры организации строительства Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, ORCID, kkrioukov@gmail.com

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Konstantin M. Kryukov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Construction Management at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), ScopusID, ORCID, kkrioukov@gmail.com

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 12.04.2025
Поступила после рецензирования / Reviewed 02.05.2025
Принята к публикации / Accepted 13.05.2025

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES

CC BY

Check for updates

Оригинальное эмпирическое исследование

УДК 69.001.5
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-85-95

Пути устойчивого развития для городской эко-архитектуры

Чжан Хаожань[1], **С.Г. Шеина**[2], **В.В. Белаш**[2] ✉

[1]Шаньдунский транспортный университет, г. Цзинань, провинция Шаньдун, Китайская народная республика
[2]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ vbelash@donstu.ru

EDN: GCHTJX

Аннотация

Введение. В последнее время вопросы экологического развития стали особенно актуальны, поэтому важность эко-архитектуры выходит на первый план. Используя концепции устойчивого проектирования и экологичные материалы, эко-архитектура снижает зависимость от природных ресурсов, уменьшает потребление энергии и выбросы отходов, тем самым эффективно снижая нагрузку на окружающую среду. В связи с этим эко-архитектура является не только важным направлением устойчивого развития городов, но и предоставляет нам практический путь к созданию более гармоничной и качественной среды обитания. Целью данного исследования является определение принципов эко-архитектуры и оценка его влияния на устойчивое развитие городской среды. Проанализировано влияние эко-архитектуры на весь цикл строительства зданий и сооружений с момента строительства и до сноса здания, и определены пути устойчивого развития городской архитектуры.

Материалы и методы. Проведен анализ путей устойчивого развития эко-архитектуры в современном мире. В процессе строительства и эксплуатации зданий возникают различные негативные влияния, такие как загрязнение воздуха и воды, шум, нарушение ландшафта и экосистемы. Для минимизации этих воздействий необходимо разрабатывать природозащитные мероприятия и учитывать экологические аспекты на всех этапах проектирования и строительства.

Результаты исследования. В ходе исследования выполнена оценка устойчивости развития эко-архитектуры на основе анализа жизненного цикла здания с учетом воздействия на окружающую среду на этапах проектирования, строительства, использования и сноса объекта строительства

Обсуждение и заключение. Оценка устойчивости развития эко-архитектуры основывается на анализе жизненного цикла здания, учитывая воздействие на окружающую среду на всех этапах: от проектирования и строительства до использования и сноса. Всесторонний анализ потребления ресурсов и экологической нагрузки здания на разных этапах позволит получить более точную оценку устойчивости. С развитием цифровых технологий применение интеллектуальных зданий и Интернета вещей (IoT) сделает возможным мониторинг и анализ данных в режиме реального времени. Это позволит улучшить управление устойчивостью развития зданий на этапе эксплуатации, обеспечив поддержку данных для оптимизации эффективности использования ресурсов.

Ключевые слова: эко-архитектура, устойчивое развитие, экологическая энергоэффективность, низкое содержание углерода, переработка ресурсов, экологичность, жизненный цикл здания, городское развитие, окружающая среда

Для цитирования. Чжан Хаожань, Шеина С.Г., Белаш В.В. Пути устойчивого развития для городской эко-архитектуры. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(2):85–95. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-85-95

© *Чжан Хаожань, Шеина С.Г., Белаш В.В., 2025*

Original Empirical Research

Sustainable Development Paths for Urban Eco-Architecture

Zhang Haoran[1], Svetlana G. Sheina[2], Vladimir V. Belash[2] ✉
[1]Shandong Jiaotong University, Jinan, Shandong Province, China
[2]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ vbelash@donstu.ru

Abstract

Introduction. Environmental development issues have become acutely relevant of late. Therefore eco-architecture is taking centre stage. By using sustainable design concepts and eco-friendly materials, eco-architecture reduces dependence on natural resources, as well as energy consumption and waste emissions, thus effectively decreasing the burden on the environment. Hence not only is eco-architecture an essential area of sustainable urban development, but also provides one with a practical way of designing a more harmonious and high-quality living environment. The aim of the study is to identify the principles of eco-architecture and assess its impact on the sustainable development of the urban environment. The impact of eco-architecture on the entire construction cycle of buildings and structures from the moment of construction to the demolition of the building is examined, and the ways of sustainable development of urban architecture are identified.

Materials and Methods. Ways of sustainable development of eco-architecture in the modern world are analyzed. Various negative impacts such as air and water pollution, noise, landscape and ecosystem disturbance occur during the construction and operation of buildings. To minimise these impacts, it is necessary to develop environmental protection measures and take environmental aspects into account at all stages of design and construction.

Research Results. The study assessed the sustainability of the development of eco-architecture according on the analysis of the life cycle of the building, accounting for the environmental impact at the stages of design, construction, use and demolition of the construction site.

Discussion and Conclusion. The sustainability assessment of eco-architecture is based on the analysis of the building's life cycle, accounting for the environmental impact at all the stages: from design and construction to use and demolition. A comprehensive analysis of the resource consumption and environmental load of the building at different stages would enable one to assess sustainability more accurately. As digital technologies are evolving, the use of intelligent buildings and the Internet of Things (IoT) will enable data to be monitored and analyzed in real time. This will improve the sustainability management of buildings during the operational phase by providing data support in order to optimize resource efficiency.

Keywords*:* eco-architecture, sustainable development, ecological energy efficiency, low carbon content, resource recycling, environmental friendliness, building lifecycle, urban development, environment

For citation. Zhang Haoran, Sheina SG, Belash VV Sustainable Development Paths for Urban Eco-Architecture. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2025;4(2):85–95. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-85-95

Введение. С ускоренным ростом городов происходит масштабная эксплуатация ранее существовавших природных сред обитания, что приводит к значительному сокращению биоразнообразия и угрозе вымирания многих видов. Интенсивная урбанизация негативно влияет на качество жизни такими факторами, как загрязнение воздушной и водной среды, повышенный шум, сокращение площади зеленых насаждений, высокая плотность застройки и населения. Эти изменения не только нарушили баланс экосистемы, но и создали угрозу для среды обитания человека, а также определили необходимость пересмотра существующих подходов к решению архитектурно-пространственной организации среды города [1]. Ответом на эти вызовы стала концепция эко-архитектуры, которая сочетает в себе бережное отношение к природе и заботу о здоровье и комфорте человека. Корни экологической архитектуры уходят в начало прошлого столетия к теории «управления возобновляемыми ресурсами», которая рассматривала вопросы замены традиционных источников энергии альтернативными. В ней предлагалось использование солнечного электричества, производимого сферическими коллекторами [2]. Были разработаны варианты солярных установок, которые вырабатывали пар, способный вращать турбины, производящие электрический ток. Однако на практике ни один из предложенных вариантов воплощен в жизнь не был. В Советской России в целом экологические попытки сводились к планированию территорий озеленения советских городов и частично к уменьшению влияния загрязнения промышленностью окружающей среды. И это были лишь первые шаги в развитии зеленой архитектуры [3].

На Западе в период энергетического кризиса 1970-х гг. и последующего за ним повышения мировых цен на топливо усилился интерес к возобновляемым источникам энергии, экономии топливно-энергетических ресурсов,

https://www.stsg-donstu.ru

использующихся для теплоснабжения строительных сооружений. В этот период появляется масса проектов зданий, которые функционируют с помощью солнечной энергии [4].

В 1980-е гг. резко обострились экологические проблемы. Отрицательное воздействие на природу усилилось с ростом масштабов антропогенного воздействия и бурного развития научно-технического комплекса. Здания выбрасывали в атмосферу почти половину всего углекислого газа, поэтому новой целью стала охрана природного мира. Начали создаваться комплексные проекты реконструкции окружающей среды [5]. Например, решение традиционных вопросов садово-парковой архитектуры отныне неразрывно связано с экологическими проблемами, так как для создания устойчивой городской среды необходимо учитывать экологические условия. Так как положение ландшафтного городского пространства усугубляется перенасыщением техникой и соответствующим вытеснением природных компонентов, необходимым становится поддержание гармонических и экологичных территорий. Поэтому прилагались значительные усилия по реабилитации и совершенствованию окружающей среды [6].

По прошествии определенного времени появились и новые тенденции в формировании зелёного пространства: «…теперь природу «встраивают» в здание». Растительный мир становится одним из элементов в оздоровлении и развитии городских экосистем. Появляется новое направление — нетрадиционный дизайн (озеленение плоских крыш, включение в архитектуру и интерьер зданий элементов биотической среды: живых растений; воды; камня; материалов, имитирующих текстуру дерева; фрагментов определённых природных зон с поддерживаемым микроклиматом и т. п.) [7].

На рис. 1 представлен завершенный в 2006 году Музей набережной Бранли (Quai Branly Museum) в г. Париж, который представляет собой дикое, неорганизованное нагромождение разноцветных коробок. Чтобы усилить ощущение неразберихи, стеклянная стена стирает границу между внешним уличным пейзажем и внутренним садом. Прохожие не могут различить отражения деревьев или размытые изображения за стеной. Архитектором данного проекта является французский архитектор Жан Нувель. Данный проект спроектирован по принципам экологической архитектуры.

Рис. 1. Музей набережной Бранли (Quai Branly Museum) в Париже[1]

Концепция эко-архитектуры предполагает использование процессов, которые отвечают за экологию, эффективное использование ресурсов на протяжении всего жизненного цикла здания. Жизненный цикл здания — это полный непрерывный процесс его создания, эксплуатации и разборки, включающий в себя такие стадии как добыча полезных ископаемых и производство строительных материалов, проектирование, сооружение здания, его функционирование, в том числе снабжение водой, газом, электроэнергией, удаление отходов, периодический ремонт, возможная реконструкция, разборка после окончания срока эксплуатации и вторичное использование полученных материалов [8].

Материалы и методы. Анализ экологических составляющих строительного объекта — это процедура, которая предшествует мероприятиям по возведению, реконструкции, ремонту зданий и сооружений, которая предполагает выявление характера, интенсивности и степени опасности этой деятельности для окружающей среды и здоровья населения. Цель анализа — предотвращение ущерба окружающей среде, а также обеспечение экологической безопасности, охраны, рационального использования и воспроизводства природных ресурсов с учетом государственных, общественных и частных интересов.

[1] *Quai Branly Museum, Paris.* URL: https://www.thoughtco.com/buildings-and-projects-by-jean-nouvel-4065275 (дата обращения: 16.04.2025)

Для разработки экологических принципов проектирования строительных объектов необходимо выделить факторы воздействия процессов строительства на окружающую среду. Прямое негативное влияние заключается в повышенном шуме, различных излучениях, выбросе вредных веществ. Косвенное влияние заключается в том, что строительные объекты, задания, сооружения, дороги ежегодно забирают все больше необходимого жизненно важного для человека пространства.

Проведем анализ факторов, влияющих на окружающую среду на каждой стадии строительства здания. На этапе строительства, например, наиболее существенными негативными влияниями на окружающую среду являются:

– загрязнения атмосферного воздуха газопылевыми выбросами (строительная техника и автотранспорт, сварочные и лакокрасочные работы и т.д.);

– загрязнения подземных и сточных вод (заправка техники и автотранспорта, проливы бетонной смеси и различных растворов и т.д.);

– негативные воздействия на акустическую среду (строительная техника, свайные работы и т.д.);

– загрязнения окружающей среды строительными отходами;

– нарушение естественного ландшафта местности

– вывоз грунта после производства земляных работ, который складировался в отвалах (отчуждает территории, меняет ландшафт, способствует эрозии);

– увеличение количества бытовых отходов;

– влияние на животных, птиц, рыб, условия их обитания.

На стадии эксплуатации здания возникают следующие негативные влияния:

– нарушение режима освещенности солнцем поверхности земли (инсоляция);

– нарушение ветрового режима;

– нарушение гидрологического режима территории;

– уменьшение количества растительности;

– загрязнение почвы и воды;

– запыление, тепловое загрязнение;

– увеличение автомобильных потоков и, следовательно, воздействие на акустическую среду.

В случае, если будет производиться реконструкция здания, то негативное влияние будет от загрязнения атмосферного воздуха, загрязнения поверхностных и подземных вод, загрязнения растительного покрова, образования отходов и шумового загрязнения, а также нужно учитывать влияние реконструируемого объекта на рядом расположенные здания.

Для более полной оценки воздействия проекта на окружающую природную среду обычно проводится анализ и ее компонентов: климата и микроклимата, воздушного пространства, геологических слоев, водоемов, почвы, растительного и животного мира, историко-культурного наследия, социальной и техногенной среды.

Все это создает необходимость разработки специальных природозащитных мероприятий, обеспечивающих экологический баланс между человеком и природой, а также устойчивое развитие районов строительства и прилегающих территорий, городов в целом. Это и реализуется в процессе проектирования и строительства всего жизненного цикла здания как единой цепочки. Анализ производить важно, потому как это позволяет решать многие проблемы еще на этапе проектирования, планирования, строительства и на остальных стадиях. Ведь каждый этап состоит из множества элементов, и неверно подобранные материалы или конструктивные решения могут увеличить расходы за счет низкой энергоэффективности. Необходимо в процессе анализа учитывать и экологический аспект, потому что сегодня законодательство ужесточает экологические нормы и требования. И от грамотного выбора материалов и технологий зависит, насколько серьезный след проект оставит в окружающей среде. Поэтому использование принципов эко-архитектуры особенно актуально.

В настоящее время, например, повсеместно внедряется использование методики проведения анализа жизненного цикла здания — LCA (Life Cycle Assessment), которая включает разноплановые шаги: от сбора исходных данных до их интерпретации [9, 10].

Анализ жизненного цикла LCA — это систематическая методология, применяемая для оценки полного цикла существования продукта, оборудования, здания или системы. Этот процесс охватывает все этапы (от добычи сырья до утилизации), выявляя влияние на затраты, производительность и окружающую среду [11]. Это помогает определить, на что обращать внимание: экологичность, затраты, производительность, воздействие на окружающую среду.

Вопросы экологического строительства и эксплуатации зданий занимают важное место в решении экологических проблем города. Сегодня этим вопросом занимаются во всем мире [12, 13]. В результате чего строительная сфера претерпевает ряд изменений, которые позволяют снизить воздействие на окружающую среду и рационально использовать природные ресурсы.

В настоящее время качество жизни в городе начинает характеризоваться количеством зданий, сертифицированных по международным «зеленым» стандартам, таким как The Leadership in Energy & Environmental Design (LEED), разработанным еще в 1993 году. За ним появилось много новых стандартов сертификации: от британского BREEAM, американских WELL и Fitwel и других до российских — «Зеленые стандарты» и Green Zoom [14].

«Зеленое» сертифицирование предоставляет возможность не только реализовать строительный проект, учитывая экологические критерии, но и способствует улучшению показателей на всех этапах жизненного цикла здания: от проектирования и строительства до ввода в эксплуатацию и последующей утилизации.

В России действуют экологические стандарты СТО НОСТРОЙ 2.35.4–2011 «Зеленое строительство», система «Eco Village» для коттеджных поселков, стандарт GREEN ZOOM. Также в 2009 году был принят Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности», который положил начало формированию новой системы государственного регулирования в данной области [15].

Результаты исследования. Снижение отрицательного влияния на экосистемы и сбережение различного рода ресурсов, особенно из числа невозобновляемых, происходит за счет создания условий для эффективного взаимодействия естественных (природных) форм и создаваемых человеком средовых объектов. Результатом этого взаимодействия являются совершенствование и стабилизация параметров микроклимата внутри создаваемых объектов с окружающей средой, что снижает энергозатраты на работу соответствующих энергосистем, а также сохраняется и повышается устойчивость экосистемы, в состав которой внедряются строящиеся объекты [16]. Пути развития и совершенствования эко-архитектуры подчинены определенным принципам. Эти принципы являются основополагающими для обеспечения эффективной реализации возможностей в развитии городской среды.

Основными принципами эко-архитектуры, которые способствуют развитию городов являются:

1. Использование энергосберегающих технологий и использование альтернативных источников энергии, что подразумевает использование в зданиях солнечных панелей, ветряных турбин, а также высокоэффективные системы отопления и охлаждения [17].

На рис. 2 приведено здание The Edge — 15-этажное офисное здание в финансовом районе Zuidas в г. Амстердам. Построено оно в 2015 году, общая площадь — 40 000 м². В здании установлено почти 30 000 датчиков, которые собирают анонимные данные о системах отопления и охлаждения, освещения, занятости помещений и многих других аспектах. На 14-ти из 15-ти этажей стены здания можно свободно перемещать, что позволяет пользователям менять рабочее пространство в соответствии с их потребностями. Британское рейтинговое агентство BREEAM присвоило зданию рекордную оценку устойчивости в 98,4 %, что является самым высоким показателем за всю историю.

Рис. 2. Офисное здание в финансовом районе Zuidas[2]

2. Здания должны строиться с использованием экологически чистых материалов, поддерживать энергоэффективность и обеспечивать более длительный срок службы, чтобы минимизировать отходы и потребность

[2] *Офисное здание The Edge. Dirk Verwoerd*. URL: https://archi.ru/projects/world/9650/ofisnoe-zdanie-the-edge (дата обращения: 16.04.2025)

в постоянной реконструкции. Для создания экологичной среды могут использоваться как ранее не используемые материалы, так и переработанные. Кроме того, существует много альтернативных материалов, которые являются более экологичными. Использование возобновляемых и перерабатываемых строительных материалов не только помогает сократить добычу ресурсов, но и снижает выбросы углекислого газа в процессе строительства [18].

На рис. 3 приведена солнечная электростанция, размещенная на крыше здания в Индонезии в г. Бонтанг. Подобная солнечная электростанция производит чистую энергию и сокращает выбросы углеродного газа в атмосферу. Её возможности покрывают энергетические потребности офисных помещений до 30 %. Общая площадь электростанции составляет 6 500 м^2, а мощность — более 1000 кВт с выходным напряжением 380 В.

Рис. 3. Размещение солнечной электростанции на крыше здания. Индонезия, г. Бонтанг, Восточный Калимантан[3]

3. Создание комфортной среды для человека. Зелёные насаждения и общественные парки являются неотъемлемой частью экологического городского планирования. Они снижают уровень шума и загрязнения воздуха, улучшают качество жизни горожан и способствуют сохранению биоразнообразия. Здесь человек может почувствовать единение с природой [19].

а) *б)*

Рис. 4. Энергоэффективные здания с использованием концепции зеленого дизайна: а) г. Чэнду, юго-западный Китай, долина р. Миньцзян[4]; б) сад библиотеки Варшавского университета[5]

[3] *Солнечные электростанции на крыше здания. Индонезия, г. Бонтанг*. URL: https://awsimages.detik.net.id/api/wm/2022/08/19/plts-atap-pkt-di-bontang_169.jpeg?wid=54&w=650&v=1&t=jpeg (дата обращения: 16.04.2025)

[4] *Энергоэффективные здания Китая*. URL: https://ad009cdnb.archdaily.net/wp-content/uploads/2012/10/5078dce228ba0d1640000085_zcb-zero-carbon-building-ronald-lu-and-partners_zcb_01_and_one_planet_living_loop.jpg (дата обращения: 16.04.2025)

[5] *Сад библиотеки Варшавского университета*. URL: https://i.pinimg.com/originals/bd/cf/77/bdcf77be7986fd3f72fec3c6038f7ede.jpg (дата обращения: 16.04.2025)

4. Защита биоразнообразия. Создание экологических коридоров, парковых зон и вертикальное озеленение зданий, как видно на рис. 5, помогает сохранить местные экосистемы и обитающие в них виды растений и животных. Это важно для поддержания баланса природных процессов и биологического разнообразия [20].

Рис. 5. Современный ландшафтный дизайн[6]

5. Разумное управление отходами. Городские архитектурные решения должны иметь системы сбора и переработки отходов, чтобы минимизировать негативное воздействие на окружающую среду. Важно также поощрять сортировку отходов среди населения [21].

Здание The Crystal в г. Лондон, Великобритания (рис. 6) — это экспозиционный центр, посвященный устойчивому развитию и экологической ответственности. Здание оснащено фотоэлектрическими и солнечными панелями для получения электрической энергии, а также использует систему утилизации отходов и энергоэффективные технологии.

Рис. 6. Здание The Crystal в г. Лондон, Великобритания[7]

[6] *Bæredygtig klimasikring hædret med betonbranchens Oscar*. URL: https://estatemedia.dk/dk/2023/06/02/baeredygtig-klimasikring-haedret-med-betonbranchens-oscar/ (дата обращения: 16.04.2025)

[7] *Лондон: Кристал – самое экологичное здание в мире.* URL: https://ru.baltic-review.com/2012/09/21/london-kristall-the-crystal-samoe-ekologichnoe-zdanie-v-mire/ (дата обращения: 16.04.2025)

6. Адаптивность. Городская архитектура должна быть гибкой и способной адаптироваться к изменяющимся климатическим условиям и проблемам окружающей среды. Это включает в себя использование искусственного интеллекта, «умных» городских систем и прогнозирование климатических изменений для эффективного управления городом [22, 23].

Рассмотрим основные принципы (таблица 1), которыми руководствуется эко-архитектура, позволяющие снижать негативные последствия на экологию в зависимости от стадии жизненного цикла здания [24].

Таблица 1

Основные пути эко-архитектуры

Стадия проектирования	1. Учет окружающей среды на всех стадиях — от проектирования до сноса здания. 2. Учет качества жизни жильцов на всех стадиях строительства. 3. Дизайн, который позволяет адаптироваться к окружающей среде.
Стадия строительства	1. Использование низкоуглеродных материалов и технологий. 2. Эффективное и рациональное использование доступных ресурсов и возобновляемых источников энергии. 3. Восстановление экологического баланса на прилегающих территориях. 4. Внедрение системы управления отходами. 5. Повторное использование ресурсов и конструктивных элементов здания. 6. Использование нетоксичных устойчивых материалов.
Стадия эксплуатации	1. Внедрение энергосберегающих технологий. 2. Внедрение системы управления отходами. 3. Повторное использование ресурсов и конструктивных элементов здания.

Большую роль в решении экологических проблем городов играет переход к устойчивому развитию городов. Термин «зеленая» архитектура у многих ассоциируется с домами, фасады и крыши которых полностью покрыты зеленью, а это не единственный способ сделать здание более экологичным [25]. Поэтому здания строятся из натуральных материалов, активно применяются энергосберегающие технологии и грамотно используется выделенная под застройку земля. Конечно, пока массового спроса на зеленую архитектуру в России нет, но некоторые технологии уже активно используются. Например, снижение энергопотребления за счет регулирования отопления, использования датчиков движения и светодиодного освещения в подъездах многоквартирных домов. Во многих странах все это стало известным и обыденным, а экологические решения дополнились системами очистки дождевой воды и садами на крышах [26].

Кроме того, будущее устойчивого развития городов зависит от множества факторов, включая технологические инновации, политическую волю, участие общественности и глобальное сотрудничество. Развитие умных технологий, таких как Интернет вещей (IoT), искусственный интеллект (ИИ) и большие данные, открывает новые возможности для оптимизации городских процессов, улучшения качества жизни горожан и снижения воздействия на окружающую среду.

Активное участие граждан и сообществ в процессах планирования и принятия решений, а также образовательные программы, направленные на повышение осведомленности о принципах устойчивого развития, являются ключевыми для достижения долгосрочных целей.

В конечном итоге будущее устойчивых городов будет определяться нашей способностью адаптироваться к изменениям, инновационно мыслить и работать вместе ради общего блага.

Обсуждение и заключение. Эко-архитектура естественным образом помогает планете, разумно используя местные материалы и энергию. Использование ее принципов позволяет сокращать загрязнение окружающей среды, сохраняет природу и поддерживает здоровье.

Применение современных строительных технологий и материалов позволяет проектировать здания, которые обладают большей гибкостью и эффективностью в области экоустойчивой архитектуры. Кроме того, сочетание новых технологических возможностей и опыта, накопленного в традиционной архитектуре, позволит находить новые решения, обеспечивающие максимальную функциональную эффективность, долговечность и экономичность на всех этапах жизненного цикла здания.

Список литературы/References

1. Аллакулыева Д.М., Атайев Е.Д., Атайева А.А. Устойчивое строительство: эко-архитектура и зеленые технологии. *Вестник науки.* 2024;10(79):970–973. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ustoychivoe-stroitelstvo-eko-arhitektura-i-zelenye-tehnologii/viewer (дата обращения 16.04.2025).

Allakulyeva DM, Atayev ED, Atayeva AA Sustainable Construction: Eco-Architecture and Green Technologies. *Bulletin of Science.* 2024;10(79):970–973. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ustoychivoe-stroitelstvo-eko-arhitektura-i-zelenye-tehnologii/viewer (accessed: 16.04.2025) (In Russ.).

2. Емельяненко К.М. Обеспечение экологической безопасности строительств. *Молодой ученый.* 2018;5(191):20–22. URL: https://moluch.ru/archive/191/48178 (дата обращения: 06.05.2025).

Emelianenko KM Ensuring Environmental Safety of Buildings. *Young Scientist.* 2018;5(191):20–22. (In Russ.) URL: https://moluch.ru/archive/191/48178 (accessed: 06.05.2025)

3. Ринк Ю. *Архитектура: Экотехнологии и устойчивое развитие на практике.* URL: https://www.houzz.ru/statyi/arhitektura-ekotehnologii-i-ustoychivoe-razvitie-na-praktike-stsetivw-vs~144254770 (дата обращения 16.04.2025).

Rink J *Architecture: Ecotechnology and Sustainable Development in Practice.* (In Russ.) URL: https://www.houzz.ru/statyi/arhitektura-ekotehnologii-i-ustoychivoe-razvitie-na-praktike-stsetivw-vs~144254770 (accessed: 16.04.2025) (In Russ.).

4. Ye Jiong, Zhang Ming, Zhu Dasha. Несколько мыслей об экологическом дизайне зданий. *Central China Architecture.* 2009;27:47–51. https://doi.org/10.4324/9781315881348

5. Lan Zhang, Difei Zhao, Rui Li, Yingxing Chen. Optimization of urban scenic spot planning based on ecological chain and reversed-planning theory — Using Yunlong Lake in Xuzhou city as an example. *E3S Web Conf.* 2021;237:04036. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123704036

6. Енин А.Е., Акуфуна К. Основные принципы устойчивого проектирования искусственной (архитектурной) среды жизнедеятельности. *Архитектурные исследования.* 2017;1(9):71–79. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29325053 (дата обращения 16.04.2025).

Enin AE, Akufuna K Basic Principles of Sustainable Design of an Artificial (Architectural) Living Environment. *Architectural Research.* 2017;1(9):71–79. (In Russ.) URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29325053 (accessed: 16.04.2025).

7. Белоголовский В. *«Зеленый стиль» Кена Янга.* URL: https://archi.ru/press/world/25523/zelenyi (дата обращения 16.04.2025).

Belogolovsky V "Green Style" by Ken Yang. (In Russ.) URL: https://archi.ru/press/world/25523/zelenyi (accessed: 16.04.2025)

8. *Ecological Architecture: The Latest Architecture and News.* URL: https://www.archdaily.com/tag/ecological-architecture (дата обращения 16.04.2025).

9. Мых М.Э. Архитектурно-экологические приёмы 20-21 века. *Наукосфера.* 2021;7–2:35–39. https://doi.org/10.5281/zenodo.5144694

Mykh ME Architectural and Ecological Techniques of the 20th-21st Century. *Science Sphere.* 2021;7–2:35–39. https://doi.org/10.5281/zenodo.5144694

10. Cui Min. Предварительное исследование стратегий проектирования экологических зданий. *Building Energy Conservation.* 2008;2:35–43.

11. Черныш Н.А., Кушпаев А.А. Современные тенденции в эко-архитектуре. *Проблемы инженерной графики и профессионального образования.* 2013;16(1). https://doi.org/10.32523/2220-685X-2013-16-1-11-14

Chernysh NA, Kushpaev AA Modern Trends in Eco-Architecture. *Problems of Engineering Graphic and Professional Education.* 2013;16(1). (In Russ.) https://doi.org/10.32523/2220-685X-2013-16-1-11-14

12. Давыдова О.В., Зуземиль Д.В. Модель взаимосвязи природы, человека и архитектуры. *Тенденции развития науки и образования.* 2018;45-5:46–51. https://doi.org/10.18411/lj-12-2018-114

Davydova OV, Zuzemil DV Model of Interrelation of Nature, Man and Architecture. *Trends in Science and Education.* 2018;45-5:46–51. (In Russ.) https://doi.org/10.18411/lj-12-2018-114

13. Гусева Г.В., Астафьев С.А. Интеграция технологий информационного моделирования и интернета вещей в строительстве. *Baikal Research Journal.* 2020;11(3). https://doi.org/10.17150/2411-6262.2020.11(3).9

Guseva GV, Astafyev SA Integration of Information Modeling Technologies and the Internet of Things in Construction. *Baikal Research Journal.* 2020;11(3). (In Russ.) https://doi.org/10.17150/2411-6262.2020.11(3).9

14. Pijak J. *From Solar Art Installations to Self-Sustaining Homes*. URL: https://www.trendhunter.com/slideshow/2023-eco-architecture (accessed: 16.04.2025).

15. O'Keefe A. *10 Most Popular Eco-buildings in the World.* URL: https://manofmany.com/living/architecture/most-popular-eco-buildings-in-the-world (accessed: 16.04.2025).

16. Лезина Е.Г. *Экологический подход в архитектуре.* URL: https://izron.ru/articles/aktualnye-problemy-tekhnicheskikh-nauk-v-rossii-i-za-rubezhom-sbornik-nauchnykh-trudov-po-itogam-mezh/sektsiya-10-stroitelstvo-i-arkhitektura-spetsialnost-05-23-00/ekologicheskiy-podkhod-v-arkhitekture/ (дата обращения 16.04.2025).

Lezina YeG *Ecological Approach in Architecture.* (In Russ.) URL: https://izron.ru/articles/aktualnye-problemy-tekhnicheskikh-nauk-v-rossii-i-za-rubezhom-sbornik-nauchnykh-trudov-po-itogam-mezh/sektsiya-10-stroitelstvo-i-arkhitektura-spetsialnost-05-23-00/ekologicheskiy-podkhod-v-arkhitekture/ (accessed: 16.04.2025).

17. *Eco Brutalist Architecture: Green Meets Concrete.* URL: https://archeetect.com/eco-brutalist-architecture/ (accessed: 16.04.2025).

18. *43 Breathtaking Organic Architecture Concept Ideas 2024*. URL: https://sustainability-success.com/organic-architecture-concept-ideas/ (accessed: 16.04.2025).

19. Юшина С.П. Эко-архитектура. *Центральный научный вестник.* 2018;24(65):48. URL: http://cscb.su/n/032401/032401033.htm (дата обращения 16.04.2025).

Yushina SP Eco-Architecture. *Central Scientific Bulletin.* 2018;24(65):48. (In Russ.) URL: http://cscb.su/n/032401/032401033.htm (accessed: 16.04.2025)

20. Jain A. *Eco-Futurism in Architecture: Harmonizing the Built and Natural Worlds*. URL: https://www.re-thinkingthefuture.com/narratives/a11932-eco-futurism-in-architecture-harmonizing-the-built-and-natural-worlds (accessed: 16.04.2025).

21. Lopez P.J. *What is Biophilic Architecture? Seven Main Principles.* URL: https://www.render4tomorrow.com/what-is-biophilic-architecture (accessed: 16.04.2025).

22. *The shape of things to come eco architecture.* https://baku-magazine.com/home-page/eco-architecture/ (accessed: 16.04.2025).

23. *Eco-architecture: a green tendency in the construction area*. URL: https://www.vreim.es/eco-architecture-a-green-tendency-in-the-construction-area/ (accessed: 16.04.2025).

24. Hohenadel K. *What Is Sustainable Architecture? Environmentally Friendly Building: History, Characteristics, and Examples*. URL: https://www.thespruce.com/what-is-sustainable-architecture-4846497 (accessed: 16.04.2025).

25. Смирнов Е.Б., Дацюк Т.А., Таурит В.Р. Оценка экологической безопасности проектируемых зданий. *Вода и экология: проблемы и решения.* 2017;3(71).82–99. https://doi.org/10.23968/2305-3488.2017.21.3.83-99

Smirnov EB, Datsyuk TA, Taurit VR Assessment of Environmental Safety of Buildings under Construction. *Water and Ecology: Problems and Solutions.* (In Russ.) 2017;3(71).82–99. https://doi.org/10.23968/2305-3488.2017.21.3.83-99

26. Рогова А. *Экологичная архитектура: что это такое и почему за ней будущее*. URL: https://design-mate.ru/read/an-experience/green-architecture-and-future (дата обращения 16.04.2025).

Rogova A Eco-Friendly Architecture: What it is and Why it is the Future. (In Russ.) URL: https://design-mate.ru/read/an-experience/green-architecture-and-future (accessed: 16.04.2025)

Об авторах:

Чжан Хаожань, магистрант по направлению «Civil Engineering» Шаньдунского транспортного университета (Китайская народная республика, провинция Шаньдун г.Цзинань), ORCID

Светлана Георгиевна Шеина, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой городского строительства и хозяйства Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162), ScopusID, ORCID, rgsu-gsh@mail.ru

Владимир Валентинович Белаш, кандидат технических наук, доцент кафедры городского строительства и хозяйства Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация г. Ростов-на-Дону, ул.Социалистическая,162), ScopusID, ORCID, rgsu-gsh@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Чжан Хаожань: формирование основной концепции, методология исследования, подготовка текста, формирование выводов.

С.Г. Шеина: научное руководство, анализ результатов исследований.

В.В. Белаш: доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Zhang Haoran, Master student of Shandong University, Shandong Jiaotong University (Jinan, Shandong Province, China), ORCID

Svetlana G. Sheina, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Urban Construction and Agriculture, Don State Technical University (162 Sotsialisticheskaya Str., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation) ScopusID, ORCID, rgsu-gsh@mail.ru

Vladimir V. Belash, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Urban Construction and Agriculture, Don State Technical University (162 Sotsialisticheskaya Str., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), ScopusID, ORCID, rgsu-gsh@mail.ru

Claimed contributorship:
Z Haoran: development of the idea, research methodology, manuscript preparation, analysis and drawing conclusions
SG Sheina: scientific guidance, analysis and drawing conclusions
VV Belash: revision of the manuscript, revision 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 17.04.2025
Поступила после рецензирования / Reviewed 12.05.2025
Принята к публикации / Accepted 28.05.2025

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА
TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

CC BY

Check for updates

Оригинальное эмпирическое исследование

УДК 69.059
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-96-105

Ресурсосберегающая технология демонтажа несущего настила покрытий из железобетонных ребристых плит при реконструкции и сносе зданий

Е.А. Жолобова[1] ✉, **А.Л. Жолобов**[1], **Н.А. Иванникова**[2]
[1]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2]Астраханский архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Россий-ская Федерация
✉ Elena@rniiakh.ru

EDN: BWOMAF

Аннотация

Введение. Строительное производство в настоящее время нуждается в ресурсосберегающей технологии, позволяющей производить при реконструкции и сносе зданий демонтаж покрытий с максимальным сохранением целостности железобетонных ребристых плит для возможности их повторного использования по прямому назначению, тем самым не только предотвращая загрязнение окружающей среды строительными отходами, но и сберегая энергетические, трудовые и материальные ресурсы на их утилизацию, а также на воспроизводство плит.

Материалы и методы. При разработке ресурсосберегающей технологии был применен комплекс методов и средств решения поставленных задач, в том числе:

– визуальное обследование железобетонных ребристых плит в процессе разборки несущего настила покрытия для определения их пригодности для повторного использования по прямому назначению;

– определение параметров оборудования, необходимого для освобождения швов и стыков между плитами от раствора и бетона на основе изучения факторов, влияющих на заполняемость швов и стыков;

– определение с помощью физических и компьютерных моделей параметров специальных захватов и приспособлений для подъема ребристых плит с поврежденными строповочными петлями.

Результаты исследования. В результате выполненного исследования предложена новая ресурсосберегающая технология демонтажа несущего настила покрытий из железобетонных ребристых плит, в основу которой положены разработанные авторами методы:

– механическое удаление материала заполнения швов и стыков между плитами и установление параметров необходимого оборудования;

– освобождение плит от имеющихся связей со стропильными балками и фермами покрытия;

– испытание сохранившихся строповочных петель у плит;

– строповка плит с поврежденными строповочными петлями специально сконструированными грузозахватными устройствами.

Обсуждение и заключение. Новая ресурсосберегающая технология позволяет производить демонтаж несущего железобетонного настила покрытий без дополнительного повреждения плит с возможностью повторного их использования с минимальным количеством отходов, экономя при этом трудовые и материальные ресурсы, в разы снижая энергозатраты, которые потребовались бы на утилизацию отходов арматуры и дробление бетона.

Ключевые слова: реконструкция и снос зданий, демонтаж покрытий, несущий железобетонный настил, ребристые плиты, замоноличенные швы и стыки, строповочные петли

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

Для цитирования. Жолобова Е.А., Жолобов А.Л., Иванникова Н.А. Ресурсосберегающая технология демонтажа несущего настила покрытий из железобетонных ребристых плит при реконструкции и сносе зданий. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(2):96–105. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-96-105

© Жолобова Е.А., Жолобов А.Л., Иванникова Н.А., 2025

Original Empirical Research

Resource-Saving Technology for Dismantling the Supporting Decking of Reinforced Concrete Ribbed Slabs during Reconstruction and Demolition of Buildings

Elena A. Zholobova[1] ✉, Alexandr L. Zholobov[1], Nadezhda A. Ivannikova[2]

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

[2]Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, Russian Federation

✉ Elena@rniiakh.ru

Abstract

Introduction. Construction industry is currently in need of resource-saving technology that allows dismantling of coatings during reconstruction and demolition of buildings with maximum preservation of the integrity of reinforced concrete ribbed slabs for them to be possibly reused for their intended purpose, thereby not only preventing environmental pollution with construction waste, but also saving energy, labor and material resources for their disposal, as well as for reproduction of slabs.

Materials and Methods. While developing resource-saving technology, a set of methods and means for solving each of the tasks was used, including:

– visual inspection of reinforced concrete ribbed slabs during dismantling of the supporting deck of the roof in order to identify their suitability for them to be reused for their intended purpose;

– identification of the parameters of the equipment required in order to release seams and joints between slabs from mortar and concrete based on a study of the factors affecting the filling of seams and joints;

– identification of the parameters of special grips and devices for lifting ribbed slabs with damaged slinging loops using physical and computer models.

Results. As a result of the research, a new resource-saving technology for dismantling the load-bearing flooring of reinforced concrete ribbed slabs was proposed which is based on the methods developed by the authors:

- mechanical removal of the material filling the seams and joints between the slabs and the established parameters of the necessary equipment;
- release of the slabs from the existing connections with the rafter beams and cover trusses;
- testing of the remaining slinging loops of the slabs;
- slinging of slabs with damaged slinging loops with specially designed load-gripping devices.

Discussion and Conclusions. The new resource-saving technology allows dismantling the load-bearing reinforced concrete decking without additional damage to the slabs with them possibly being reused with a minimum amount of waste, saving labor and material resources, significantly reducing energy costs that would be required for the disposal of reinforcement waste and crushing concrete.

Keywords*:* reconstruction and demolition of buildings, dismantling of coatings, load-bearing reinforced concrete decking, ribbed slabs, monolithic seams and joints, sling loops

Acknowledgements. The authors appreciate the reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions helped to significantly improve the quality of this article.

For citation. Zholobova EA, Zholobov AL, Ivannikova NA Resource-Saving Technology for Dismantling the Supporting Decking of Reinforced Concrete Ribbed Slabs during Reconstruction and Demolition of Buildings. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2025;4(2):96–105. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-96-105

Введение. Производство сборных железобетонных конструкций является весьма материалоемким, трудоемким и энергозатратным процессом. Для их изготовления используются дорогостоящие арматурные изделия и высокомарочные цементы, на производство которых требуются значительные энергозатраты.

В объеме производства сборных железобетонных конструкций ребристые плиты покрытий занимают одно из ведущих мест. В соответствии с ГОСТ 9491-60 «Плиты крупнопанельные железобетонные ребристые предварительно напряженные размером 1,5×6 м для покрытий производственных зданий» в нашей стране с 1960 по 1978 гг. для покрытий производственных зданий выпускались железобетонные ребристые плиты одного типоразмера — 1,5×6 м. У таких плит тонкая полка (толщиной 30 мм) и узкие ребра, из-за чего толщина защитного слоя во многих местах имеет минимально допустимое значение — 10 мм. Именно такие плиты покрытий в настоящее время чаще всего встречаются на реконструируемых промышленных объектах капитального строительства.

При нормальных условиях эксплуатации железобетонные несущие настилы покрытий, как и другие внутренние железобетонные конструкции зданий, способны более 150 лет сохранять свою работоспособность [1]. Имеются опубликованные сведения, что после многолетней эксплуатации в неагрессивной среде прочность бетона ребристых плит покрытий не снижается, а наоборот — несколько увеличивается, и при этом арматура по-прежнему сохраняет свои свойства [2–3].

В случае реконструкции зданий нередко возникает необходимость частичного или полного демонтажа несущего настила при исправном состоянии ребристых плит, например:

– для устройства в покрытии световых и светоаэрационных фонарей, а также монтажных проемов;

– при замене существующих плит на плиты с повышенной несущей способностью или со специальными отверстиями;

– при сносе здания или его частей.

При больших объемах работ по сносу зданий со сборным железобетонным каркасом разборку несущего настила покрытия, как правило, осуществляют вместе с каркасом методом обрушения так называемыми «разрушителями бетона», созданными на базе гусеничных экскаваторов с удлиненной стрелой, у которых в качестве рабочего органа используются гидроножницы [4–6]. Объем получаемых при этом отходов превышает объем разбираемых конструкций, а в целом по стране измеряется десятками тысяч тонн [7]. Датскими исследователями установлено, что при утилизации этих отходов в атмосферу выделяется в 2 раза больше углекислого газа, чем при повторном использовании полученных при демонтаже железобетонного настила плит покрытия [8].

Стремление максимально уменьшить количество отходов путем поэлементной разборки железобетонного несущего настила покрытия с возможностью повторного использования ребристых плит по прямому назначению, несмотря на попытки ученых и специалистов найти эффективные технологические решения, пока остается по существу нереализованным из-за наличия неразъемных труднодоступных сварных соединений в замоноличенных швах и стыках между плитами, а также из-за массового повреждения у них строповочных петель [9–10].

С целью обеспечения строительного производства ресурсосберегающей технологией, позволяющей производить демонтаж железобетонного настила покрытия с максимальным сохранением целостности ребристых плит, тем самым не только предотвращая загрязнение окружающей среды строительными отходами, но и сберегая энергетические, трудовые и материальные ресурсы на их утилизацию и воспроизводство, на кафедре «Технология строительного производства» Донского государственного технического университета проведено исследование возможностей:

– совершенствования способа удаления строительного раствора и бетона из швов и стыков между ребристыми плитами;

– использования строповочных петель при строповке ребристых плит для подъема или разработки специальных захватов;

– повышения производительности и безопасности демонтажа настила из ребристых плит;

– расширения области повторного использования ребристых плит покрытий.

Материалы и методы. Параметры ресурсосберегающей технологии демонтажа несущего настила покрытий зданий, а также оборудования и технологической оснастки для ее применения напрямую зависят от формы и размеров ребер, а также строповочных петель железобетонной ребристой плиты, показанных на рис. 1.

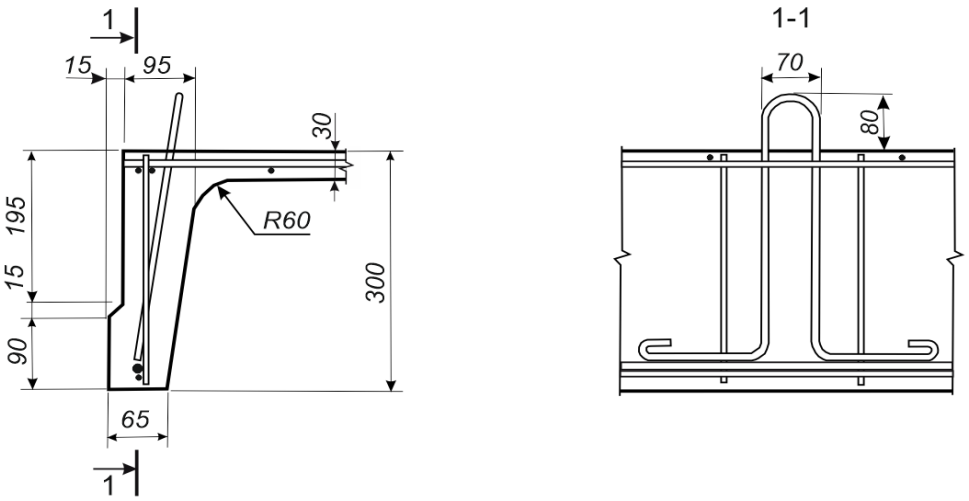


Рис. 1. Размеры продольных ребер и строповочных петель плит покрытия по ГОСТ 9491-60

https://www.stsg-donstu.ru

С учетом этих размеров в ходе исследования были определены глубина и возможные значения толщины швов между плитами, форма и размеры захватов для строповки плит с поврежденными строповочными петлями, размеры разжимного клина для отрыва смежных плит друг от друга.

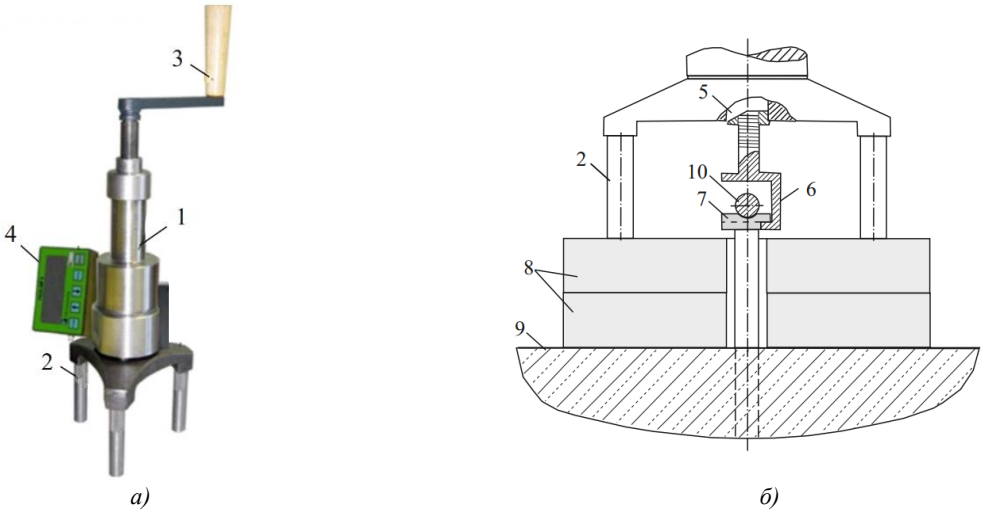
Для определения оптимальных параметров разрабатываемой ресурсосберегающей технологии, а также необходимого оборудования и технологической оснастки был применен комплекс методов и средств решения каждой из поставленных задач, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1

Методы и средства, примененные при решении задач по разработке ресурсосберегающей технологии демонтажа несущего настила покрытий зданий из железобетонных ребристых плит

Задачи исследования возможностей	Методы исследования	Средства исследования
Совершенствование способа удаления строительного раствора и бетона из швов и стыков между плитами	Аналитический: – анкетный опрос; – выявление факторов, влияющих на заполняемость швов и стыков	–
	Инструментальный: проверка заполняемости швов	Электроперфоратор со сверлом-буром диаметром 5 мм и рабочей длиной 250 мм (в качестве глубиномера)
	Инструментальный: определение адгезии раствора	Прибор ПСО-10МГ4АД (рис. 2 *а*)
Использование строповочных петель для подъема	Инструментальный: проверка несущей способности строповочных петель под нагрузкой усилием 10 кН	То же
Выявление дефектов плит перед подъемом	Визуальное обследование по ГОСТ 31937-2024 «Здания и сооружения»	–
Повышение производительности и безопасности демонтажа настила из ребристых плит	Физическое и компьютерное моделирование захватов для строповки ребристых плит	Физические и компьютерные модели захватов
Расширение области повторного использования плит покрытия	Аналитический: – классификация ребристых плит по их состоянию; – изучение опыта повторного использования плит с учетом их технического состояния	–

Проверка несущей способности строповочных петель производилась с помощью прибора ПСО-10МГ4АД, опираемого на алюминиевые пластины суммарной толщиной, соответствующей высоте строповочной петли, как показано на рис. 2 *б*.



а) *б)*

Рис. 2. Общий вид прибора ПСО-10МГ4АД *(а)* и схема его применения при проверке прочности строповочных петель *(б)*: 1 — силовозбудитель; 2 — опора; 3 — рукоять нагружения; 4 — электронный блок; 5 — шток силовозбудителя; 6 — захват; 7 — ложемент; 8 — алюминиевая пластина; 9 — плита покрытия; 10 – строповочная петля

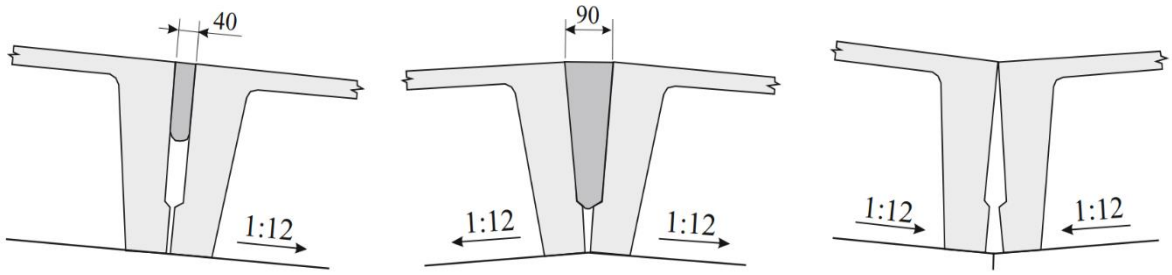
Результаты исследования. Анализ результатов изучения отечественного и зарубежного опыта демонтажа сборных железобетонных настилов покрытий зданий показал, что не менее 50 % ребристых плит получают дополнительное повреждение во время демонтажа, причем примерно половина из них — из-за разрыва строповочных петель. У 5–15 % плит повреждаются ребра при расчистке швов и стыков между плитами с помощью механизированного ударного инструмента, а у остальных — при пробивании гнезд в углах плит для обеспечения доступа к сварным соединениям плит в местах их опирания на стропильные фермы или балки.

Так, из-за наличия образовавшихся при демонтаже несущего настила сколов ребер, особенно на концевых их участках, а также трещин большая часть плит покрытия, как правило, бракуется и отправляется в отходы. Установлено также, что для подъема плит чаще всего в полке ребристых плит около поврежденных строповочных петель пробивают отверстия для пропуска двух петлевых стропов, в результате чего несущая способность плиты снижается.

Осмотр боковых граней ребристых плит после демонтажа настила, а также результаты выборочного высверливании отверстий в швах между плитами показали, что швы были заполнены в основном строительным раствором на глубину 5–15 см (рис. 3 *а*). Это можно объяснить отсутствием требований к подвижности строительного раствора для замоноличивания швов, а также низкой их контролеспособностью.

В редких случаях шов оказывался заполненным до уступов продольных ребер плит, то есть на глубину 20 см. Эти случаи характерны для коньковых участков покрытия, где верхняя часть шва при стандартном уклоне верхних граней двухскатных стропильных балок 1:12 раскрывается на 90 мм (рис. 3 *б*). Следует особо отметить, что даже в этих случаях в нижнюю часть шва между уступами продольных ребер плит раствор практически не проникал, как, впрочем, и при обычном раскрытии верхней части шва — на 40 мм (рис. 3 *а*).

Вдоль ендовы кровли шов между плитами покрытия оказывается вообще незаполненным из-за отсутствия доступа к его полости сверху плиты (рис. 3 *в*).



а) *б)* *в)*

Рис. 3. Форма и размер поперечного сечения швов между ребристыми плитами: *а* — нормальный шов; *б* — уширенный шов; *в* — закрытый шов

Знание этих особенностей позволило определить необходимую глубину реза шва, которая должна соответствовать высоте верхней (уширенной) части продольного шва и быть равна 200 мм. Это необходимо для предотвращения случайного повреждения уступов в продольных ребрах плит вращающимся алмазным диском резчика. Для выполнения этой технологической операции можно рекомендовать резчик швов с максимальной глубиной реза 200 мм, например, марки TSS RH-500G, общий вид которого представлен на рис. 4.

Рис. 4. Общий вид резчика швов TSS RH-500G со снятым алмазным диском

https://www.stsg-donstu.ru

В ходе исследования у 16 плит на четырех разных объектах удалось определить величину адгезии раствора к боковым граням плит. Выявлен большой разброс этих значений (от 0 до 0,4 МПа), что можно объяснить отсутствием каких-либо указаний по предварительной подготовке граней плит для улучшения сцепления раствора.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что после освобождения плиты от сварных соединений со стропильными конструкциями и хотя бы частичного освобождения стыков и швов между плитами от раствора и бетона крайнюю в ряду плиту перед подъемом можно достаточно легко отодвинуть от смежной плиты с помощью клина разжимного автономного марки КРА1150 с усилием до 10 кН, общий вид которого показан на рис. 5, или двух монтажных ломов.

Рис. 5. Общий вид клина разжимного автономного марки КРА1150

На следующем этапе авторами была исследована возможность предварительно, еще в процессе демонтажа настила, оценивать пригодность плиты для повторного использования перед ее подъемом. При отсутствии видимых дефектов, таких как наличие обнаженной арматуры, трещин в продольных ребрах, глубоких сколов нижних граней и углов ребер, а также пятен ржавчины и зон выщелачивания бетона, плиты могут быть использованы по прямому назначению — при монтаже новых или реконструируемых покрытий.

При наличии незначительных дефектов плиты можно использовать в качестве несъемной опалубки при устройстве цокольных ребристых перекрытий повышенной несущей способности в производственных зданиях, возводимых на торфяных и многолетнемерзлых грунтах. В случае, если ребра плит имеют значительные повреждения, а их полка сохранила целостность, то такие плиты целесообразно использовать для устройства временных тротуаров и пешеходных дорожек на строительных площадках. Во всех других случаях плиты подлежат переработке в щебень с отделением металлолома.

Наибольшую проблему для строителей при демонтаже настилов создает неработоспособное состояние большей части строповочных петель, которые могут разорваться при подъеме плиты. ГОСТ 9491-60 у железобетонных ребристых плит предусматривал строповочные петли из круглой горячекатаной арматуры диаметром 10 мм. Они должны располагаться на расстоянии 1 м от торцовой грани плиты.

В результате изучения опыта демонтажа сборного железобетонного несущего настила покрытия и отдельных его частей установлено, что наиболее распространенными повреждениями строповочных петель являются коррозия стали и допущенное при строительстве их механическое разрушение при загибании ударами кувалды по месту сгиба (сплющивание стали, излом). Собранные и систематизированные авторами статистические данные о наиболее распространенных причинах неработоспособного состояния строповочных петель приведены в таблице 2.

Для механического испытания строповочных петель высотой 70–80 мм с усилием 10 кН авторами использован прибор ПСО-10МГ4АД, устанавливаемый над каждой петлей на несколько алюминиевых пластин (толщиной 20 мм с прямоугольным отверстием размером100×20 мм для строповочной петли), используемых в качестве подкладки под прибор, и стальной ложемент для опирания петли.

В результате испытания строповочных петель (после разгибания) установлено, что лишь 43 % из общего количества выпрямленных петель выдержали заданную нагрузку. То есть велика опасность как минимум повреждения двух петель из четырех в каждой плите при ее подъеме, а поврежденные петли, как известно, восстановлению не подлежат.

Для обеспечения возможности производить строповку плит с поврежденными строповочными петлями авторами с помощью компьютерных и физических моделей разработано специальное грузозахватное устройство, названное в соответствии с классификацией, приведенной в ГОСТ Р 58520-2019 «Средства грузозахватные», надвижным опорным захватом.

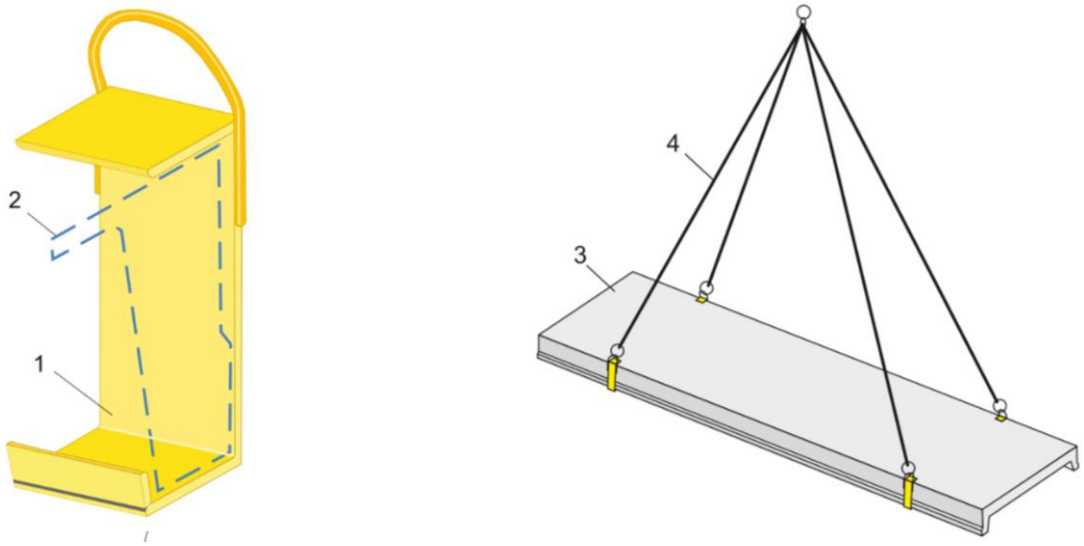
Таблица 2

Наиболее распространенные причины неработоспособного состояния строповочных петель у железобетонных ребристых плит покрытий

Причины неработоспособного состояния строповочных петель	Условия возникновения причин неработоспособного состояния строповочных петель	Среднестатистическая распространенность причины, %
Значительная коррозия материала строповочных петель	Скопление атмосферной влаги в толще покрытия под наиболее уязвимыми участками кровли (под ендовами и карнизными свесами), а также в местах отсутствия пароизоляции или несплошности ее нанесения	15
Деформация поперечного сечения строповочной петли	Применение кувалды при загибании петель после укладки плит в проектное положение	5
Изгиб с радиусом закругления менее 5 мм	То же	25
Наличие трещин и разрывов	То же	8
Диаметр арматуры менее 10 мм, предусмотренных ГОСТ 9491-60	Заводской дефект, допущенный в процессе армирования плиты	5
Отсутствие строповочных петель	Петли срезаны после укладки плит в проектное положение при монтаже покрытия	11

Конструкция захвата рассчитана на несущую способность 20 кН и обеспечивает возможность многократного его использования, а также надежную защиту от самопроизвольного отсоединения от плиты.

Основной элемент захвата выполнен из коротыша швеллера 36П по ГОСТ 8240-97 «Швеллеры стальные горячекатаные» длиной 100 мм и имеет массу не более 10 кг. Захваты необходимо устанавливать на месте предварительно срезанных строповочных петель, то есть на расстоянии 1 м от концов плиты, как показано на рис. 6 *б*.



а) *б)*

Рис. 6. Общий вид надвижного опорного захвата *(а)* и схема беспетлевой строповки плит покрытия *(б)*: 1 — надвижной опорный захват; 2 — контур поперечного сечения продольного ребра плиты; 3 — ребристая плита размером 1,5×6 м; 4 — четырехветвевой строп

Производственная проверка показала, что четыре опорных надвижных захвата, временно установленных на ребристой плите, позволяют не только поднимать и перемещать ее к месту складирования, но и укладывать в новое проектное положение или на транспортное средство для перевозки.

Подготовку к демонтажу и сам демонтаж несущего настила предлагается выполнять в следующей последовательности:

– определить физический износ железобетонного несущего настила покрытия по наличию таких признаков износа, как трещины в швах между плитами, трещины в плитах, следы протечек или промерзаний на плитах, заметные прогибы плит с оголением арматуры;

– срезать имеющиеся строповочные петли;

– выполнить пропилы глубиной 200 мм вдоль продольных швов и поперечных стыков между ребристыми плитами с помощью резчика швов, например, марки TSS RH-500G, с алмазным диском диаметром 500 мм;

https://www.stsg-donstu.ru

– для обеспечения свободного доступа ко всем трем приваренным закладным деталям каждой плиты покрытия демонтаж несущего настила в пролете или ячейке следует производить в последовательности, обратной последовательности их укладки при строительстве здания. При этом освобождать от сварных швов плиты можно с помощью угловой шлифовальной машины или газорежущего оборудования;

– выявить плиты, имеющие видимые недопустимые по ГОСТ 9491-60 дефекты, и нанести на них соответствующую маркировку;

– перед подъемом плиты убедиться в полном ее освобождении от крепления к ферме или балке покрытия сдвиганием от смежной плиты вдоль опорных стропильных конструкций с помощью клина раздвижного автономного КР2,5120 или двух монтажных ломов на 20–30 мм;

– оценить пригодность плиты для дальнейшего использования по четырем возможным направлениям;

– с помощью реечного домкрата грузоподъемностью 1–2 т временно приподнять за торцевое ребро свободный конец плиты на 20 мм и подложить под него две деревянные подкладки;

– на каждом продольном ребре плиты покрытия установить по два опорных надвижных захвата на расстоянии, равном 1 м, от торцов плиты;

– с помощью подъемного крана, оснащенного четырехветвевым стропом, произвести строповку плиты за петли захватов, ее подъем и перемещение в зону временного складирования плит в соответствии с выбранным направлением дальнейшего их использования.

Окончательную оценку эксплуатационной пригодности плит после демонтажа несущего настила покрытия следует произвести по результатам их испытания нагружением в соответствии с ГОСТ 8829-2018 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением».

При реконструкции одноэтажных производственных зданий работы по срезке сварных швов и установке одного из концов плиты на деревянные подкладки рекомендуется производить с монтажной люльки гидроподъемника. Опасная зона демонтажа несущего настила покрытия должна быть ограждена на уровне пола или земли.

Проверка перечисленных технологических возможностей осуществлялась в разные годы при реконструкции и сносе объектов капитального строительства в городах Ростове-на-Дону, Астрахани и Архангельске. При этом авторами использовались данные анкетного опроса и экспертные оценки специалистов, имеющих практический опыт демонтажа железобетонных конструкций зданий.

Обсуждение и заключение. Проведенное исследование позволило:

– обосновать возможность и целесообразность механизированного удаления раствора и мелкозернистого бетона из швов между плитами покрытия без повреждения их ребер на глубину имеющегося паза резчиком швов глубиной 200 мм;

– доказать опасность и неэффективность применения известных методов строповки ребристых плит при демонтаже сборного железобетонного несущего настила покрытий зданий. Предложен альтернативный метод строповки с помощью разработанных авторами выдвижных опорных захватов;

– расширить область возможного применения плит покрытий при наличии незначительных дефектов в качестве несъемной опалубки ребристых цокольных железобетонных перекрытий и крупноразмерных тротуарных плит.

Таким образом, в результате исследования была разработана новая ресурсосберегающая технология, позволяющая производить демонтаж несущего железобетонного настила покрытий без дополнительного повреждения плит с возможностью повторного их использования с минимальным количеством отходов, экономя при этом трудовые и материальные ресурсы, в разы снижая энергозатраты, которые потребовались бы на утилизацию отходов арматуры и дробление бетона.

В настоящее время ресурсосберегающая технология демонтажа несущего настила покрытий из железобетонных ребристых плит найдет широкое применение при восстановлении поврежденных зданий на освобожденных в ходе специальной военной операции территориях Российской Федерации.

Список литературы/References

1. Фаликман В.Р., Степанова В.Ф. Нормативные сроки службы бетонных и железобетонных конструкций и принципы их проектирования по параметрам долговечности. *Промышленное и гражданское строительство.* 2019;6:13–22. https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.06.13-22

Falikman VR, Stepanova VF Normative Service Life of Concrete and Rein-forced Concrete Structures and Principles of their Design According to Durability Parameters. Industrial and Civil Engineering. 2019;6:13–22. (In Russ) https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.06.13-22

2. Halding PS, Negendahl K The Potential for Direct Reuse of Precast Concrete Slabs in Buildings with “Wet” Joints. *Eighth International Symposium On Life-Cycle Civil Engineering.* 2023:3158-3165. https://doi.org/10.1201/9781003323020-385

3. Землянский А.А., Жуков А.Н., Булавина Д.А. Опыт натурного испытания железобетонных ребристых плит. *Строительные науки.* 2019;4:79–82. https://doi.org/10.25628/UNIIP.2019.43.4.014

Zemlyanskij AA, Zhukov AN, Bulavina DA Experience of Field Testing of Reinforced Concrete Ribbed Slabs. *Building Sciences.* 2019;4:79–82. (In Russ.) https://doi.org/10.25628/UNIIP.2019.43.4.014

4. Кужин М.Ф., Алхамд А. Исследование организационно-технологических решений при сносе (демонтаже) зданий и сооружений. *Строительное производство.* 2022;2:57–60. https://doi.org/10.54950/26585340_2022_2_57

Kuzhin MF, Alhamd A Research of Organizational and Technological Solutions in the Demolition (Dismantling) of Buildings and Structures. *Construction Production.* 2022;2:57–60. (In Russ) https://doi.org/10.54950/26585340_2022_2_57

5. Ветрова О.А. Методы утилизации строительных отходов демонтажа конструкций двух зданий производственного назначения. Инженерный вестник Дона. 2024;4(112):693–703. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2024/9147 (дата обращения: 27.03.2025).

Vetrova OA Methods of Disposal of Construction Waste from Dismantling Structures of Two Industrial Buildings. *Engineering Journal of Don.* 2024;4(112):693-703. (In Russ). URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2024/9147 (accessed: 27.03.2025).

6. Küpfer C., Fivet C. Panorama of approaches to reuse concrete pieces: identification and critical comparison. *Journal of Physics: Conference Series.* 2023;19(2600):192006. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/19/192006

7. Widmer N, Bastien-Masse M, Fivet C Building Structures Made of Reused Cut Reinforced Concrete Slabs and Walls: a Case Study. *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems.* 2023:172–179. https://doi.org/10.1201/9781003323020-18

8. Коваленко С.О. Переработка и вторичное использование строительных материалов, образующихся в результате демонтажа зданий и сооружений. *Components of Scientific and Technological Progress.* 2023;11(89):78–83.

Kovalenko SO Recycling and Reuse of Building Materials Resulting from the Dismantling of Buildings and Structures. *Components of Scientific and Technological Progress.* 2023;11(89):78–83. (In Russ).

9. Halding PS Design for disassembly of concrete slabs with mortar joints. *Buildings.* 2023;8(13):1957. https://doi.org/10.3390/buildings13081957

10. Ищенко А.В., Твердохлебова Е.А. Обзор современных технологий утилизации отходов строительного производства. *Инженерный вестник Дона.* 2024;3(111):1–13. URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9083 (дата обращения: 27.03.2025).

Ishchenko AV, Tverdohlebova EA An Overview of Modern Technologies for the Disposal of Construction Waste. *Engineering Journal of Don.* 2024;3(111):1–13. (In Russ). URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9083 (accessed: 27.03.2025).

11. Кодыш Э.Н. Демонтаж зданий и сооружений с глубокой переработкой продуктов сноса. *Промышленное и гражданское строительство*. 2023;10:64–69. https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.10.64-69

Kodysh EN Dismantling of Buildings and Structures with Deep Processing of Demolition Products. *Industrial and Civil Engineering*. 2023;10:64-69. (In Russ) https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.10.64-69

Об авторах:

Елена Александровна Жолобова, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительного производства Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, ORCID, Elena@rniiakh.ru

Александр Леонидович Жолобов, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительного производства Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, ORCID, info@rniiakh.ru

Надежда Александровна Иванникова, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства Астраханского государственного архитектурно-строительного университета (414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 18), ScopusID, ORCID, buildinst@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Е.А. Жолобова: формирование рабочей гипотезы, цели и задачи исследования, подготовка текста, доработка и развитие выводов;

А.Л. Жолобов: обзор литературных источников, анализ и обобщение результатов исследования, доработка текста, оформление иллюстраций;

Н.А. Иванникова: участие в реализации исследования, анализ полученных результатов, корректировка текста, формулирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Elena A. Zholobova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Construction Production Technology of the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), ScopusID, ORCID, Elena@rniiakh.ru

Alexandr L. Zholobov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Construction Production Technology at the Don State Technical University (344003, 1 Gagarin Square, Russian Federation, Rostov-on-Don,), ScopusID, ORCID, info@rniiakh.ru

Nadezhda A. Ivannikova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering at Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering (18 Tatishcheva St., Astrakhan, 414056, Russian Federation), ScopusID, ORCID, buildinst@mail.ru

Claimed Contributorship:

EA Zholobova: formation of the main concept, goals, objectives of the study and its general planning, preparation of the manuscript, revision and development of the conclusions.

AL Zholobov: review of the sources, analysis and generalization of the results obtained, revision of the manuscript, design of the illustrations.

NA Ivannikova: participation in the implementation of the research, analysis of the results, revision of the manuscript, formulation of the conclusions.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

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

Поступила в редакцию / Received 30.03.2025
Поступила после рецензирования / Reviewed 17.04.2025
Принята к публикации / Accepted 06.05.2025

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА
TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

Check for updates

Оригинальное эмпирическое исследование

УДК 627.8.05
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-106-116

Применение моделей машинного обучения в процесс организации строительной площадки

С.Е. Манжилевская ✉
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ smanzhilevskaya@yandex.ru

EDN: DEMQTY

Аннотация

Введение. Стратегическое планирование важно для эффективности инвестиционно-строительных проектов. Сложность решения задач увеличивается с ростом переменных в расчетах и ограничений. Для эффективного планирования строительных площадок нужно учитывать множество факторов, таких как пространственные ограничения и расстояния между объектами. Для решения таких задач возможно применение математической модели машинного обучения — генетического алгоритма (GA) для оптимизации размещения объектов на строительном участке. Цель данного исследования — улучшение точности и гибкости решений в организации строительной площадки, уменьшение сложности вычислений и минимизация объема данных.

Материалы и методы. Реализация цели исследования возможна с помощью внедрения в процесс планирования метода Systematic layout planning (SLP) для оптимизации пространства на строительных площадках. Для подтверждения эффективности оптимизации расположения объектов метод SLP был применен в организации планирования строительной площадки административного здания. В планировании учитывали этапы производства работ, требуемые хозяйственные объекты, данные о технике безопасности и экологической безопасности территории строительства. Применение плагина Dynamo для анализа позволило скорректировать расположение объектов с учетом коэффициента использования территории.

Результаты исследования. В результате проведенного моделирования плана строительной площадки установлено, что с помощью метода SLP процесс происходит адаптировано, учитывая расположение объектов согласно установленным значениям матрицы взаимосвязей с помощью автоматизации и цветовой кодировки для упрощения анализа. Гибкость в принятии обоснованных решений важна для проектировщиков, учитывая безопасность и интенсивность рабочего процесса. Метод SLP сокращает расстояния через оптимизацию логистики, оптимизирует расположение объектов на строительной площадке с учетом ограничений. Этот гибридный подход повышает эффективность внедрения моделей машинного обучения в процесс проектирования строительных генеральных планов объектов. Интеграция генетического алгоритма и BIM-технологий в процесс организации строительной площадки помогает оптимизировать решения на основе оптимальных расстояний, совершенствует визуализацию принимаемых решений и корректировку проблем.

Обсуждение и заключение. Результаты проведенной работы способствуют эффективному и быстрому принятию решений при организации строительной площадки, минимизируя время, необходимое для анализа, по сравнению с другими подходами. В результате исследования создана система, которая не только гибка и поддается регулировке, но и преодолевает ограничения, характерные для предыдущих методов. Применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования оптимальных проектных решений и автоматизации установления ключевых связей может значительно уменьшить необходимость ввода данных вручную, тем самым упрощая и ускоряя процессы разработки. Добавление новых примеров разнообразных планов и пространственных ограничений укрепит основы концепции и обогатит ее применение в разнообразных инвестиционно-строительных проектах.

Ключевые слова: организация строительства, строительная площадка, алгоритмы машинного обучения, искусственный интеллект, сквозные технологии

© Манжилевская С.Е., 2025

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

Для цитирования. Манжилевская С.Е. Применение моделей машинного обучения в процесс организации строительной площадки. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(2):106–116. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-106-116

Original Empirical Research

Implementation of Machine Learning Models in the Construction Site Organization Process

Svetlana E. Manzhilevskaya ✉
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ smanzhilevskaya@yandex.ru

Abstract

Introduction. Strategic planning is important for effectiveness of investment and construction projects. Complexity of solving problems increases with growth of variables in calculations and constraints. For effective planning of construction sites, many factors need to be taken into account, such as spatial constraints and distances between objects. To solve such problems, it is possible to use a mathematical machine learning model – a genetic algorithm (GA) to optimize the placement of objects on a construction site. The aim of this study is to improve the accuracy and flexibility of solutions in the organization of the construction site, reduce complexity of calculations and minimize the amount of data.

Materials and Methods. The realization of this goal is possible by introducing the Systematic layout planning (SLP) method into the planning process to optimize space on construction sites. To confirm the effectiveness of optimizing the location of objects, the SLP method was applied in the organization of planning the construction site of an administrative building. The planning took into account the stages of work, the required economic facilities, data on safety and environmental safety of the construction site. The use of the Dynamo plugin for analysis made it possible to adjust the location of objects taking into account the utilization factor of the territory.

Research Results. As a result of the modeling of the construction site plan, it was found that using the SLP method, the process is adapted, taking into account the location of objects according to the established values of the relationship matrix using automation and color coding to simplify analysis. Flexibility in making informed decisions is important for designers, given the safety and intensity of the workflow. The SLP method reduces distances through optimization of logistics, optimizes the location of objects on the construction site, taking into account restrictions. This hybrid approach increases the efficiency of implementing machine learning models in the design process of building master plans of facilities. The integration of the genetic algorithm and BIM technologies into the construction site organization process helps to optimize solutions based on optimal distances, improves the visualization of decisions and problem correction.

Discussion and Conclusions. The results of the study contribute to decision-making efficiently and quickly, minimizing the time required for analysis compared to some other approaches. The result of the research is the creation of a system that is not only flexible and adaptable, but also overcomes the limitations typical of previous methods. The use of machine learning technologies to predict optimal design decisions and automate the establishment of key relationships can significantly reduce the need for manual data entry, thereby simplifying and speeding up development processes. Adding new examples of diverse plans and spatial constraints will strengthen the foundations of the concept and enrich its application in a variety of investment and construction projects.

Keywords*:* construction organization, construction site, machine learning algorithms, artificial intelligence, end-to-end technologies

Acknowledgments. 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. Manzhilevskaya S.E. Implementation of Machine Learning Models in the Construction Site Organization Process. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2025;4(2):106–116. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-106-116

Введение. Стратегическое планирование превращает строительную площадку в высокоорганизованный механизм, где каждый элемент подчинен логике оптимального использования пространства, времени и материальных ресурсов. Инновационные методы проектирования позволяют создавать максимально адаптивные и эффективные рабочие среды [1].

Логистическая эффективность строительных площадок зависит не только от технических параметров, но и от качества предварительного планирования. Экономические потери могут возникать из-за неправильной организации рабочего пространства, которая создает задержки и снижает общую производительность рабочих.

Объекты строительной площадки представляют собой сложные системы, где каждый элемент — от подъездных путей до внутренней инфраструктуры — играет критическую роль в общей концепции устойчивого развития. Ключевым аспектом является не просто физическое размещение объектов, а их интегрированность в общую стратегию оптимизации ресурсов для минимизации непредвиденных расходов [2]. Важно понимать, что первоначальная планировка участка под строительное производство может кардинально влиять на конечную эффективность инвестиционно-строительного проекта, трансформируя инвестиции либо в существенную экономию, либо в дополнительные непланируемые затраты.

Эффективность проекта значительно возрастает благодаря грамотному планированию расположения хозяйственных объектов. Такой подход не только оптимизирует рабочие процессы, но и создает безопасную среду, способствующую повышению производительности труда. Беспрепятственное передвижение по объекту и бесперебойное функционирование становятся возможными при тщательно продуманной организации пространства, что в конечном итоге приводит к улучшению общих показателей и маневренности на площадке.

Организация пространства на строительном участке, согласно теории алгоритмов, относится к категории задач NP-полных, что подразумевает высокую вычислительную сложность [3]. С увеличением количества переменных и ограничений сложность решения таких задач возрастает, усложняя нахождение оптимального расположения из-за быстрого увеличения количества возможных вариантов. В частности, разработка эффективных планов для строительных площадок требует учета множества факторов, включая пространственные ограничения и необходимость соблюдения определенных расстояний между объектами [4]. Для решения подобных сложных задач могут применяться разнообразные подходы, включая математическое моделирование, компьютерные алгоритмы и подходы, основанные на правилах и знаниях, каждый из которых предлагает уникальные преимущества для организации пространства на участке застройки [5].

В то время как методы, обеспечивающие наилучшие результаты, требуют значительных вычислительных усилий и времени, особенно при расширении задач, эвристические подходы выделяются своей способностью к быстрым вычислениям и адаптивности к новым условиям и проблемам [6]. Несмотря на это, основная проблема с эвристическими методами заключается в их непостоянстве в достижении наилучшего результата, что может вынудить к поиску баланса между скоростью и точностью. В условиях, где время является критическим фактором, особенно при работе с большими и сложными задачами, принято идти на компромисс, выбирая между скоростью выполнения вычислений и точностью результатов [7].

В рамках повышения эффективности разработки плана строительного участка и оптимального размещения объектов на нем рекомендуется использовать продвинутые техники математической оптимизации, в частности «генетический алгоритм» (GA) [8]. Этот метод оптимизации считается наиболее подходящим для планирования расположения объектов на строительных площадках [9]. Генетический алгоритм, вдохновленный дарвиновской теорией эволюции, эффективно решает задачи, аналогичные процессам естественной селекции и генетическим изменениям, что позволяет находить наилучшие варианты распределения пространства [10].

Алгоритмы, основанные на генетике, выделяются своей способностью к глобальному поиску и эффективности при решении нелинейных задач высокой сложности. Впрочем, внедрение их в работу может оказаться запутанным, и, как правило, они работают медленнее в процессе поиска [11]. Это, в свою очередь, повышает вероятность того, что алгоритмы могут достигнуть несовершенных решений еще до того, как будет найден действительно оптимальный ответ.

При разработке строительных генеральных планов обычно применяют проверенные временем подходы и опираются на прошлый опыт, а также руководствуются специализированными стандартами и правилами, такими как СТО НОСТРОЙ 2.33.52-2011[1] и СП 48.13330.2019[2], содержащими нормы по устройству стройплощадок, вместо того чтобы опираться на математические методы. Внедрение инновационных стратегий планирования в строительстве нередко сталкивается с препятствиями из-за множества факторов. Существующие математические подходы к планированию предлагают лишь частные решения, неспособные адекватно адаптироваться к переменчивым и нестабильным условиям, характерным для строительных проектов.

Одной из ключевых проблем является необходимость в значительном времени на обработку данных алгоритмами при их стремлении найти идеальные решения, что становится особенно заметно с увеличением размеров и сложности проектов. Инструмент для разработки плана стройплощадки должен быть простым в использовании,

[1] СТО НОСТРОЙ 2.33.52-2011. *Организация строительного производства. Организация строительной площадки. Новое строительство.* Москва: ЦНИОМТП; 2012. 41 с.
[2] СП 48.13330.2019 *Организация строительства. Актуализированная редакция.* Москва: НИЦ «Строительство»; 2020. 87 с.

https://www.stsg-donstu.ru

способным работать с ограниченным количеством исходных данных и готовым к адаптации под разнообразные проекты в строительстве и земельные участки. Он должен способствовать скорейшему получению результатов, при этом учитывая ключевые аспекты, такие как длительность транспортных перевозок, безопасность выполнения работ и финансовые затраты, минимизируя необходимость в глубоком анализе для достижения лучшего исхода.

Для реализации поставленной задачи оптимизации планирования строительной площадки необходимо применять гибридный подход, который объединяет профессиональный опыт, нормативы и стратегии оптимизации пространства. Его целью является улучшение точности и гибкости решений, уменьшение сложности вычислений и минимизация необходимости в больших объемах данных для ввода. В контексте упорядочивания работы на строительных площадках гибридный метод математической оптимизации Systematic layout planning (SLP), который находит широкое применение в организации пространства на производственных предприятиях и в области услуг (рис. 1), выступает как еще одна логичная стратегия для оптимизации [12].

Рис. 1. Оптимизация пространства с применением метода SLP

Метод SLP уникален тем, что он позволяет применять нормы, выработанные на основе глубокого анализа связей элементов компоновки и их расположения. В свою очередь, технологии BIM предоставляют возможность эффективно организовать строительный процесс. Принципы SLP подчеркивают интегрированный подход к разработке планов строительной площадки, учитывая взаимодействия строительных процессов и оптимальное использование пространства. Применение среды для визуального программирования Dynamo и языка Python автоматизирует процессы и повышает качество планирования. Использование плагина Dynamo в Revit позволило оптимизировать планировки в BIM-среде, обеспечивая анализ в реальном времени.

Исследования, направленные на анализ эффективности методов SLP и GA, демонстрируют, что гибридные подходы приводят к успешным итогам, хотя и сталкиваются с рядом проблем [13, 14].

Во всех проведённых анализах применялся специально разработанный метод упорядочивания пространства, при котором расстановка объектов происходила в автоматизированном режиме. Пространственный объем строго соответствовал потребностям в размещении моделируемых объектов, которые были идентичны по размеру и форме. Эти аналитические работы обогащают практику новыми сведениями о синтезе разнообразных стратегий для организации пространства, однако указывают на необходимость в увеличении гибкости процессов планирования.

Цель данного исследования — улучшение точности и гибкости решений в организации строительной площадки, уменьшение сложности вычислений и минимизация объема данных.

Методы исследования. Применение технологии оптимизации расположения объектов на строительной площадке через SLP (construction site layout optimization — CSLP) является ключевым для эффективного расширения доступного пространства путем интеграции элементов в неиспользуемые зоны при соблюдении комплекса уникальных и взаимосвязанных задач и ограничений. Такой подход в планировании не только повышает общую эффективность использования земли, но и ведет к сокращению расходов на проектирование, уменьшает необходимость в перевозке строительных материалов и обеспечивает более высокий уровень доступности и безопасности для работников на площадке.

Для глубокого понимания CSLP необходимо ознакомиться с рядом ключевых терминов, среди которых особое место занимают концепции пространства, времени и аспектов структурирования. В контексте пространственного анализа особое внимание уделяется трём главным методам представления рабочей зоны. Один из методов включает в себя использование фиксированных локаций, что значительно упрощает процесс CSLP, превращая его в процесс распределения объектов по заранее определённым позициям. Другой подход разделяет территорию

на участки с помощью сетки, где каждая ячейка оборудована контрольной точкой, давая возможность эффективно использовать каждый квадратный метр для размещения предметов.

В методе, признающем пространство как непрерывное, объекты могут быть размещены где угодно на заданной территории, представляя собой непрерывную зону. Впрочем, это усложняет процесс, так как необходимо использовать более сложные алгоритмы, чтобы избежать конфликтов между объектами, и требует больше времени на обработку данных.

Для отображения объектов на стройплощадке используют формы, такие как цилиндры и прямоугольники, что позволяет точно определить расположение и размеры. Это дает ясное представление о доступных ресурсах и объектах на участке. В процессе строительства по мере готовности здания потребность в определенных объектах и занимаемом ими пространстве меняется, что напрямую влияет на продолжительность их применения на стройплощадке.

В контексте временных изменений, которые могут произойти в ходе строительства, выделяют три метода моделирования. Один из них — статический, который предусматривает постоянное присутствие всех объектов на протяжении всего срока реализации проекта, игнорируя любые временные колебания [15].

Применение метода, разделяющего процесс строительного производства на разные периоды и предусматривающего разработку отдельных вариантов на каждом этапе, помогает преодолеть некоторые ограничения. В контрасте с этим метод, который адаптируется к реальным временным рамкам каждого этапа строительства и вносит коррективы в планы в соответствии с текущими изменениями на строительной площадке, отличается от последовательного подхода, где определенные элементы проекта остаются неизменными на протяжении нескольких этапов.

Стратегии совершенствования параметров для CSLP-моделирования можно классифицировать как точные, основанные на опыте (эвристические) и смешанные методы.

Для достижения наилучших результатов применяются различные подходы. В случае использования методов, основанных на точных вычислениях, задействуются целевые функции для идентификации идеальных ответов, однако эти методы затратны с точки зрения вычислительных ресурсов, что снижает их эффективность в рамках масштабных инвестиционно-строительных проектов. С другой стороны, эвристические подходы способны предложить решения, близкие к идеалу, без необходимости выделять значительные ресурсы на поиск абсолютного оптимума. Сочетая эти два подхода, гибридные методы используют математическое моделирование и алгоритмические стратегии для повышения эффективности решений. Оптимизационные задачи формулируются с помощью математических моделей, которые включают в себя различные методы количественного анализа, включая линейное программирование, целочисленное программирование и смешанное программирование [16].

С ростом сложности задачи, вызванной увеличением числа целей и ограничений, решение становится значительно более трудоемким из-за экспоненциального увеличения сложности. Вместо того, чтобы уделять внимание только определенным целям оптимизации, применение правил, основанных на личном опыте, позволяет формировать направляющие принципы, облегчающие задачу проектировщикам. Алгоритмы, в свою очередь, ориентированы на нахождение наилучших или почти наилучших решений для тех задач оптимизации, которые по своей сути являются высоко сложными, особенно в контексте теории сложности вычислений [17].

Принципы SLP устанавливают подход к разработке пространственных планов через интегрированный подход, начиная с анализа данных и заканчивая выбором оптимального варианта планировки. В основе методологии лежит важность понимания взаимодействий между различными видами деятельности, а также необходимость определения объема, формы и типа каждого отведенного пространства. Эффективное сочетание этих объектов в рамках проекта позволяет достигать более качественных результатов в планировании. На рис. 2 представлена последовательность процедур метода SLP, показывающая результаты на каждом этапе.

Метод SLP направлен на оптимизацию пространства участка застройки, которое не только функционально, но и рационально организовано — от начального этапа анализа данных до окончательного определения планировки. Процесс, охватывающий несколько этапов, позволяет проектировщику создавать сбалансированные и продуманные пространственные концепции, выстраивая мосты между ключевыми объектами для достижения наилучших результатов. На самом начальном этапе осуществляется оценка взаимодействия ресурсных потоков в разных областях и их влияния на сферы деятельности, используя предпочтительные способы визуализации этих связей.

Данный метод облегчает понимание связей между различными объектами, предоставляя возможность создавать схемы, которые визуализируют эти связи через активность. На графиках (рис. 2) каждый элемент, похожий на ромб, отображает уровень взаимосвязи в численном выражении.

https://www.stsg-donstu.ru

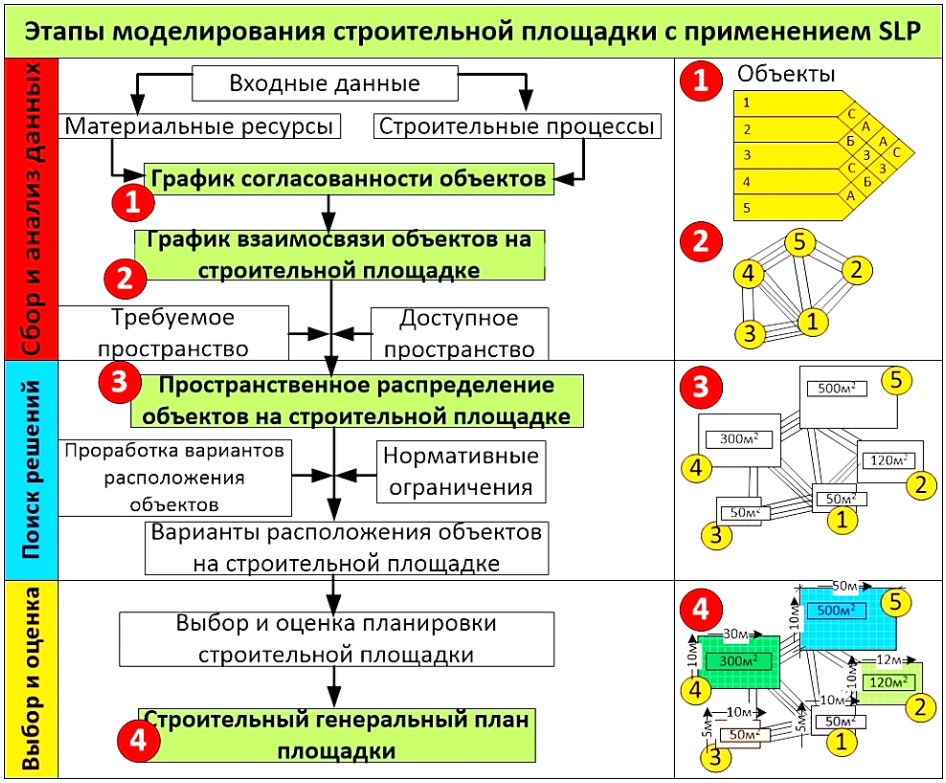


Рис. 2. Этапы моделирования строительной площадки с применением SLP

Для SLP были введены определенные обозначения уровней взаимосвязи объектов: «А» — абсолютная, «З» — значимая, «С» — стандартная, «Д» — допустимая, «Б» — необязательная и «Н» — неприемлемая. Количество линий между двумя элементами отражает степень значимости их взаимосвязи.

Сначала проектировщик собирает и анализирует данные, чтобы разработать схему, которая покажет, как объекты будут взаимодействовать между собой. Далее идет вторая фаза, где основное внимание уделяется выявлению требований к занимаемой объектом площади, необходимому оборудованию, механизмам и наличию свободного пространства для обеспечения оптимального расположения. После этого анализ переходит к этапу, на котором оцениваются потенциальные изменения в конструкции для определения их выполнимости и оптимальности, учитывая при этом стоимость, технические ограничения и вопросы безопасности. Финальная стадия процесса проектирования заключается в анализе альтернативных вариантов расположения и выборе наиболее подходящего, сравнивая их преимущества и недостатки.

В данном исследовании применяется проектный подход, известный как Design Science Research (DSR), результаты которого называются артефактами [18]. Проектирование начинается с серии шагов, выполняемых специалистом-проектировщиком, целью которых является разработка продукта-артефакта. Создание артефакта углубляет понимание исследователем задачи, что способствует улучшению процесса проектирования благодаря переосмыслению проблемы. Обычно этот процесс оценки и разработки повторяется многократно до того момента, как будет завершён итоговый проектный артефакт. Эти артефакты также имеют важное значение для развития теоретических подходов. В рамках этого проекта была разработана платформа, основанная на базе BIM-технологии, для оптимизации планирования строительных площадок с применением SLP.

На рис. 3 представлен план проекта исследования. Проект реализуется в несколько этапов: сначала определяется проблематика, затем идёт этап предложений, за ним следует разработка, после чего проводится оценка и, наконец, формулируется итог. В ходе каждого этапа были предприняты специфические шаги, ведущие к завершению исследования, что обеспечивает успешное внедрение идеи.

Для обратки данных применялись среда для визуального программирования Dynamo, язык программирования Python и программный комплекс Revit 2023, что обеспечило автоматизацию процессов CSLP. Среда Dynamo служила платформой для визуального программирования, что позволило создать информационную модель для вычислений, обеспечивая тем самым удобное и гибкое управление программными процессами с помощью системы узлов.

Этапы	Действия	Результаты
1 Определение проблемы	Определение проблемы исследования ↓ Ознакомление с нормативами планирования строительной площадки ↓ Изучение, сравнение и повышение квалификации в области языков программирования	Систематизация знаний о планировании земельного участка под строительное производство с применением метода SLP
2 Принятие решения	Организация макроэтапов на основе генетического алгоритма процедур и алгоритмов SLP	Структурирование вычислительного инструмента
3 Проведение исследования	Получение информации из нормативной документации ↓ Предварительная разработка модели алгоритма ↓ Применение математической модели в исследовании ↓ Выявление проблем и ограничений	Разработка модели на основе метода SLP
4 Оценка результатов исследования	Корректировка решений ↓ Проверка эффективности математической модели	Оптимизация проектных решений
5 Выводы по результатам исследования	Результаты исследования	Определение теоретической и практической значимости проведенного исследования

Рис. 3. План реализации исследования

В процессах визуального программирования с помощью среды Dynamo активно использовались Python-скрипты для расширения возможностей моделирования, в том числе они были применены для выполнения сложных задач, например, оптимизации планировок с помощью генетического алгоритма. Такой подход в моделировании позволил создавать множество вариантов планировок, настраивая различные параметры и отбирая наиболее эффективные решения. Взаимодействие с программным комплексом Revit через плагин Dynamo обеспечило наглядное отображение оптимизированных планировок в BIM-среде, что дало возможность провести тщательный анализ и оптимизацию процесса планирования в реальном времени.

Информационная модель для анализа дорабатывалась поэтапно по мере корректировки результатов, что способствовало ее совершенствованию и позволило достичь более высоких показателей в точности и эффективности работы. Внимательное изучение обратной связи способствовало улучшению функциональности модели, в том числе способности адаптироваться к сложным условиям строительных площадок и разрабатывать оптимальные виды планировок. Это привело к появлению новой более надежной и гибкой модели принятия решений, которая интегрировала подходы SLP и предоставила полезные инструменты для оценки степени взаимосвязи и важности различных элементов и объектов на площадке.

Первостепенно была разработана стратегия для разработки планов территории участка застройки, основываясь на опыте проектирования и нормативной документации. Далее была произведена оценка связей между различными объектами, необходимыми для расположения на строительной площадке, отмечая важность их взаимного расположения, что в целом дало возможность разработать оптимальную модель расположения объектов на строительной площадке. При помощи программного обеспечения Dynamo был реализован инструмент оценки, который вычислил общую длину путей между объектами, принимая во внимание оптимальные расстояния и взаимное расположение этих объектов. Используя генетические алгоритмы, было выбрано оптимальное расположение объектов после того, как программа автоматически сформировала эталонный план. Прогресс был оценен с использованием метода DRS (Design Science Research). Отличия между первоначальным и оптимизированным планом были выявлены благодаря коэффициенту использования территории, который демонстрировал степень достигнутого прогресса, применяя сокращенный список уровней взаимосвязи объектов в SLP до четырех для оценки степени значимости связей, которые в модели были закодированы под символами «В» — высокий уровень, «С» — средняя важность, «Н» — низкий уровень важности, и «Х» — нежелательное взаимодействие. В оценке взаимодействия объектов учитывались такие факторы, как операционная деятельность, безопасность и управленческие предпочтения, к которым может относиться, к примеру, стремление руководства разместить временные здания возле въезда на строительную площадку для облегчения доступа. В процедуре оценки уровня взаимосвязи между объектами каждая степень значимости взаимосвязи оценивалась по шкале с четырьмя уровнями: 0 — отсутствует, 1 — минимальная, 2 — средняя и 3 — высокая. Объединение этих оценок приводило к формированию индекса близости, варьирующегося от 0 (отсутствие потребности во взаимодействии) до 3 (высокая потребность во взаимодействии). Матрица взаимосвязей объектов представлена на рис. 4.

https://www.stsg-donstu.ru

Уровни согласованности объектов на стройплощадке	Выезд	Склад хранения сыпучих материалов	Полузакрытый склад для хранения цемента	Бетоно-смесительный узел	Закрытый склад	Место складирования материала для ограждающих конструкций	Место складирования опалубки	Площадка для укрупненной сборки элементов и конструкций	Временные здания	Штаб строительства	Место накопления отходов
Выезд											
Склад хранения сыпучих материалов	HHM1										
Полузакрытый склад для хранения цемента	HHH0	HHH0									
Бетоно-смесительный узел	HHH0	BHB3	BHB3								
Закрытый склад	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0							
Место складирования материала для ограждающих конструкций	CHC2	HHH0	MHB3	HHH0	HHH0						
Место складирования опалубки	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0	HHC1	HHC1					
Площадка для укрупненной сборки элементов и конструкций	HHH0	BHB3	HHH0	HHH0	BHB3	HHH0	HHH0				
Временные здания	HBB2	HHH0	HHH0	HHH0	HBB2	HHH0	HBB2	HHX0			
Штаб строительства	BBB3	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0		
Место накопления отходов	HHC1	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0	BBH1	HHH0	

Обозначение	Уровень согласованности объектов
B	Высокий
C	Средний
H	Низкий
X	Нежелательный

Обозначение	Уровень значимости взаимосвязи
3	Высокий
2	Средний
1	Минимальный
0	Отсутствует

Рис. 4. Матрица взаимосвязей объектов на строительной площадке

В процессе исследования метод CSLP подвергли проверке при планировании строительной площадки. Моделирование площадки производилось с целью сравнения первоначального и оптимизированного плана площадки, в результате чего была оценена эффективность оптимизации. Объектом исследования стал участок площадью 300 м^2 с площадью застройки 158 м^2, предназначенный под строительство административного здания.

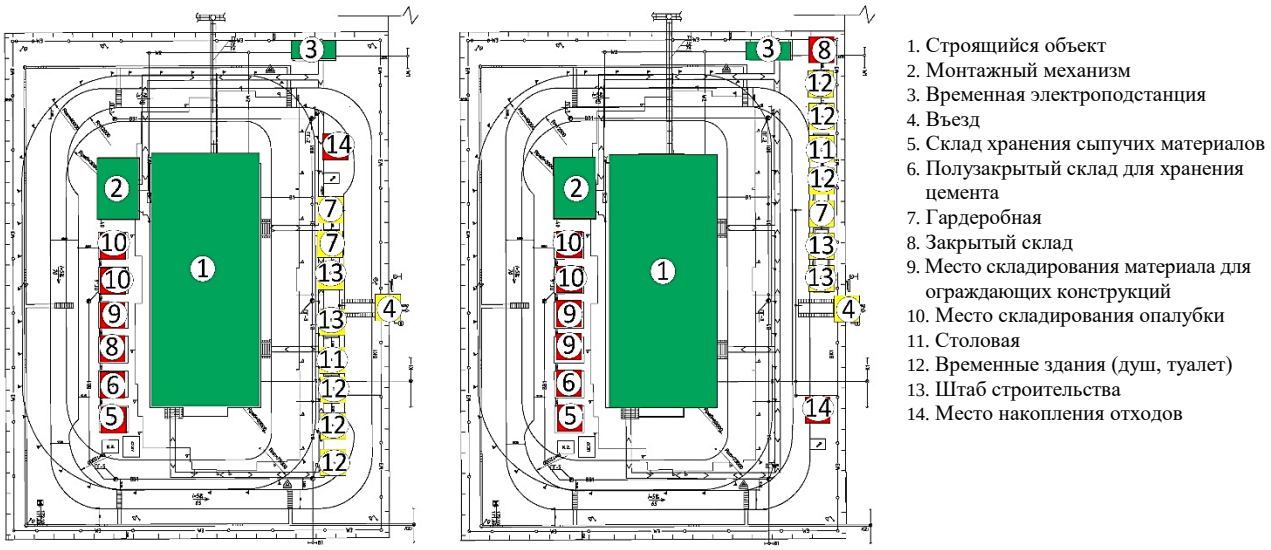
В начальной стадии разработки плана особое внимание уделялось учету конструкций, находящихся в стадии возведения. Основные элементы, такие как места для входа рабочих и транспортировки материалов, а также распределение дорожной сети влияли на первоначальную настройку используемой платформы. Кроме того, важной и неизменной частью планирования был монтажный кран, расположение которого требовало значительных вычислительных ресурсов, превышающих возможности применяемого алгоритма. Для формирования единого пространства на территории застройки было произведено включение 14 новых объектов к уже имеющимся. Эти объекты имеют разнообразные габариты, ограниченные минимальными размерами, установленными проектной документацией. Приоритет был отдан компактности расположения, благодаря чему удалось создать плотно связанную матрицу взаимосвязей, которую можно увидеть на рис. 5.

Уровни согласованности объектов на стройплощадке	Выезд	Склад хранения сыпучих материалов	Полузакрытый склад для хранения цемента	Гардеробная	Закрытый склад	Место складирования материала для ограждающих конструкций	Место складирования опалубки	Столовая	Временные здания	Штаб строительства	Место накопления отходов
Выезд											
Склад хранения сыпучих материалов	HHH0										
Полузакрытый склад для хранения цемента	HHH0	HHH0									
Гардеробная	BHB3	HHH0	HHH0								
Закрытый склад	CHC2	HHH0	HHH0	HHH0							
Место складирования материала для ограждающих конструкций	CHC2	HHH0	MHB3	HHH0	HHH0						
Место складирования опалубки	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0	HHC1	HHC1					
Столовая	BHB3	HHH0	HHH0	BHB3	HHH0	HHH0	HHH0				
Временные здания	HBB2	HHX0	HHX0	BHB3	HBB2	HHH0	HHX0	BHB3			
Штаб строительства	BBB3	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0		
Место накопления отходов	HHC1	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0	HHH0	BBH1	HHH0	

Рис. 5. Матрица взаимосвязей объектов на строительной площадке административного здания

На рис. 6 представлен первоначально запроектированный план строительной площадки и план, оптимизированный методом CSLP, где различные функциональные зоны выделены разными цветами: зеленым — стационарные объекты, красным — производственные и складские объекты, желтым — временные здания.

Применение для анализа встроенных функций Dynamo позволило оценить и скорректировать расположение объектов, учитывая коэффициент использования территории. В таблице 1 представлены результаты вычислений и сопоставление итоговых значений коэффициента застройки для двух вариантов.



1) *2)*

Рис. 6. Планировка строительной площадки: *1* — первоначальный план; *2* — оптимизированный план

Таблица 1

Показатели планировки участка застройки

Планировка строительной площадки	Коэффициент использования территории
Первоначальная	1,04
Оптимизированная с помощью метода SLP	1,2

Результаты исследования. Для процесса CSLP было важно адаптировать процедуры SLP, чтобы лучше соответствовать динамике в планировании строительных площадок, отличающихся от статичных планировок. В процессе производства SLP объединяет как стационарные, так и передвижные объекты, в то время как временные объекты в строительстве перемещаются по ходу производства работ. CSLP позволяет усовершенствовать матрицу взаимосвязей SLP, делая ее более удобной и интуитивно понятной за счет автоматизации и использования цветов для упрощения анализа взаимосвязи. Также CSLP учитывает интенсивность рабочего процесса и аспекты безопасности при определении взаимосвязи объектов, что способствует созданию более эффективных планировок, учитывающих ход строительного производства.

Гибкость в принятии обоснованных решений важна для проектировщиков, так как они могут учитывать ключевые факторы, такие как безопасность и интенсивность рабочего процесса. Основная цель метода SLP заключается в сокращении ненужных расстояний через оптимизацию логистики, что достигается за счет процессов принятия решений.

Метод CSLP отличается тем, что позволяет оптимизировать расположение объектов на строительной площадке для любого участка, соблюдая ограничения. Такой гибридный подход отражает выбор проектировщика при планировании и повышает доверие к инструменту в отличие от жестких критериев заранее установленных норм.

Интеграция генетического алгоритма в процесс компоновки дает возможность реализовать разнообразные решения и оптимизирует их, основываясь на оптимальных расстояниях, что значительно расширяет возможности компоновки. BIM-технологии играют ключевую роль, обеспечивая визуализацию, которая улучшает выявление проблем и их последующую коррекцию. Сочетание SLP с BIM-технологиями и генетическими алгоритмами позволяет сохранить логику оптимизации, адаптируя ее к планировке строительной площадки. Хотя изменения планировки в реальном времени на различных этапах строительного производства пока не учитываются в нормах проектирования, такой подход существенно повышает эффективность работы и минимизирует ненужные перемещения.

Обсуждение и заключение. В данной работе представлен новаторский подход к созданию совместной вычислительной среды, которая объединяет элементы стратегического логистического планирования (SLP) с функционалом BIM-платформы, формируя уникальную гибридную систему. Основное преимущество системы заключается в визуализации процесса проектирования, акцентируя внимание на оптимальной организации пространства для временных объектов с учетом таких важных аспектов, как эффективность рабочих процессов, безопасность и учет предпочтений управленческого звена. Инновация этого подхода заключается в интеграции механизмов принятия решений в процесс территориального распределения административно-хозяйственных объектов на

https://www.stsg-donstu.ru

строительной площадке, что обеспечивает улучшение производительности труда за счет грамотной организации логистики на объекте. Эта гибридная модель успешно сочетает в себе алгоритмы машинного обучения с привлечением экспертного опыта, давая возможность эффективно генерировать различные варианты планировок с минимальным требованием к исходным данным, тем самым ускоряя процесс разработки.

В результате исследования была создана платформа для оптимизации процессов и пространства на стройплощадках, которая обеспечивает множественные функции для эффективного распределения пространства и планирования работы. Этот инструмент упрощает задачи по устройству строительной площадки, делая их более гибкими и результативными благодаря выбору наилучших стратегий действий. Платформа интегрирует возможности визуализации через BIM-технологии и следует принципам SLP для обеспечения более гибкого и результативного планирования строительных процессов. Она учитывает различные аспекты, включая эффективность рабочего процесса, безопасность и предпочтения управленческого персонала, чтобы оптимизировать расположение объектов на строительной площадке.

Данная платформа применяет методы моделирования, которые позволяют объектам занимать пространство без привязки к жестким координатам или предопределенным сеткам. Это дает возможность оптимизировать использование каждого квадратного метра, автоматически рассчитывая оптимальные размеры объектов и их размещение таким образом, чтобы избежать ненужного занимаемого пространства. Эффективная адаптация и оптимизация пространства напрямую влияет на повышение производительности труда на строительной площадке, минимизируя занимаемое пространство на участке застройки и, соответственно, финансовые издержки.

Результаты проведенной работы способствуют эффективному и быстрому принятию решений, минимизируя время, необходимое для анализа, по сравнению с другими подходами. Результат проделанной работы — это создание системы, которая не только гибка и поддается регулировке, но и преодолевает ограничения, характерные для предыдущих методов. В отличие от стандартных подходов, которые полагались на нормативы или заранее заданные шаблоны, предложенная система оперирует в рамках модели безграничного пространства, что дает возможность свободного размещения элементов. Такой подход предоставляет проектировщикам необычайно высокий уровень контроля над установлением ограничений, выбором доступного пространства и определением точек доступа.

Проведенный анализ с применением CSLP по улучшению планировки земельного участка для постройки административного здания выявил, что возможности для снижения неэффективно используемого пространства без увеличения затрат различаются в зависимости от размера проекта и его сложности.

В зависимости от сложности условий для планирования участка под строительство различные факторы, такие как ограничения по площади, многообразие и характеристики объектов, необходимость в определенном расположении, фиксированные местоположения некоторых объектов, многоуровневое размещение и нестандартные формы участков, могут ухудшать способность платформы уменьшать ненужные расстояния. Вопреки этим сложностям, метод CSLP способен значительно улучшить производительность как в простых, так и в более комплексных условиях. Тем не менее, эффективность этого инструмента ограничена качеством исходных данных и активным вовлечением проектировщика в процесс определения взаимосвязей.

Для успешного проектирования необходимо, чтобы разработчики накапливали опыт, помогающий предотвратить возможные просчеты. Однако следует учитывать, что их личные взгляды могут неосознанно влиять на конечный продукт, особенно в аспектах, касающихся установления связей и взаимодействий в системе.

В будущем внедрение моделей машинного обучения в процесс проектирования может значительно преобразиться за счет внедрения алгоритмов оптимизации. Эти алгоритмы предназначены для достижения рационального баланса между быстродействием и точностью обработки данных, что критически важно для сложных задач. Применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования оптимальных проектных решений и автоматизации установления ключевых связей может значительно уменьшить необходимость ввода данных вручную, тем самым упрощая и ускоряя процессы разработки. Добавление новых примеров разнообразных планов и пространственных ограничений укрепит основы концепции и обогатит ее применение в разнообразных инвестиционно-строительных проектах.

Список литературы/References

1. Xu M, Mei Z, Luo S, Tan Y Optimization Algorithms for Construction Site Layout Planning: A Systematic Literature Review. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2020;27:1913–1938. https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2019-0457

2. Al Hawarneh A, Bendak S, Ghanim F Dynamic Facilities Planning Model for Large Scale Construction Projects. *Automation in Construction.* 2019;98:72–89. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.021

3. Succar B Building Information Modelling Framework: A Research and Delivery Foundation for Industry Stakeholders. *Automation in Construction.* 2009;18(3):357–375. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003

4. Kaveh A, Vazirnia Y Construction Site Layout Planning Problem Using Metaheuristic Algorithms: A Comparative Study. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering.* 2019;43:105–115. https://doi.org/10.1007/s40996-018-0148-6

5. Jaafar K, Elbarkouky R, Kennedy J Construction Site Layout Optimization Model Considering Cost and Safety in a Dynamic Environment. *Asian Journal of Civil Engineering.* 2021;22:297–312. https://doi.org/10.1007/s42107-020-00314-3

6. Prayogo D, Cheng M-Y, Wu Y-W, Redi AANP, Yu VF, Persada SF at al. A Novel Hybrid Metaheuristic Algorithm for Optimization of Construction Management Site Layout Planning. *Algorithms.* 2020;13:117. https://doi.org/10.3390/a13050117

7. Yang B, Fang T, Luo X, Liu B, Dong M A BIM-Based Approach to Automated Prefabricated Building Construction Site Layout Planning. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2021;26:1535–1552. https://doi.org/10.1007/s12205-021-0746-x

8. Papadaki IN, Chassiakos AP Multi-Objective Construction Site Layout Planning Using Genetic Algorithms. *Procedia Engineering.* 2016;164:20–27. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.587

9. Salah M, Elbeltagi E, Elsheikh A Optimization of Construction Site Layout Using BIM Generative Design. *International Journal of Construction Management*. 2024;24:314–322. https://doi.org/10.1080/15623599.2023.2222997

10. Chemim L, Sotsek N, Kleina M Layout Optimization Methods and Tools: A Systematic Literature Review. *Gestão da Produção, Operações e Sistemas*. 2021;16(4):59–81. https://doi.org/10.15675/gepros.v16i4.2806

11. Said H, El-Rayes K Optimizing Material Procurement and Storage on Construction Sites. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2011;137:421–431. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000307

12. Maghfiroh MFN, Redi AANP, Ong J, Fikri MR Cuckoo Search Algorithm for Construction Site Layout Planning. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*. 2023;12:851. https://doi.org/10.11591/ijai. v12.i2.pp851-860

13. Schwabe K, Teizer J, König M Applying Rule-Based Model-Checking to Construction Site Layout Planning Tasks. *Automation in Construction*. 2019;97:205–219. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.012

14. Le PL, Dao TM, Chaabane A BIM-Based Framework for Temporary Facility Layout Planning in Construction Site: A Hybrid Approach. *Construction Innovation*. 2019;19:424–464. https://doi.org/10.1108/CI-06-2018-0052

15. Petroutsatou K, Apostolidis N, Zarkada A, Ntokou A Dynamic Planning of Construction Site for Linear Projects. *Infrastructures.* 2021;6:21. https://doi.org/10.3390/infrastructures6020021

16. Dienstknecht M A Branch and Bound Approach for the Tower Crane Selection and Positioning Problem with Respect to Mutual Interference. *4OR.* 2022;21:105–123. https://doi.org/10.1007/s10288-022-00503-7

17. Karmakar A, Singh AR, Kumar Delhi VS Automated Route Planning for Construction Site Utilizing Building Information Modeling. *Journal of Information Technology in Construction*. 2022;27:827–844. https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.040

18. Lacerda DP, Dresch A, Proença A, Antunes Júnior JAV Design Science Research: Método de Pesquisa para a Engenharia de Produção. *Gestão & Produção*. 2013;20(4):741–761. https://doi.org/10.1590/S0104-530X2013005000014

Об авторе:

Светлана Евгеньевна Манжилевская, кандидат технических наук, доцент кафедры организации строительства Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) ORCID, ScopusID, smanzhilevskaya@yandex.ru

Конфликт интересов: **автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Svetlana E. Manzhilevskaya, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Construction Management Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, ORCID, smanzhilevskaya@yandex.ru

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

The author has read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 17.02.2025
Поступила после рецензирования / Reviewed 12.03.2025
Принята к публикации / Accepted 28.03.2025

ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО, ПЛАНИРОВКА СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

URBAN PLANNING, PLANNING OF RURAL SETTLEMENTS

CC BY

Check for updates

Оригинальное эмпирическое исследование

УДК 69.022.5
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-117-127

Стандарты зеленых крыш в объектах строительства

С.Г. Шеина[1], Р.В. Балашев[1] ✉, Р.Д. Шахиев[1], У Шисяо[2]
[1]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2]Шаньдунский транспортный университет, провинция Шаньдун, г. Цзинань, Китайская народная республика
✉ ruslanbalashev33@gmail.com

EDN: HVZJMI

Аннотация

Введение. Настоящее исследование направлено на формирование структурированной классификации озелененных кровель, необходимой для системного развития практик зеленой архитектуры и природного урбанизма в условиях российской застройки. Отсутствие целостного подхода к типологизации подобных решений создает сложности при проектировании и внедрении экологически ориентированных технологий. Разрабатываемая авторская система охватывает четыре ключевые характеристики и комплекс подэлементов, что позволяет комплексно описывать и разграничивать различные виды зеленых крыш. Такая классификация может служить эффективным инструментом в работе специалистов, занятых в области проектирования, строительства и благоустройства.

Материалы и методы. С целью раскрытия темы проведен комплекс теоретических исследований. Были изучены нормативные документы, включая ГОСТ и СНиП, а также международные стандарты LEED и BREEAM, проанализированы труды специалистов, практические примеры и публикации в специализированных источниках. В исследовании описан алгоритм анализа: изучение конструктивных решений, экологических характеристик, принципов проектирования и эксплуатации.

Зеленые крыши представляют собой кровельные конструкции с растительностью. В зависимости от назначения они делятся на эксплуатируемые (для отдыха и активностей) и неэксплуатируемые (экологические функции). Строительство зеленых крыш регулируется стандартами, такими как ГОСТ Р 58875-2020, ГОСТ Р 54964-2012 и ГОСТ Р 58709-2019. Эти документы определяют типы зеленых крыш, требования к материалам, конструкции и микроклимату помещений.

Результаты исследования. В процессе исследования разработана типология, включающая экстенсивные, интенсивные и полуэкстенсивные крыши, а также классификации по эксплуатационным, конструктивным, социальным и экологическим критериям. Представлены примеры реализации в международной и российской практике. Классификация позволяет учитывать человеческое использование, размещение и уровень озеленения кровель, предлагая комплексную систему описания.

Обсуждение и заключение. Внедрение стандартов зеленых крыш представляет собой принципиально новый подход к управлению жизненным циклом здания, включая не только строительство, но и улучшение экологичности, энергосбережение и повышение качества жизни, что является процессом длительным и противоречивым, требующим времени для анализа и адаптации. Они способствуют энергоэффективности, терморегуляции, улучшению микроклимата, продлению срока службы кровли и созданию новых рекреационных зон. Концепция зеленых крыш — это синтез архитектуры, экологии и технологий, способный обеспечить устойчивое развитие городов и улучшить качество жизни. Конечная цель данного исследования — предложить универсальный инструмент типологического анализа зеленых крыш, который может быть применен в российской практике для повышения эффективности градостроительных решений и устойчивого развития городской среды.

Ключевые слова: классификация зеленых кровель, виды крыш с озеленением, зеленые кровли, висячие сады, озеленение активно используемых кровель, интенсивное и экстенсивное озеленение, полуинтенсивное озеленение

Для цитирования. Шеина С.Г., Балашев Р.В., Шахиев Р.Д., Шисяо У. Стандарты зеленых крыш в объектах строительства. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(2):117–127. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-117-127

© Шеина С.Г., Балашев Р.В., Шахиев Р.Д., Шисяо У., 2025

Original Empirical Research

Standards for Green Roofs in Construction Projects

Svetlana G. Sheina[1], Ruslan V. Balashev[1] ✉, Roman D. Shakhiev[1], W. Shixiao[2]

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

[2] Shandong Jiaotong University, Jinan, Shandong Province, China People's Republic of China, Changqing District, Jinan

✉ ruslanbalashev33@gmail.com

Introduction. The study seeks to form a structured classification of green roofs essential for systematic development of practices of green architecture and natural urbanism in Russian development. The lack of a holistic approach to typologizing such solutions causes difficulties in designing and implementing environmentally oriented technologies. The system developed by the author covers four major characteristics and a set of sub-elements, which allows for a comprehensive description and differentiation of various types of green roofs. Such a classification can serve as an effective tool for specialists engaged in the field of design, construction and landscaping.

Materials and Methods. In order to look into the topic, a set of theoretical studies has been conducted. Regulatory documents, including GOST and SNiP, as well as international standards LEED and BREEAM, were examined. The works of specialists, practical examples and publications in specialized sources were also analyzed. The study describes an analysis algorithm: the investigation of constructive solutions, environmental characteristics, principles of design and operation. Green roofs are roofing structures with vegetation. Depending on their purpose, they are divided into exploited (for recreation and activities) and non-exploited (environmental functions). The construction of green roofs is regulated by such standards as GOST R 58875-2020, GOST R 54964-2012 and GOST R 58709-2019. These documents define the types of green roofs, requirements for materials, structures, and indoor climate.

Research Results. Throughout the course of the research, a typology was developed includg extensive, intensive and semi-extensive roofs, as well as classifications according to operational, structural, social and environmental criteria. Examples of implementation in international and Russian practice are provided. The classification allows one to account for the human use, placement and level of landscaping of roofs, offering a comprehensive description system.

Discussion and Conclusion. The introduction of green roof standards represents a totally new approach to building lifecycle management, including not only construction, but also environmental improvement, energy conservation, and quality of life, which is a lengthy and controversial process requring time for analysis and adaptation. They contribute to energy efficiency, thermoregulation, improved microclimate, extended roof life, and the creation of new recreational areas. The concept of green roofs is a synthesis of architecture, ecology and technology that can ensure the sustainable development of cities and improve the quality of life. The ultimate aim of this study is to offer a universal tool for typological analysis of green roofs which can be applied domestically to improve the effectiveness of urban planning solutions and sustainable urban environment development.

Keywords: classification of green roofs, types of roofs with landscaping, green roofs, hanging gardens, landscaping of actively used roofs, intensive and extensive landscaping, semi-intensive landscaping

For citation. Sheina S.G., Balashev R.V., Shakhiev R.D., Shixiao U. Standards of Green Roofs in Construction Projects. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2025;4(2):117–127. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-117-127

Введение. Современные вызовы урбанизации и изменения климата обостряют необходимость в устойчивых решениях для городской среды. Зеленые крыши — это комплексные системы, сочетающие природные элементы с инженерными конструкциями, способные существенно повысить экологическую и энергетическую эффективность зданий.

Несмотря на активное развитие технологий и наличие положительного международного опыта, в отечественной практике отсутствует систематизированная классификация зеленых кровель. Существующие исследования рассматривают только отдельные конструктивные или функциональные аспекты, что приводит к отсутствию единого подхода при проектировании, оценке и внедрении подобных решений.

Таким образом, в теоретической базе прослеживается явный пробел — недостаток целостной типологии зеленых крыш, адаптированной к российским условиям. Это препятствует масштабному распространению технологии и затрудняет стандартизацию процессов.

Целью настоящего исследования является разработка структурированной классификации зеленых кровель, учитывающей архитектурно-пространственные параметры, функциональное назначение, интенсивность озеленения, социальную доступность и технические характеристики, применимые в российских климатических и нормативных условиях.

Материалы и методы. Зеленые крыши представляют собой кровельные конструкции, на которых высажена растительность. В зависимости от функционального назначения они подразделяются на эксплуатируемые (предназначенные для отдыха, занятий спортом и других активностей) и неэксплуатируемые (выполняющие преимущественно экологические функции). Создание таких систем требует применения комплексных инженерных решений, направленных на повышение энергоэффективности, устойчивости и экологической эффективности зданий [1].

В рамках исследования был проведен комплексный теоретический анализ, включающий:

– обзор нормативной документации (включая ГОСТы, СП, международные стандарты LEED, BREEAM);
– изучение научных публикаций по теме проектирования, эксплуатации и экологических аспектов зеленых крыш;
– анализ реализованных объектов и типовых решений в различных странах.

Зеленые крыши классифицируются по функциональному назначению на:

– эксплуатируемые (используются для отдыха, спорта, рекреации);
– неэксплуатируемые (выполняют преимущественно инженерно-экологические функции).

Ниже перечислены ключевые технологические направления в устройстве зеленых кровель:

1. Слоистая структура и растительный покров. Конструкция зеленой крыши включает в себя несколько функциональных слоев: гидроизоляционный, дренажный, фильтрующий, субстратный и растительный (рис. 1). В каждом из них применяются специализированные материалы — от современных гидроизоляционных мембран до легких, питательных субстратов.

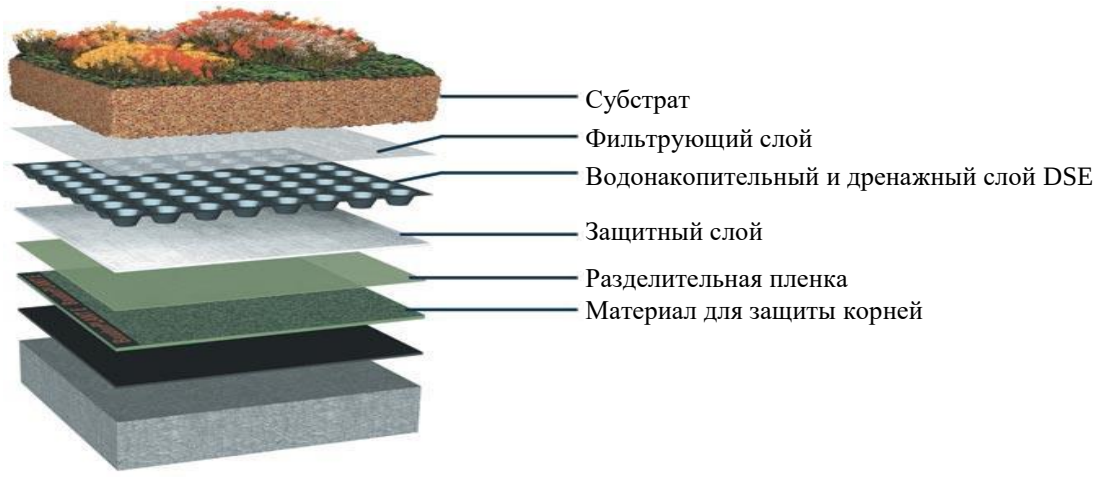


Рис. 1. Устройство зеленой кровли [1]

2. Управление водными потоками. Важной задачей является эффективное распределение и использование осадков. Для этого используются системы сбора, накопления и повторного применения дождевой воды, а также технологии, снижающие риск задержки влаги и повреждения гидроизоляционного слоя, предотвращая протекание через кровельные конструкции.

3. Повышение энергоэффективности. Зеленая крыша способствует снижению теплопотерь и перегрева зданий, что ведет к сокращению затрат на кондиционирование и отопление. Это достигается за счет теплоизоляционных свойств почвенного слоя и может дополняться установкой энергосберегающих решений — от солнечных панелей до пассивных систем вентиляции.

4. Очищение воздуха. Растительный покров участвует в фильтрации загрязнителей и поглощении углекислого газа. Подбираются специально устойчивые виды растений, способные улучшать качество воздуха, особенно в условиях городской застройки.

5. Поддержка биоразнообразия. Зеленые крыши могут быть адаптированы для создания микробиотопов. Используются решения, направленные на привлечение полезных насекомых, птиц и других представителей фауны.

6. Нормативное регулирование. Для успешной реализации проектов зеленых крыш необходимо соблюдение действующих строительных стандартов и норм, которые регламентируют:

– требования к составу почвенного слоя с учетом устойчивости и жизнеспособности растений;
– параметры дренажных систем, обеспечивающих нормальный отвод избыточной влаги;
– безопасность и конструктивную надежность, включая допустимую нагрузку на несущие элементы здания.

Стандарты и регулирование

Для того, чтобы обеспечить эффективное внедрение зеленых крыш, существуют стандарты и регулирования, руководствуясь которыми строительные компании и архитекторы могут создавать экологически устойчивые объекты [1]:

– слои и состав почвы: определенные стандарты регламентируют типы почвы, используемые на зеленых крышах, чтобы обеспечить не только эстетическое удовлетворение, но и максимальную жизнеспособность растительности;

– дренаж и водоотведение: регулирование включает в себя системы дренажа, предотвращающие избыточное задержание влаги, и обеспечивающие нормальный сток дождевых вод;

– системы безопасности: важным аспектом является обеспечение безопасности и устойчивости зеленых крыш, в том числе регулирование веса и структурной интеграции.

В российской практике нормативное регулирование зеленых крыш базируется на следующих документах:

– ГОСТ Р 54964-2012 — устанавливает общие требования к благоустройству эксплуатируемых кровель;

– ГОСТ Р 58709-2019 — содержит технические требования и классификацию зеленых крыш;

– ГОСТ Р 58875-2020 — «зеленый стандарт», определяющий требования к экологической устойчивости зданий.

В соответствии с положениями стандарта ГОСТ Р 58709-2019 «Зеленые крыши. Общие технические требования», классификация зеленых крыш включает следующие основные типы:

– Садовые крыши — кровли с многолетней растительностью, требующей систематического ухода;

– Крыши с газонным покрытием — конструкции, на которых высаживаются устойчивые травянистые растения;

– Кровли с контейнерным озеленением — поверхности, озелененные с помощью размещения растительности в мобильных емкостях (контейнерах).

В рамках стандарта также представлены требования к ключевым компонентам зеленой крыши (рис. 2): конструктивным элементам (включая несущую способность перекрытия, гидроизоляционные слои, систему водоотведения, теплоизоляционные материалы); используемым материалам (их экологической безопасности, устойчивости к влаге, долговечности); растительным сообществам (допустимым видам, их агротехническим характеристикам, сезонной устойчивости).

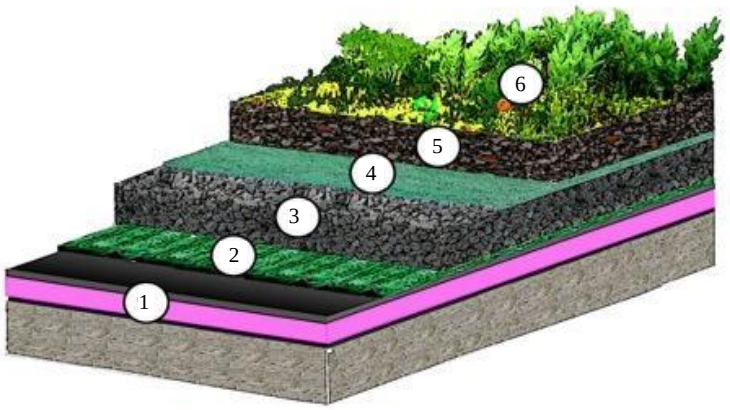


Рис. 2. Конструктивные решения зеленой кровли:
1 — поверхность крыши, гидроизоляция; 2 — защитный и аккумулирующие слои; 3 — дренаж;
4 — защита от прорастания корней; 5 — почвенный слой; 6 — растения [1]

Отдельное внимание в нормативной базе уделяется обеспечению благоприятного микроклимата внутри зданий. Так, согласно ГОСТ Р 54964-2012, температурные параметры в жилых и общественных помещениях должны находиться в пределах от 20 до 28 °С при относительной влажности воздуха от 40 до 60 %. Озелененные кровли способствуют терморегуляции внутреннего пространства здания, снижая температуру воздуха в теплое время года и тем самым улучшая микроклиматические показатели.

Результаты исследования. История зеленых крыш насчитывает несколько десятилетий, за которые технология претерпела значительные изменения. Постепенно формировались подходы к стандартизации и классификации этих конструкций. В результате накопленного опыта была выработана единая типология зеленых крыш, признанная международным профессиональным сообществом, в частности — ландшафтными архитекторами.

Наиболее распространенная классификация основана на следующих критериях:

– несущая способность кровли;

– толщина и масса почвенного субстрата;

– ассортимент и требования к растительности;

– возможность и характер присутствия человека.

https://www.stsg-donstu.ru

Согласно этой типологии, выделяют три основных типа:

1) экстенсивные крыши — минимальное обслуживание, тонкий слой почвы, устойчивые к погоде растения;

2) интенсивные крыши — сложные насаждения, включая кустарники и деревья, требующие ухода и усиленной конструкции;

3) полуэкстенсивные крыши — промежуточный вариант, комбинирующий элементы двух предыдущих типов.

Разработка классификационной системы позволяет комплексно описывать типы зеленых кровель, их назначение, конструктивные особенности и социальную доступность.

Классификация зеленых крыш в данном исследовании рассматривается как системный подход, позволяющий описать сложную многоуровневую структуру элементов и их взаимосвязей. В ее основе лежит взаимодействие трех ключевых компонентов, определяющих архитектурно-пространственную и функциональную организацию зеленой кровли: поверхности крыши, человеческого присутствия (пользования) и растительного слоя. Соотношение и степень задействования этих элементов позволяют выделить различные типы зеленых крыш, что представлено в схеме (рис. 3) [5].

Рис. 3. Классификация зеленых кровель по родовому признаку [5]

Решение о том, будет ли человек использовать крышу в своих целях, является ключевым моментом при естественной классификации крыш. Эта классификация включает в себя первый аспект — разделение на эксплуатируемые и неэксплуатируемые кровли (Таблица 1).

Таблица 1

Классификация по степени эксплуатации

№	Вид зеленых крыш	Описание
1	Эксплуатируемые (без доступа автотранспорта)	Зоны отдыха, детские площадки, озелененные террасы (рис. 4–7, 15)
2	Эксплуатируемые с возможностью проезда	Паркинги, крыши с дорожками и доступом техники (рис. 5, 9, 10)
3	Частично эксплуатируемые	Используются на отдельных участках кровли
4	Неэксплуатируемые	Выполняют только экологические и теплоизоляционные функции

Пригодная для использования плоская зеленая крыша предлагает широкий спектр возможностей для отдыха, физического развития и реабилитации. Если крыша полностью покрыта растениями и человек находится там только для ухода (например, садовод или профессионал), то такая крыша считается неиспользуемой [5].

В зависимости от того, какой тип зеленой крыши используется, она выполняет различные функции, которые могут варьироваться от экосистемных (например, улучшение качества воздуха или поддержка биоразнообразия) до функциональных (например, создание пространства для отдыха или занятий спортом). Рассмотрим преимущества этих видов в контексте взаимодействия с человеком. Каждый тип зеленой крыши имеет свои особенности, которые могут зависеть от конкретных потребностей здания или территории. Эксплуатируемые крыши, например, предоставляют дополнительные возможности для использования пространства, что делает их особенно привлекательными в условиях ограниченной городской площади. Помимо экологических и эстетических преимуществ, различные типы зеленых крыш имеют и функциональные особенности, которые зависят от степени их эксплуатации. Например, крыши, предназначенные для активного использования, могут быть оборудованы для размещения транспортных средств или установки специального оборудования. Важно отметить, что эксплуатация таких крыш (например, для организации парковки) возможна только в соответствии с техническим заданием, что регулируется стандартами и строительными нормами [5].

Зеленые крыши встречаются на различных уровнях – на земле, на балконе, на пешеходной эстакаде и на крыше здания независимо от его этажности (таблица 2).

Таблица 2

Классификация по расположению относительно уровня земли

№	Тип размещения	Примеры и особенности
1	Зеленые крыши зданий	Крыши, которые находятся на верхних этажах жилых, общественных и производственных зданий (рис. 4)
2	Террасные крыши	Крыши, которые находятся на верхних этажах зданий с террасами или террасных зданий (рис. 6)
3	Кровли на подземных уровнях	Крыши, которые находятся на подвалах и цокольных этажах зданий, включая различные уровни, над паркингами, ТЦ, техподпольями (рис. 6, 11, 12)
4	Висячие сады	Сады, которые находятся на различных уровнях надземных частей зданий, специальных платформах, мостах и эстакадах (рис. 8, 9)

Озелененные эксплуатируемые кровли и сады, как правило, принадлежат разным владельцам – от муниципалитетов и товариществ собственников до частных лиц, что формирует их социальную доступность (таблица 3).

Таблица 3

Классификация по социальной принадлежности (доступу)

№	Вид социальной доступности	Описание
1	Общественные эксплуатируемые кровли	Общедоступные, многофункциональные территории с высокой рекреационной нагрузкой, что сокращает общую площадь озеленения и требует устойчивости используемого растительного ассортимента (рис. 7)
2	Частные зеленые кровли и террасы	Пентхаусы, виллы, клубные дома (рис. 16–17). Используются растения разных видов в зависимости от потребностей владельца, общего стиля, но с учетом климата, ветровой нагрузки и возможностей ухода, с соблюдением норм проектирования
3	Общественные зеленые террасы	Эксплуатируемые зеленые террасы общественных зданий предназначены для отдыха и оздоровления, с различными видами озеленения, представленными в специальных емкостях и вазонах (рис. 6)
4	Частные озелененные террасы	Эксплуатируемые зеленые террасы в частных владениях украшают исторические и современные сооружения, обогащая городскую среду разнообразными растениями и качественным уходом (рис. 17)

Озелененные кровли и сады становятся доступными как для муниципалитетов, так и для товариществ собственников жилья или частных лиц, что подтверждает их социальную значимость. Более того, такие крыши оказывают влияние не только на улучшение городской среды, но и на решение экологических проблем, связанных с влиянием техносферы. В одном из исследований, проведенных с целью выявления уязвимости городов, было установлено, что биосфера может сыграть ключевую роль в уравновешивании воздействия техносферы и экономики. Например, в ряде европейских стран температура традиционных крыш в летний период может достигать 90°C, в то время как на зеленых крышах она не превышает 50°C, что может существенно снизить тепловое воздействие на окружающую среду. Таким образом, разница в температуре между обычными и озелененными крышами может составлять более 40°C, что делает последние эффективным инструментом в борьбе с перегревом городских территорий.

Зеленые крыши могут варьироваться от газонов до посадки деревьев и кустарников. Введение классификационной функции «интенсивность озеленения» выделяет несколько основных категорий (таблица 4) [9].

https://www.stsg-donstu.ru

Таблица 4

Классификация по интенсивности озеленения

№	Тип зеленой крыши	Характеристики
1	Висячие сады	Высокая плотность, крупные растения, включая деревья и кустарники, создающие впечатление сада на природном ландшафте (рис. 8, 9)
2	Поднебесные оазисы	Занимают верхние этажи или плоские крыши, сосредоточенные в гуще городского пейзажа, с насыщенными посадками различной фактуры. Приближаются к масштабу мини-скверов и общественных пространств (рис. 5)
3	Земные раи	Располагаются на поверхности земли: на крышах подземных сооружений, паркингов, парков и т.п. (рис. 10–12). Используется озеленение с деревьями, кустарниками и цветами, создающее впечатление сада
4	Разреженные ландшафты	Зеленые крыши на искусственных основаниях – разреженные насаждения из газонов, лугов и кустарников (рис. 11). Основная функция – отдых, спорт, транзитное движение. Особенно актуальны для дворов, деловых и торговых комплексов
5	Экстенсивные крыши	Плоские или изогнутые структуры, покрытые одним слоем газонов, почвопокровных или луговых растений. Служат экологическим и эстетическим целям, не предназначены для пребывания (рис. 13)
6	Водные миры	Создаются на искусственных основаниях для улучшения микроклимата. Вода выступает главной темой проекта. Пруды, каскады — водные элементы для микроклимата (рис. 14)

Рис. 4. Детская площадка на кровле на кровле многоэтажного паркинга. Копенгаген (2018 г.) [8]

Рис. 5. Сад на крыше подземного паркинга в Баден-Бадене (2019 г.) [8]

Рис. 6. Террасный дом и зеленые террасы. Арх. Bjarke Ingels Group. Копенгаген (2018 г.) [8]

Рис. 7. Площадь Гарибальди в Милане – зеленая эксплуатируемая кровля (2016 г.) [8]

Рис. 8. Висячий сад. Царское село (18 в, 2017 г.) [8]

Рис. 9. Висячий сад над станцией метро De Sants в Барселоне (2022 г.) [8]

Рис. 10. Наземный парк - парк Зарядье Москва (2021 г.) [8]

Рис. 11. Газоны эксплуатируемой кровли ТЦ на музейной площади Амстердама (2013 г.) [8]

Рис. 12. Площадь Schouwburgplein на кровле паковки. Арх. West 8. Роттердам (2013 г.) [8]

Рис. 13. Зеленая кровля музея современного искусства. Франкфурт-на-Майне (2016 г. [8]

Рис. 14. Водный сад над паркингом. Музей дизайна. Барселона (2022 г.) [8]

Рис. 15. Эскплуатруемая зеленая крыша. Эко-отель. Нормандия (2012 г.) [8]

Рис. 16. Клубная зеленая кровля бизнес-школы Сколково. Моква (2011 г.) [8]

Рис. 17. Частные террасы ”Вертикального леса” Арх. Стефано Бори. Милан (2016 г.) [8]

Среди преимуществ и благотворного воздействия озелененных крыш (таблица 5) можно отметить [10]:

- возможность существенного повышения энергоэффективности зданий, что приведет к сокращению расходов на энергию и оптимизации использования ресурсов;
- эффективные меры по борьбе с городским «тепловым островом» путем уменьшения температуры в городской среде;
- уменьшение уровня шума через использование растительности для поглощения звуковых волн;
- улов дождевой воды, сокращая таким образом нагрузку на городскую систему водоотведения;
- улучшение качества воздуха и снижение загрязненности окружающей среды;
- продление срока службы кровель и сокращение необходимости их замены;

https://www.stsg-donstu.ru

– создание дополнительных зеленых рекреационных пространств для общественного пользования;

– восстановление биоразнообразия городских экосистем и предоставление естественной среды обитания для различных видов животных [12].

Таблица 5

Положительные эффекты использования зеленых крыш [11]

Категория	Преимущество	Собственники / инвесторы	Пользователи / арендаторы	Местное сообщество
Экономические	Повышение энергетической эффективности здания	√√	√√	√
	Снижение нагрузок на системы отопления, вентиляции, кондиционирования	√√	√√	○
	Увеличение стоимости недвижимости	√√	√	○
	Увеличение срока службы кровли	√√	√√	√
	Повышение эффективности использования панелей солнечных батарей	√√	√√	√
	Снижение затрат на создание и обслуживание дренажных систем и ливневой канализации	√√	√√	○
Архитектурно-градостроительные	Повышение эстетической привлекательности городской застройки, улучшение внешнего облика зданий и сооружений	√√	√√	√√
	Улучшение оценок энергоэффективности и экологичности здания	√√	√√	√
Экологические	Снижение эффекта «теплового острова»	○	√√	√√
	Улучшение качества воздуха	○	√√	√√
	Связывание углерода (парниковых газов)	○	√√	√√
	Аккумулирование ливневых стоков	○	√√	√√
	Снижение пиков ливневых стоков	○	√√	√√
	Снижение уровня городского шума	○	√√	√√
	Воссоздание естественной среды	○	○	√√
	Сохранение биоразнообразия в городской черте	○	○	√√
Социальные	Создание новых рабочих мест	√√	○	√√
	Создание новых функциональных и общественных пространств	√√	√√	√√
Социальные	Вовлечение граждан в городское/сельское хозяйство	√	√√	√√
	Возможность для производства продуктов питания	√	√√	√√

√√ — большой эффект
√ — средний эффект
○ — значение эффекта отсутствует или незначительно

Обсуждение и заключение. Внедрение стандартов зеленых крыш представляет собой не просто новый элемент в строительстве, а принципиально иной подход к управлению жизненным циклом зданий. Этот подход включает в себя не только возведение и оснащение объектов, но и обеспечение экологической устойчивости, энергосбережения, а также повышение качества жизни. Однако процесс внедрения зеленых крыш в строительный сектор является длительным и противоречивым, требующим времени для оптимизации и адаптации.

Для успешного и широкого применения зеленых крыш необходима поддержка на законодательном уровне, а также изменение менталитета участников строительного процесса, готовых адаптироваться к новым стандартам и внедрять экологически устойчивые решения. С точки зрения градостроительства, концепция зеленых крыш представляет собой несомненное преимущество для девелоперов и застройщиков, так как она объединяет улучшение внешнего вида и экологических параметров зданий с эффективными технологиями для снижения энергопотребления и сохранения ресурсов. Таким образом, зеленые крыши становятся инновационным решением, которое сочетает функциональность с эстетикой и экологической ответственностью. Стандарты и регулирование в этом контексте играют ключевую роль в обеспечении устойчивости и эффективности таких систем, что делает их важным шагом на пути к созданию городов, более дружественных к окружающей среде и способствующих общественному благосостоянию.

Список литературы/ References

1. Weiler S, Scholz-Barth K *Green Roof Systems: A Guide to the Planning, Design and Construction of Building Over Structure.* NJ: John Wiley & Sons, Inc.; 2009. 320 p. https://doi.org/10.3368/lj.29.1.92

2. Oberdorfer E, Lundholm JT, Bass B, Coffman R Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. *BioScience*. 2007; 57:823–833. https://doi.org/10.1641/B571005

3. Osmundson T *Roof Gardeus: History, Design and Construction.* New York: W.W. Norton; 1999. 318 p.

4. *Classification System Proposed for Green Roofs.* URL: https://phys.org/news/2013-10-classification-green-roofs.html (accessed: 21.04.2025).

5. Киреева Т.В. *Архитектурно-ландшафтное проектирование зеленой эксплуатируемой кровли*. Москва: ТРИУМФ; 2019. 112 с.

Kireeva TV *Architectural and Landscape Design of a Green Exploited Roof.* Moscow: TRIUMPH; 2019. 112 p. (In Russ.)

6. Киреева Т.В. История создания «висячих садов» Рокфеллер центра. *Лесной вестник.* 2018;22(4):18–26. URL: https://les-vest.mf.bmstu.ru/les_vest/2018/4_2018/18-26.pdf (дата обращения: 21.04.2025).

Kireeva TV History of the Creation of the "Hanging Gardens" of the Rockefeller Center. *Forest Bulletin.* 2018;22(4):18–26. (In Russ.) URL: https://les-vest.mf.bmstu.ru/les_vest/2018/4_2018/18-26.pdf (accessed: 21.04.2025).

7. Киреева Т.В. Висячие сады Лондона начала XX века. *Современные наукоемкие технологии.* 2018;5:91–66. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36997 (дата обращения 21.04.2025).

Kireeva TV Hanging Gardens of London at the Beginning of the Twentieth Century. *Modern High-Tech.* 2018;5:91–66. (In Russ.) URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36997 (accessed: 21.04.2025).

8. Киреева Т.В Зеленые кровли Хундертвассера. В: *Материалы XVIII научно-практической конференции «Ландшафтная архитектура».* Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет; 2020. С. 44–47.

Kireeva TV Hundertwasser's Green Roofs. *Proceedings of the XVIII Scientific and Practical Conference "Landscape Architecture".* Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering; 2020. pp. 44–47. (In Russ.)

9. Титова Н.П. *Сады на крышах.* Москва: ОЛМА-ПРЕСС Гранд; 2002. 112 с.

Titova NP *Roof Gardens.* Moscow: OLMA-PRESS Grand; 2002.112 p. (In Russ.)

10. Бочковская М. *Качественная «зеленая крыша» может увеличить стоимость объекта недвижимости на 6–15%.* URL: https://erzrf.ru/publikacii/kachestvennaya-zelenaya-krysha-mozhet-uvelichit-stoimost-obyekta-nedvizhimosti-na-615 (дата обращения 21.04.2025).

Bochkovskaya MA *A High-Quality "Green Roof" Can Increase the Value of a Property by 6-15%.* (In Russ.) URL: https://erzrf.ru/publikacii/kachestvennaya-zelenaya-krysha-mozhet-uvelichit-stoimost-obyekta-nedvizhimosti-na-615 (accessed: 21.04.2025).

11. Ле Корбюзье. Архитектура XX века. Москва: Прогресс; 1977. 303 с.

Le Corbusier. *Architect of the Twentieth Century.* Moscow: Progress; 1977. 303 p. (In Russ.)

12. Горохов В.А. *Зеленая природа города.* Москва: Архитектура-С; 2005. 528 с.

Gorokhov VA *Green Nature of the City.* Moscow: Architecture-C; 2005. 528 p. (In Russ.)

Об авторах:

Светлана Георгиевна Шеина, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой городского строительства и хозяйства Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162), ScopusID, ORCID, rgsu-gsh@mail.ru

Руслан Вадимович Балашев, магистрант кафедры городского строительства и хозяйства Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162), ruslanbalashev33@gmail.com

Роман Джабарович Шахиев, магистрант кафедры городского строительства и хозяйства Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162), romanshahiev@yandex.ru

Шисяо У, аспирант по направлению «Civil Engineering» Шаньдунского транспортного университета (Китайская народная республика, провинция Шаньдун г. Цзинань,), ORCID, 1264950586@qq.com

Заявленный вклад авторов:

Р.В. Балашев: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, подготовка текста, формирование выводов;

С.Г. Шеина: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов;

Р.Д. Шахиев: формирование дополнительной концепции, подготовка текста и формирование выводов;

У Шисяо: подготовка текста.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Svetlana G. Sheina, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Urban Construction and Agriculture, Don State Technical University (162 Sotsialisticheskaya Str., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation) ScopusID, ORCID, rgsu-gsh@mail.ru

Ruslan V. Balashev, Master's student of the Department of Urban Construction and Agriculture at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), ruslanbalashev33@gmail.com

Roman D. Shakhiev, Master's student of the Department of Urban Construction and Agriculture at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), romanshahiev@yandex.ru

W. Shixiao , PhD student in Civil Engineering at Shandong Jiaotong University (People's Republic of China, Shandong Province, Jinan,), ORCID, 1264950586@qq.com

Claimed authorship:

RV Balashev: formation of the basic concept, aims of the study, preparation of the manuscript, formation of the conclusions;

SG Sheina: scientific supervision, analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions;

RD Shakhiev: formation of an additional concept, preparation of the manuscript and formation of the conclusions;

W Shixiao: preparation of the manuscript.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

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

Поступила в редакцию / Received 22.04.2025
Поступила после рецензирования / Reviewed 14.05.2025
Принята к публикации / Accepted 28.05.2025