

Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий

Строительные конструкции,
здания и сооружения

Основания и фундаменты,
подземные сооружения

Строительные материалы
и изделия

Технология и организация строительства

Строительная механика

Градостроительство, планировка сельских
населенных пунктов

Управление жизненным циклом объектов
строительства





Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий

Рецензируемый научно-практический журнал (издается с 2022 года)

eISSN 2949–1835

DOI: 10.23947/2949–1835

Том 3, № 4, 2024

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

30.12.2024





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. 3, no. 4, 2024

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

30.09.2024



Редакционная коллегия

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

заместитель главного редактора, Щербань Евгений Михайлович, кандидат технических наук, доцент, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

выпускающий редактор, Студенникова Светлана Геннадьевна, начальник отдела публикационной активности, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

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

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

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

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

Прокопов Альберт Юрьевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической 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 государственной технической 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);

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

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

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

Беспалов Вадим Игоревич, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической 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 (ВолГТУ) (Волгоград, Российская Федерация);

Товмасын 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. Tolkyimbaev, 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. Bepalov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Колесников А.Г., Иванов А.А. Исследование деформаций прямоугольных плит на упругом основании при частичном его ослаблении 7

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 17

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Аль-Екаби Хаки Хади Аббуд, Прокопов А.Ю., Адоньев Н.А. Анализ влияния устройства свай на устойчивость грунтовых откосов при землетрясениях 30

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Небежко Ю.И., Лапунова К.А. Взаимосвязь эстетических и технологических свойств лицевого керамического кирпича 41

Котляр В.Д. Особенности составов и микроструктуры кладочных растворов башенных комплексов Ингушетии 55

Сапрыкина Т.К., Жаданов В.И. Совершенствование теоретических концепций проектирования составов дисперсно-армированных бетонов 66

Халюшев А.К., Колесниченко Е.К. Влияние окружающей среды на процесс слеживания в многокомпонентных зеленых цементах 74

Турсунов А.С., Турдалиев У.М. Сварочные электроды на основе графитовых материалов 82

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Розанцева Н.В., Дмитриев А.С. Формирование организационно-технологических решений по выполнению строительства быстроборных зданий 87

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

Кулаков Д.С., Карелин Д.В. Критерий Пирсона для оценки количества информационных параметров в виртуальном паспорте 96

Рецензия на монографию «Повышение безопасности металлических конструкций»
(авторы: И.Н. Гарькина, С.В.Клюева, Л.С.Сабитова) 107

CONTENTS

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES

- Kolesnikov AG, Ivanov AA.* Studying Deformations of Rectangular Slabs on the Elastic Base upon Its Partial Weakening 7
- 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 17

FOUNDATIONS AND FOUNDATIONS, UNDERGROUND STRUCTURES

- Haqi Hadi Abbood AE, Prokopov AYU, Adoniev NA.* Analysis of the Effect of Pile Arrangement on Soil Slope Stability during Earthquakes 30

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

- Nebezsko YuI, Lapunova KA.* Interrelation between Aesthetic and Technological Properties of the Face Ceramic Brick 41
- Kotlyar VD.* Compositional and Microstructural Features of Masonry Mortars of Ingushetia Tower Complexes . 55
- Saprykina TK, Zhadanov VI.* Improving Theoretical Concepts of Composition Design of Dispersedly Reinforced Concretes 66
- Khalyushev AK, Kolesnichenko EK.* “Caking” Process in Green Cement Composites under the Impact of Environment 74
- Tursunov AS, Turdaliev UM.* Welding Electrodes on the Basis of the Graphite Materials 82

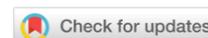
TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

- Rozantseva NV, Dimitriev AS.* Organisational and Technological Solutions for Construction of the Quick-Assembly Buildings 87

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES

- Kulakov DS, Karelin DV.* Pearson Criterion for Assessing the Number of Information Parameters for a Digital Passport..... 97
- Review of the monograph "Improving the safety of metal structures" by I.N. Garkin, S.V. Klyuev, L.S. Sabitov* 107

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



УДК 624.044

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-7-16>

Исследование деформаций прямоугольных плит на упругом основании при частичном его ослаблении



А.Г. Колесников , А.А. Иванов 

Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация

✉ ag-kolesnikov@mail.ru

EDN: KKAWAY

Аннотация

Введение. В современной практике проектирования и строительства плиты, лежащие на упругом основании, широко распространены и представлены в виде фундаментов зданий и сооружений, конструкций дорожных одежд и т.д. Введу различных воздействий, свойства основания со временем может меняться, что неизменно сказывается на напряженно-деформированном состоянии конструкции. Это обуславливает актуальность построения аналитической методики исследования изменения напряжений и прогибов в плитах при ослаблении основания, на которое они оперты.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования были выбраны плиты на упругом основании. Для задания упругого основания использована модель Пастернака (модель с двумя коэффициентами постели). Приведен вывод уравнений, описывающих напряженно-деформированное состояние конструкции, с учетом геометрической нелинейности. Система дифференциальных уравнений решалась при помощи метода Бубнова-Галеркина с использованием аппроксимирующих балочных функций В.З. Власова. Представленная постановка задачи использована для определения напряжений и прогибов плиты. Коэффициент, характеризующий быстроту затухания осадок в глубине основания, задан функцией, позволяющей моделировать различные свойства основания под поверхностью плиты.

Результаты исследования. Результаты прогибов, полученные с помощью аналитических выражений, сравниваются со значениями, полученными в программном комплексе, основанном на методе конечных элементов. Показана возможность моделирования снижения прочностных характеристик или отсутствия основания под частью плиты. Исследованы величины прогибов в различных точках плиты при отсутствии фундамента под частью конструкции на краю или в центре. Приведены данные о максимальном значении основания под частью плиты перед отрывом ее противоположного края, полученные с использованием аналитических выражений.

Обсуждение и заключение. Предложенная постановка задачи может быть использована для анализа прогибов плиты и напряжений, возникающих в её срединной поверхности при изменении несущей способности части грунта основания. Представленное выражение, с помощью которого можно задавать изменение распределения несущих свойств основания, содержит несколько параметров, дающих широкие возможности для моделирования его работы. Даны графики изменения прогибов в различных точках плиты, показывающие возможности определения прогибов в плите на упругом основании при отсутствии его под частью плиты с краю (в центре) или при уменьшении его прочностных характеристик под частью плиты. Приведены значения долей площади отсутствия основания под плитой, при которых не будет происходить отрыв края плиты.

Ключевые слова: плита основания, напряженно-деформированное состояние, упругое основание, напряжение, прогиб конструкции

Для цитирования. Колесников А.Г., Иванов А.А. Исследование деформаций прямоугольных плит на упругом основании при частичном его ослаблении. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(4):7–16. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-7-16>

Studying Deformations of Rectangular Slabs on the Elastic Base upon Its Partial Weakening

Alexander G. Kolesnikov , Andrey A. Ivanov 

Southwest State University, Kursk, Russian Federation

 ag-kolesnikov@mail.ru

Abstract

Introduction. In today designing and construction, slabs laying on an elastic base are widely used as foundations of buildings and structures, road pavements, etc. Due to various impacts, the properties of a base can change over time, which inevitably affects the stress-strain state of a structure. Therefore, development of the analytical method for studying slab stress and deflection changes upon weakening a base the slab lays on is relevant.

Materials and Methods. The slabs on the elastic base were the objects of the research. The elasticity of a base was specified using the Pasternak model with two-bed coefficients. The derivation of the structure stress-strain state equations was presented taking into account the geometric nonlinearity. The system of differential equations was solved by the Bubnov-Galerkin method using approximative V.Z. Vlasov's beam functions. Such statement of a problem served to determine the stresses and deflections of a slab. The ratio determining the rate of fading of settlement deep inside a base was specified by a function enabling modeling various properties of a base beneath a slab.

Results. The results of deflection calculations obtained using the analytical formulas have been compared with the values obtained by means of software based on the finite element method. The possibility to model the decrease of base strength characteristics or base absence beneath a part of a slab has been shown. The values of deflections at various points of a slab in case of absence of the foundation beneath a part of a structure at the edge or in the centre have been investigated. Data obtained using the analytical formulas on the utmost values of a base beneath a part of a slab before its opposite edge begins to raise have been presented.

Discussion and Conclusion. The proposed statement of a problem can be used to investigate slab deflections and stresses occurring in its middle when the bearing capacity of a part of the subfoundation soil changes. The presented formula makes it possible to specify changes in the distribution of the bearing capacities of a base, it has several parameters offering wide opportunities for modeling the behaviour of a base. Graphs of deflection changes at different points of a slab are given, showing the possibilities to determine deflections of a slab on the elastic base upon base absence beneath a part of a slab at the edge (in the centre) or upon decrease in the strength of a base beneath a part of a slab. The size of the areas of base absence beneath a slab which keep the edge of a slab from raising is provided.

Keywords: foundation slab, stress-strain state, elastic base, stress, deflection of a structure

For Citation. Kolesnikov AG, Ivanov AA. Studying Deformations of Rectangular Slabs on the Elastic Base upon Its Partial Weakening. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(4):7–16. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-7-16>

Введение. Прямоугольные плиты на упругом основании нашли широкое применение при строительстве фундаментов зданий и сооружений, оснований дорожных одежд. В процессе эксплуатации может произойти частичное ухудшение несущей способности грунта основания под зданием или сооружением, что влечет за собой разрушение вышестоящих конструкций даже при использовании сплошного фундамента.

В настоящее время исследование плитных конструкций на упругом основании представлено большим количеством авторов, работающих в разных странах.

Применимы к рассматриваемой тематике работы, посвященные решению задач совместной работы конструкции, фундаментной плиты и основания [1–3]. В этих работах приводится анализ балок и плит на упругом основании, что соответствует задаче о плоском деформированном состоянии. Представлена нелинейная зависимость внутренних сил от высоты конструкции.

Известны работы по разработке математических моделей и методов оценки внутренних силовых факторов в многослойных плитах на упругом основании при различных статических нагрузках [4–6]. В этих работах выводится замкнутая система интегро-дифференциальных уравнений, описывающая процесс деформирования в многослойных плитах на упругом основании. Задача сводится к решению бесконечных систем алгебраических уравнений.

Авторами [7] разработана методика расчета фундаментных плит на упругом основании, моделируемом упругим однородным изотропным слоем, под действием внешней нагрузки. Показано, что разнообразие практических задач приводит к неоднозначному моделированию упругого основания.

В статье [8] приводятся численные расчеты с использованием различных моделей грунтового основания, реализованных в программе SCAD на примере каркасно-монолитного дома жилого комплекса. Численный расчет каркасно-монолитного здания выполняется как единая система «здание — фундамент — основание». По результатам аналитических и численных расчетов представлены рекомендации по применимости каждой из рассматриваемых моделей грунтовых оснований.

Представляют интерес в рамках проводимого исследования результаты экспериментального исследования прочности на сдвиг при продавливании и механизма разрушения сплошных и пустотелых двухосных плит под действием сосредоточенной нагрузки, приложенной в центре плиты (построенной на грунтовом основании, действующем в качестве опоры) [9, 10]. Были изучены прочность образцов на сдвиг, механизм разрушения и углы разрушения.

В статьях авторов [11, 12] предложена методика снижения расхода материалов на фундаментные плиты за счет их конструкции. В качестве примера рассмотрено напряженно-деформированное состояние моделей сплошных плит и слоистых плит, взаимодействующих с песчаным основанием. Напряженно-деформированное состояние моделей оценивается по результатам лабораторных экспериментов с измерением деформаций и по данным численных расчетов методом конечных элементов.

В статьях [13–15] проводится анализ чувствительности фундаментной плиты, опирающейся на слоистое упругое полупространство. Анализ проводился с использованием аппроксимационного метода поверхности отклика для максимально допустимого отклонения согласно второму предельному состоянию.

В актуальных работах [16–19] железобетонные плиты на упругом основании исследуются с помощью аналитического решения, основанного на двойном синусоидальном ряде Фурье. Решение сравнивается с результатами, полученными в программном комплексе, основанном на методе конечных элементов.

Выполнив анализ современных работ в области изучения напряженно-деформированного состояния плит на упругом основании и принимая во внимание распространенность таких конструкций, можно сделать вывод о том, исследование изменения напряжений и прогибов плит при ослаблении основания является актуальной тематикой. В качестве основных задач исследования можно выделить разработку аналитической методики определения напряжений и прогибов плит на упругом основании, сравнение результатов с данными, получаемыми с помощью программных комплексов, основанных на методе конечных элементов, рассмотрение конкретных задач с изменением прочностных характеристик основания под частью конструкции.

Материалы и методы. Для исследования напряженно-деформированного состояния зададимся системой уравнений, которая описывает прямоугольную плиту на упругом основании [20, 21]:

$$\begin{cases} \frac{1}{Eh} \nabla^2 \nabla^2 \varphi + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 = 0; \\ D \nabla^2 \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = Z + 2t \nabla^2 w - kw, \end{cases} \quad (1)$$

где φ — функция напряжений; w — функция прогибов; $F = F(x, y)$ — функция срединной поверхности; Z — функция нагрузки; k — характеристика, определяющая работу упругого основания на сжатие; t — характеристика, определяющая работу упругого основания на сдвиг.

Параметры k и t могут быть найдены из соотношений:

$$k = \frac{E_0}{1 - \nu_0} \int_0^H \Psi'^2 dz, \quad (2)$$

$$t = \frac{E_0}{4(1 - \nu_0)} \int_0^H \Psi^2 dz, \quad (3)$$

$$E_0 = \frac{E_s}{1 - \nu_s}, \nu_0 = \frac{\nu_s}{1 - \nu_s}, \quad (4)$$

где E_s и ν_s — соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона основания; H — толщина основания; $\Psi(z)$ — функция поперечного распределения перемещений.

Функция поперечного распределения перемещений выбрана в следующем виде [21]:

$$\Psi(z) = \frac{\operatorname{sh} \gamma \frac{H-z}{a}}{\operatorname{sh} \gamma \frac{H}{a}}. \quad (5)$$

Напряженно-деформированное состояние рассматриваемой конструкции определяется прежде всего значениями напряжений и перемещений. Эквивалентные напряжения в плите на упругом основании отыскиваются по четвертой гипотезе напряжений. Коэффициент напряжений можно описать уравнением [20]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}[(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_1)^2 + (\bar{\sigma}_3 - \bar{\sigma}_1)^2 + (\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_1)^2]}. \quad (6)$$

$$\bar{\sigma}_1 = \left| \frac{6}{\tau} \overline{DB} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} Z_x Z_y + \nu \frac{\partial^2}{\partial y^2} Z_x Z_y \right) \right| + \left| \overline{A} \frac{\partial^2}{\partial y^2} Z_x Z_y \tau \right| + \left| \frac{g}{\tau^2} \overline{DB} \left(\frac{\partial^3}{\partial x^3} Z_x Z_y + \frac{\partial}{\partial x} Z_x \frac{\partial^2}{\partial y^2} Z_y \right) \right|, \quad (7)$$

$$\bar{\sigma}_2 = \left| \frac{6}{\tau} \overline{DB} \left(\nu \frac{\partial^2}{\partial x^2} Z_x Z_y + \frac{\partial^2}{\partial y^2} Z_x Z_y \right) \right| + \left| \overline{A} \frac{\partial^2}{\partial x^2} Z_x Z_y \tau \right| + \left| \frac{g}{\tau^2} \overline{DB} \left(\frac{\partial^3}{\partial y^3} Z_x Z_y + \frac{\partial}{\partial y} Z_y \frac{\partial^2}{\partial x^2} Z_x \right) \right|, \quad (8)$$

$$\bar{\sigma}_3 = \left| \frac{6}{\tau} (1 - \nu) \overline{DB} \frac{\partial}{\partial x} Z_x \frac{\partial}{\partial y} Z_y \right| + \left| \overline{A} \frac{\partial}{\partial x} Z_x \frac{\partial}{\partial y} Z_y \tau \right|. \quad (9)$$

$$\overline{D} = \frac{D}{Eh^3}, \quad D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}, \quad (10)$$

$$\overline{A} = \frac{A \cdot a^2}{Ef_0^5}, \quad \overline{B} = \frac{B \cdot a^2}{f_0^3}, \quad g = \frac{f_0}{a}; \quad \tau = \frac{h}{a}, \quad (11)$$

где h — толщина конструкции фундамента в виде полой оболочки; E — модуль упругости материала; ν — коэффициент Пуассона; A, B — неизвестные метода Бубнова-Галеркина.

Прогиб любой точки плиты на упругом основании можно получить с помощью выражения:

$$\Delta = B \cdot Z_x \cdot Z_y, \quad (12)$$

где Z_x, Z_y — балочные функции В.З. Власова [22]:

$$Z_x = \frac{qa^4}{24EJ} \left(-\frac{m_a + m_b}{2} + 5 + \frac{m_a - m_b}{6} \frac{x}{a} + \left(\frac{m_a - m_b}{2} - 6 \right) \frac{x^2}{a^2} - \frac{m_a - m_b}{6} \frac{x^3}{a^3} + \frac{x^4}{a^4} \right); \quad (13)$$

$$Z_y = \frac{qb^4}{24EJ} \left(-\frac{m_a + m_b}{2} + 5 + \frac{m_a - m_b}{6} \frac{y}{b} + \left(\frac{m_a - m_b}{2} - 6 \right) \frac{y^2}{b^2} - \frac{m_a - m_b}{6} \frac{y^3}{b^3} + \frac{y^4}{b^4} \right);$$

Величины m_a, m_b — постоянные коэффициенты, представляющие собой отношения опорных моментов шарнирно опертой балки, нагруженной интенсивностью q , к опорным моментам жестко защемленной с двух сторон балки такого же нагружения [23].

В выражении (12) для определения прогибов неизвестные метода Бубнова-Галеркина могут быть найдены из соотношений:

$$B = \frac{1}{6C_1} \left(36C_3C_2C_1 + 108qC_1^2 - 8C_2^3 + 12\sqrt{3}(4C_3^3C_1 - C_3^2C_2^2 + 18C_3C_2C_1q + \right. \\ \left. + 27q^2C_1^2 - 4qC_2^3)^{1/2}C_1 \right)^{1/3} - \frac{2}{3} (3C_3C_1 - C_2^2) / (C_1(36C_3C_2C_1 + 108qC_1^2 - \\ - 8C_2^3 + 12\sqrt{3}(4C_3^3C_1 - C_3^2C_2^2 + 18C_3C_2C_1q + 27q^2C_1^2 - 4qC_2^3)^{1/2}C_1) - \frac{1}{3} \frac{C_2}{C_3}). \quad (14)$$

$$A = -\frac{1}{J_1} (BJ_2 + B^2J_3). \quad (15)$$

Коэффициенты, входящие в уравнения для определения неизвестных метода Бубнова-Галеркина:

$$C_1 = 2Eh \frac{J_2}{J_1J_3}, \quad C_2 = \frac{J_4}{J_3}, \quad C_3 = D \frac{J_1}{J_3} - \frac{J_5}{J_3}. \quad (16)$$

$$J_1 = \int_{-a}^a \int_{-b}^b (\nabla^2 \nabla^2 \bar{w}) \bar{w} dx dy, \quad J_2 = \int_{-a}^a \int_{-b}^b (\Delta \bar{w}) \bar{w} dx dy, \quad (17)$$

$$J_3 = \int_{-a}^a \int_{-b}^b Z \bar{w} dx dy, \quad J_4 = \int_{-a}^a \int_{-b}^b (2t \nabla^2 \bar{w}) \bar{w} dx dy, \quad J_5 = \int_{-a}^a \int_{-b}^b (k \bar{w}) \bar{w} dx dy.$$

Коэффициент γ может быть представлен в виде функции, задающей различную скорость затухания осадок под поверхностью плиты. Например, может быть использована функция:

$$\gamma(x, y) = \gamma_{min} \left(1 + s \left(\frac{(x + m)}{a} \right)^{2\theta} \right) \times \left(1 + l \left(\frac{(y + n)}{b} \right)^{2\eta} \right), \quad (18)$$

где γ_{min} — минимальное значение коэффициента, характеризующего быстроту затухания осадок в глубине основания под плитой; s, m, l, n, η, θ — коэффициенты, характеризующие форму изменения коэффициента, характеризующего быстроту затухания осадок в глубине основания под поверхностью плиты [21, 23].

Представленные выражения для определения напряжений (6) и прогибов (12) позволяют отыскать их для различных условий закрепления плиты. Входящее в них выражение, задающее различную скорость затухания осадок под поверхностью плиты, позволяет моделировать широкий спектр свойств упругого основания.

Результаты исследования. Рассмотрим изменение прогибов прямоугольной плиты на упругом основании при уменьшении прочностных характеристик грунта под частью конструкции.

Для проверки корректности результатов, получаемых по выражению (12), зададимся некоторыми значениями: рассмотрим железобетонную плиту толщиной 40 см, размерами в плане 12×8 м, загруженную равномерно распределенной нагрузкой 55 кН/м². Так как плита была закружена равномерно и характеристики основания постоянны, получим лишь вертикальные перемещения.

Результаты определения прогибов плиты, полученных с помощью выражения (12) приведены в таблице 1. Здесь же представлены результаты прогибов, полученных в программном комплексе, основанном на методе конечных элементов.

Таблица 1

Сравнение результатов прогибов плиты

Результаты прогибов, мм	По выражению (12)	В программном комплексе SCAD Office
		0,56

Проведем исследования изменения напряженно-деформированного состояния плиты при изменении свойств упругого состояния.

Определим, как изменятся перемещения при отсутствии основания под частью плиты. Рассмотрим два варианта: ослабление основания под одним из краев плиты, ослабление основания под центральной частью плиты.

Будем последовательно убирать часть основания под краем плиты в следующей последовательности: 1/12, 1/6, 1/4, 1/3 от большего размера плиты в плане (рис. 1).

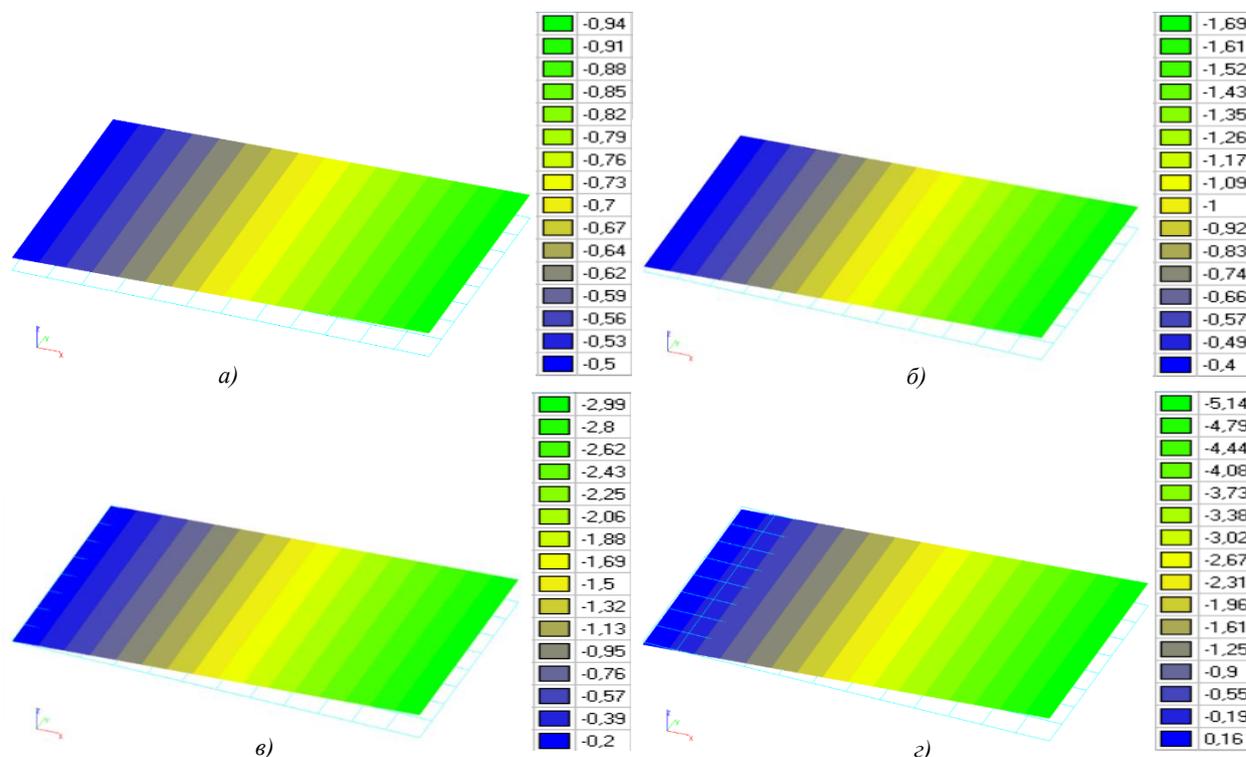


Рис. 1. Изменение перемещений вдоль оси z (мм) в зависимости от несущей способности грунта. Доля большего размера в плане плиты, под которой отсутствует основание с одного из краев: а — 1/12; б — 1/6; в — 1/4; z — 1/3

Из рис. 1 видно, что при превышении ослабления основания под одним из краев плиты более, чем на 1/4 от большего размера в плане, происходит отрыв противоположного края плиты.

Рассмотрим второй вариант — ослабление основания под центральной частью плиты. Будем убирать часть основания под плитой в следующей последовательности: 1/6, 1/3, 1/2 от большего размера плиты в плане (рис. 2).

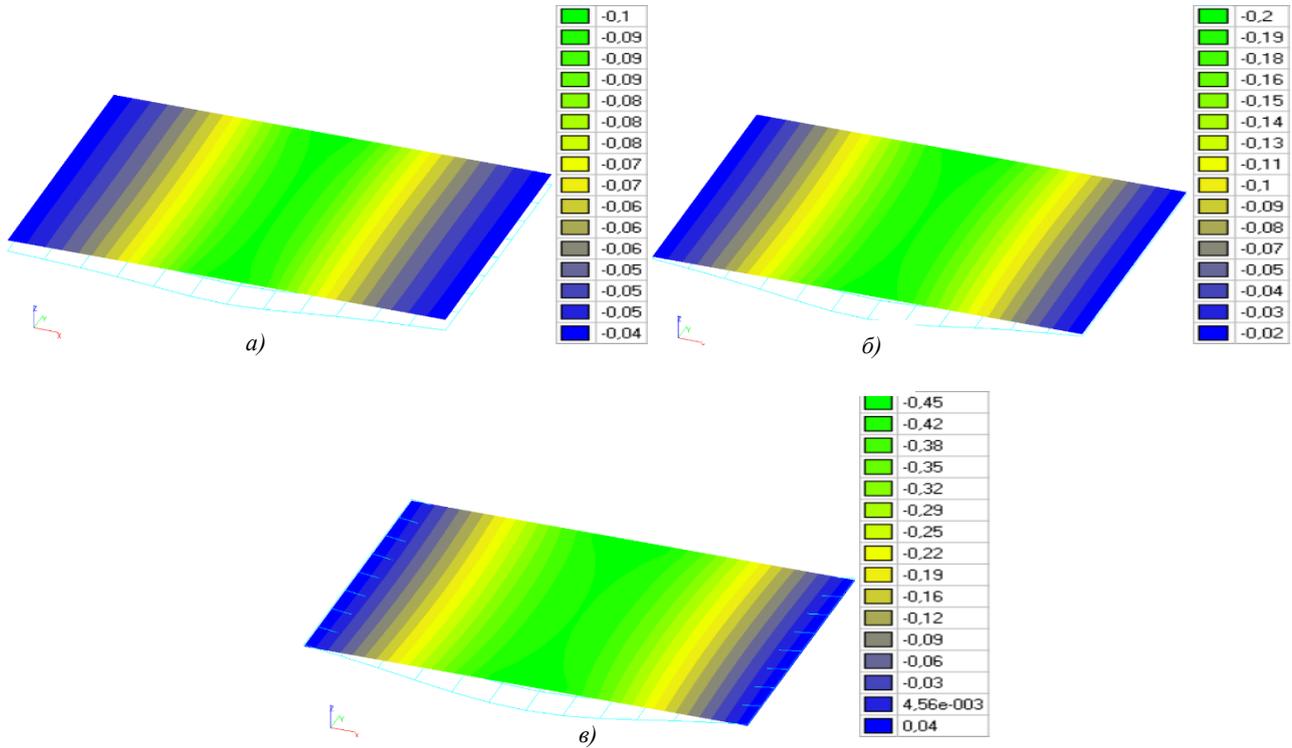


Рис. 2. Изменение перемещений вдоль оси z (мм) в зависимости от несущей способности грунта. Доля большего размера в плане плиты, под которой отсутствует основание в центре: а — 1/6; б — 1/3; в — 1/2

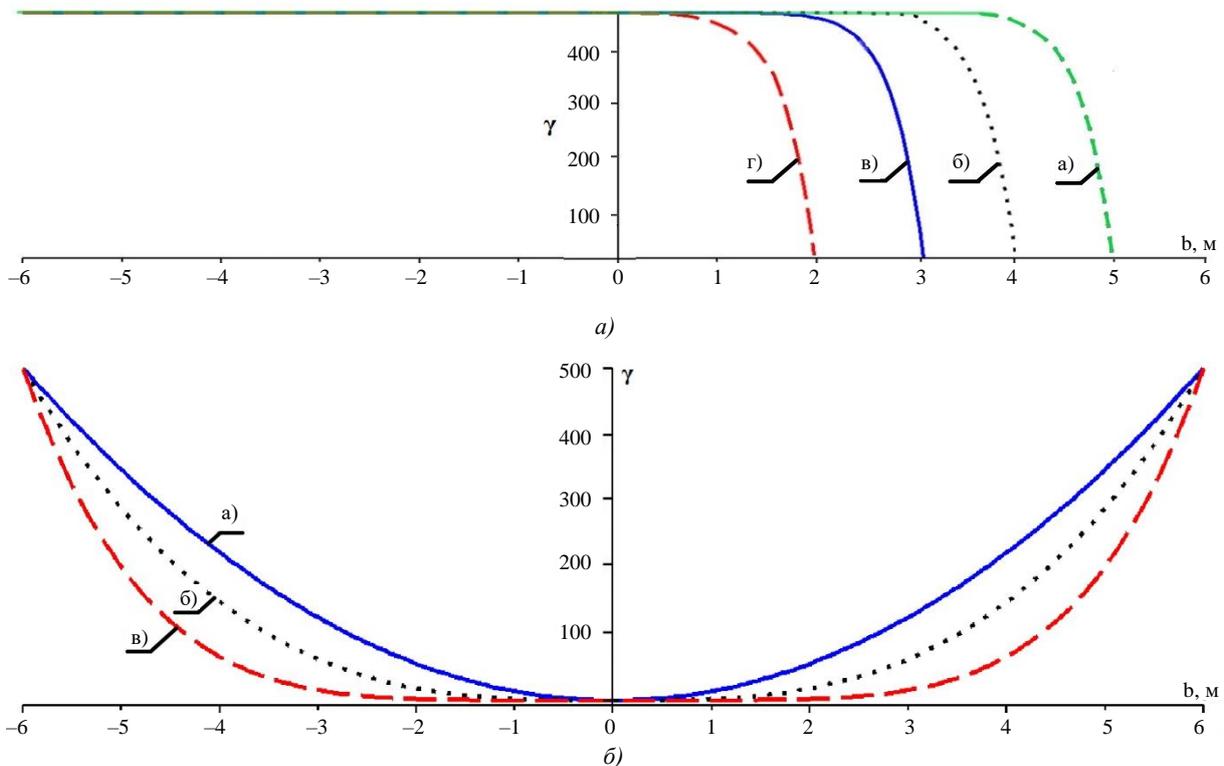


Рис. 3. Формы ослабления основания под плитой при различных значениях переменных, входящих в выражение (18): а — основание под плитой при его ослаблении на краю на а) 1/12, б) 1/6, в) 1/4 г) 1/3 от большего размера в плане; б — основание под плитой при его ослаблении его в центре на а) 1/6, б) 1/3, в) 1/2 от большего размера в плане

Из рис. 2 видно, что при превышении ослабления основания под центральной частью плиты более, чем на 1/2 от большего размера в плане, происходит отрыв краев плиты.

Найдем значение максимального размера участка отсутствия основания под плитой без отрыва её противоположного края для обоих вариантов задачи. Для этого проведем исследование изменения прогибов оболочки с помощью выражения (12). Здесь характеристики основания будут задаваться с помощью функции (18). Для того, чтобы получить ослабление основания на 1/12, 1/6, 1/4, 1/3 от большего размера в плане под краем плиты, зададим следующие значения переменных, входящих в выражение (12) (рис. 3 а): а) 1/12: $\eta = 10, l = -0,3, n = 1,3$; б) 1/6: $\eta = 10, l = -0,3, n = 2$; в) 1/4: $\eta = 10, l = -0,3, n = 3,1$; г) 1/3: $\eta = 10, l = -0,3, n = 4,3$. Для того, чтобы получить ослабление основания в центре на 1/6, 1/3, 1/2 от большего размера в плане под краем плиты, зададим следующие значения переменных, входящих в выражение (12) (рис. 3 б): а) 1/6: $\eta = 1, l = 0,004, n = 0$; б) 1/3: $\eta = 1,5, l = 0,004, n = 0$; в) $\eta = 2,5, l = 0,004, n = 0$.

Смоделируем прогиб вдоль большего размера в плане для плиты с заданными размерами с помощью выражения (12) для случая отсутствия основания под краем плиты (рис. 4 а) и под центральной частью плиты (рис. 4 б).

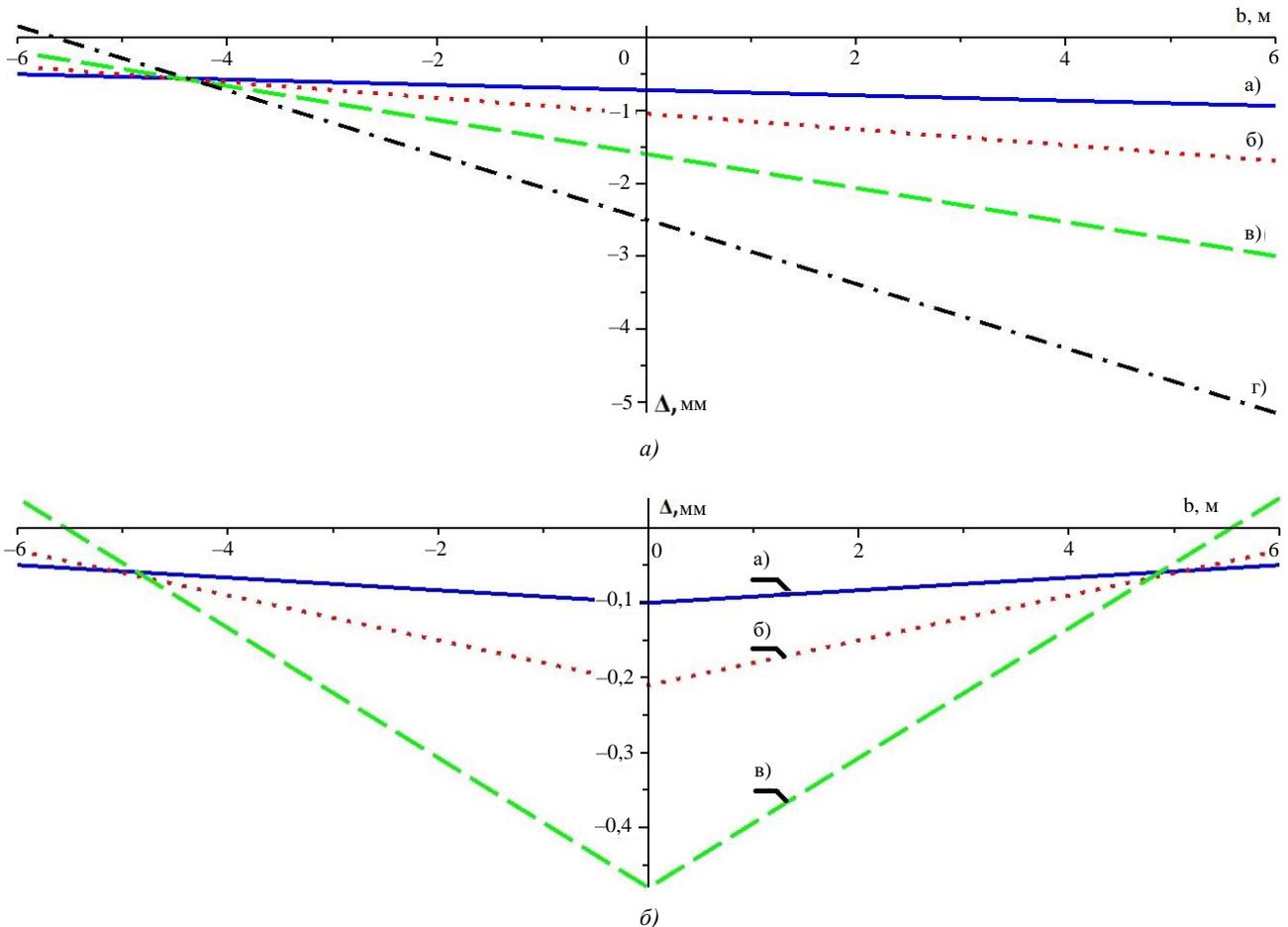


Рис. 4. Изменение перемещений вдоль большего размера в плане плиты в зависимости от несущей способности грунта: а — основание под плитой при его ослаблении на краю на а) 1/12, б) 1/6, в) 1/4 г) 1/3 от большего размера в плане; б — основание под плитой при его ослаблении в центре на а) 1/6, б) 1/3, в) 1/2 от большего размера в плане

Из рис. 4 видно, что результаты, полученные с помощью выражения (12), аналогичны полученным с помощью программного комплекса, основанного на методе конечных элементов (рис. 1). При отсутствии основания более чем под 1/4 от большего размера в плане с краю происходит отрыв противоположного края плиты. При отсутствии основания более чем под 1/2 от большего размера в плане в центре происходит отрыв краев плиты.

Построим зависимость прогиба края плиты, противоположного тому, под которым происходит ослабление основания, от параметра n , входящего в выражение (18) и влияющего на долю ослабления основания (рис. 5 а), и зависимость прогиба края плиты от параметра η , входящего в выражение (18) и влияющего на долю ослабления основания (рис. 5 б).

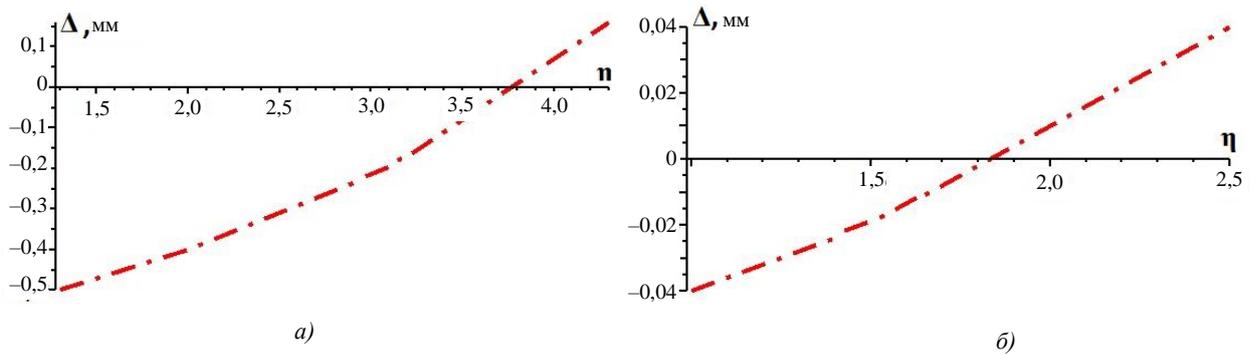


Рис. 5. Зависимость: а — прогиба края плиты, противоположного тому, под которым происходит ослабление основания, от степени его ослабления; б — прогиба края плиты от степени его ослабления в центре

Из рис. 5 видно, что отрыв края плиты, противоположного тому, под которым происходит ослабление основания, происходит при значении параметра $n = 3,6$. Это соответствует $0,4b$ (большого размера в плане). При ослаблении основания в центре отрыв края плиты происходит при значении параметра $\eta = 1,8$.

Выражение для задания свойств основания (18) позволяет моделировать гибкое изменение несущей способности грунта под плитой и получать точные значения прогибов (12) и напряжений (6).

Обсуждение и заключение. Предложенная постановка задачи определения напряжений и прогибов в плитах на упругом основании позволяет проводить исследования их величин при изменении характеристик основания. Использование в выражении для напряжений и прогибов функции, задающей различную скорость затухания осадок под поверхностью плиты позволило моделировать изменение характеристик основания и его отсутствие под частью конструкции. При этом, тестовые примеры показали хорошую сходимость с результатами, полученными с помощью программного комплекса, основанного на методе конечных элементов.

Проведенные исследования поведения конструкции при отсутствии основания под краем плиты или под её центральной частью показало их предельные значения для предотвращения отрыва края плиты, что весьма важно для инженерных расчетов.

Постановка задачи определения напряжений и прогибов и использование метода Бубнова-Галеркина для решения системы уравнений, описывающих напряженно-деформированное состояние конструкции, позволит в дальнейшем решать рассмотренные задачи для более сложных конструкций, имеющих кривизну.

Список литературы / References

1. Mirsaidov MM, Mamasoliev K. Contact Interaction of Multilayer Slabs with an Inhomogeneous Base. *Magazine of Civil Engineering*. 2022;115(7):11504. <https://doi.org/10.34910/MCE.115.4>
2. Barmenkova EV, Matveeva AV. Calculation of Plates of Variable Rigidity on Elastic Foundation with Variable Coefficient of Subgrade Reaction. *Procedia Engineering*. 2015;111:97–102. <https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2015.07.058>
3. Yelce TU, Balci E, Bezgin NÖ. A Discussion on the Beam on Elastic Foundation Theory. *Challenge*. 2023;9(1):34–47. <https://doi.org/10.20528/cjsmec.2023.01.004>
4. Wstawska I, Magnucki K, Kędzia P. Stability of Three-Layered Beam on Elastic Foundation. *Thin-Walled Structures*. 2022;175(6):109208. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109208>
5. Mirsaidov M, Mamasoliev Q. Contact Problems of Multilayer Slabs Interaction on an Elastic Foundation. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Energetics, Civil and Agricultural Engineering, October 14–16, 2020, Tashkent, Uzbekistan. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 614*. Tashkent: IOP Science; 2020; 012089. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012089>
6. Коробко А.В., Прокуров М.Ю. Аппроксимация прогибов пластинок, лежащих на винклеровом основании. *Строительство и реконструкция*. 2024;(1(111)):30–37. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2024-111-1-30-37>
7. Korobko AV, Prokurov MYu. Approximation of Deflections of Plates Lying on Winkler Base. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya (Building and Reconstruction)*. 2024;(1(111)):30–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2024-111-1-30-37>
7. Bosakov SV, Kozunova O. Calculation of Foundation Mesh Slabs on an Elastic Layer. *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete*. 2020;12:11–27. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2020-12-01>

8. Lukyanov AI, Tufanov VA. Selection of the Ground Base Model Implemented in the SCAD Office. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named after V.G. Shukhov*. 2021;6(1):29–37. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-1-29-37>
9. Azizian H, Lotfollahi-Yaghin MA, Behraves A. Punching Shear Strength of Voided Slabs on the Elastic Bases. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2021;45:2437–2449. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00546-y>
10. Koktan J, Cajka R, Brozovsky J. Finite Element Analysis of Foundation Slabs Using Numerical Integration of Boussinesq Solution. In: *Proceedings of the International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2017). September 25–30, 2017. Thessaloniki, Greece. Vol. 1978(1)*. Thessaloniki: AIP Publishing; 2018. 150013. <https://doi.org/10.1063/1.5043804>
11. Ikonin SV, Sukhoterina AV. The Effect of Design on Interaction of Foundation Slabs with the Base. *Magazine of Civil Engineering*. 2019;(89(5)):141–155. <https://doi.org/10.18720/MCE.89.12>
12. Serpik IN, Tarasova NV. Optimisation of Steel Trusses with a Choice of Multi-Stage Prestressing Conditions. *Magazine of Civil Engineering*. 2020;(97(5)):9705. <https://doi.org/10.18720/MCE.97.5>
13. Dutta AK, Mandal JJ, Bandyopadhyay D. Application of Quintic Displacement Function in Static Analysis of Deep Beams on Elastic Foundation. *Architecture, Structures and Construction*. 2022;2:257–267. <https://doi.org/10.1007/s44150-022-00055-8>
14. Черников А.В., Козлов В.А. Определение напряженно-деформированного состояния гофрированных водопропускных труб с эксплуатационными дефектами на основе полубезмоментной теории оболочек. *Строительная механика и конструкции*. 2021;2(29):12–28. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46130661> (дата обращения: 05.08.2024).
- Chernikov AV, Kozlov VA. Determination of the Mode of Deformation of Corrugated Water Pipes with Operating Defects Based on Semi-Terminal Shell Theory. *Structural Mechanics and Structures*. 2021;(2(29)):12–28. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46130661> (accessed: 05.08.2024).
15. Трещев А.А. О механических испытаниях тонкостенных цилиндрических оболочек из композитных материалов. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023;7:90–97. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-7-90-91>
- Treshchev AA. About Mechanical Tests of Thin-Walled Cylindrical Shells Made of Composite Materials. *Izvestiya Tula State University*. 2023;7:90–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-7-90-91>
16. Ye Y, Wei S, Cai D, Yang J, Wei P, Yue C, et al. Calculation Method for Internal Force and Deformation of the Prestressed I-Beam on the Elastic Foundation. *Frontiers in Earth Science*. 2022;10 <https://doi.org/10.3389/feart.2022.996876>
17. Madenci E, Guven I. *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS*. Springer; 2015. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7550-8>
18. Попов А.О., Сабитов Л.С., Языев Б.М., Айменов Ж.Т. Моделирование дополнительной осадки зданий и сооружений при утрате оголовков свай. *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2023;15(4(60)):21–33.
- Popov AO, Sabitov LS, Yaziev BM, Aimenov ZhT. Modeling of Additional Precipitation of Buildings and Structures in Case of Loss of Pile Heads. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta (Bulletin of Kazan State Power Engineering University)*. 2023;15(4(60)):21–33.
19. Панасюк Л.Н., Тюрина В.С., Савельева Н.А., Чубка Ю.Ш. Динамическая реакция в системе «дорожная конструкция — оползневой склон» от движения транспорта. *Инженерный вестник Дона*. 2018;(4(51)):245. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5376> (дата обращения: 05.08.2024).
- Panasyuk LN, Tyurina VS, Savelyeva NA, Chubka YuS. Dynamic Response in the System “Road Structure – Landslide Slope” from Traffic. *Engineering Journal of Don*. 2018;(4(51)):245. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5376> (accessed: 05.08.2024).
20. Kolesnikov A, Stupishin L. Investigation of the Operation of Foundations in the Form of Shallow Shells on an Elastic Foundation. In: *Proceedings of the XV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2022”. INTERAGROMASH 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol 574*. Beskopylny A, Shamtsyan M, Artiukh V (Eds). Cham: Springer; 2023. P. 2291–2300. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21432-5_250
21. Kolesnikov AG., Tolmacheva T. Ways to Minimize Volume (Weight) and Increase the Bearing Capacity of Rigid Pavement. *Civil Engineering Journal*. 2019;5(11):2495–2501. <http://doi.org/10.28991/cej-2019-03091427>
22. Власов В.З. *Избранные труды. Часть 2*. М.: Академия Наук СССР; 1963. 508 с.
- Vlasov VZ. *Selected Works. Part 2*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR; 1963. 508 p. (In Russ.)

23. Колесников А.Г., Иванов А.А. Напряженно-деформированное состояние пологой оболочки на упругом основании с переменными прочностными характеристиками. *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2023;27(3):21–33. <http://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-21-33>

Kolesnikov AG, Ivanov AA. Stress-Strain State of Shallow Shell in an Elastic Foundation with Variable Strength Characteristics. *Proceedings of Southwest State University*. 2023;27(3):21–33. (In Russ.) <http://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-21-33>

Об авторах:

Александр Георгиевич Колесников, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой уникальных зданий и сооружений Юго-Западного государственного университета (305040, Российская Федерация, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), ag-kolesnikov@mail.ru

Андрей Александрович Иванов, аспирант кафедры уникальных зданий и сооружений Юго-Западного государственного университета (305040, Российская Федерация, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), [ORCID](#), andrey5912@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

А.А. Иванов: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

А.Г. Колесников: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Alexander G. Kolesnikov, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Unique Buildings and Structures Department, Southwest State University (94, 50 Let Oktyabrya Str., Kursk, 305040, Russian Federation), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), ag-kolesnikov@mail.ru

Andrey A. Ivanov, Postgraduate Student of the Unique Buildings and Structures Department, Southwest State University (94, 50 Let Oktyabrya Str., Kursk, 305040, Russian Federation), [ORCID](#), andrey5912@gmail.com

Claimed Contributorship:

AG Kolesnikov: scientific supervision, analysis of research results, refining the text, correcting the conclusions.

AA Ivanov: formulating the main concept, aim and objectives of the research, making calculations, preparing the text, formulating the conclusions.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 20.09.2024

Поступила после рецензирования / Revised 15.10.2024

Принята к публикации / Accepted 29.10.2024

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 699.841

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-17-29>

Учет нормативных требований при расчете конструкций жизнесберегающих зданий на сейсмические воздействия



EDN: CDWJUJ

Х.Н. Мажиев¹  , К.Х. Мажиев² , Ю.В. Панасенко³ , А.Х. Мажиева⁴ ,
А.Х. Мажиев¹ , А.Х. Мажиев⁵ 

¹Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика

М.Д. Миллионщикова, Академия наук Чеченской Республики, Российская Федерация, г. Грозный

²Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, Российская Федерация, г. Грозный

³Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени В.А. Кучеренко

АО «НИЦ «Строительство», Российская Федерация, г. Москва

⁴Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, Российская Федерация, г. Грозный

⁵Академия наук Чеченской Республики, Российская Федерация, г. Грозный

 seismofund@mail.ru

Аннотация

Введение. Научная проблема состоит в обеспечении сейсмостойкости зданий посредством оптимизации конструктивных решений, выборе расчетных моделей и разработке методики, учитывающей нелинейность работы несущих конструкций при воздействии проектных и контрольных землетрясений. С целью учета нормативных требований при расчете конструкций жизнесберегающих зданий на сейсмические воздействия выполнены нелинейные расчеты конструкций при интенсивных сейсмических воздействиях.

Материалы и методы. Расчеты проводились аналитическим методом и методом конечных элементов в программных комплексах «STARK ES» и «ЛИРА-САПР».

Результаты исследования. Получены сравнительные результаты расчетов динамической модели рассматриваемого многоэтажного здания при горизонтальном поступательном динамическом воздействии, осуществленном с применением собственных форм в линейной постановке. Наряду с этим показаны результаты динамического расчета при основных и особых сочетаниях нагрузок и соответствующих сочетаниях внутренних усилий в рассматриваемых конструкциях многоэтажного здания с сейсмоизоляцией, возводимого в г. Грозный.

Обсуждение и заключение. Получены критерии, которые позволяют проводить отбор существенных и исключение малозначимых форм собственных колебаний при осуществлении сейсмического расчета конструкций с отдельными нелинейностями. Результаты расчета показали, что обеспечивается требуемая несущая способность многоэтажного здания при рассматриваемой расчетной ситуации.

Ключевые слова: сейсмозащита, сейсмоизоляция, сейсмическое воздействие, расчет, жизнесберегающие здания, нелинейность, колебания

Для цитирования. 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>

Adhering to Regulatory Requirements in Calculation of Earthquake Resistance of the Structures of Life-Saving Buildings

Khasan N. Mazhiev¹ , Kazbek Kh. Mazhiev² , Yuri V. Panasenko³ , Amina Kh. Mazhieva⁴ ,
Aslan Kh. Mazhiev¹ , Adam Kh. Mazhiev⁵ 

¹Grozny State Oil Technical University Named after Academician M.D. Millionshchikov, Academy of Sciences of the Chechen Republic, Grozny, Russian Federation

²Grozny State Oil Technical University Named after Academician M.D. Millionshchikov, Complex Institute of the Russian Academy of Sciences Named after Kh. Ibragimov, Grozny, Russian Federation

³JSC Research Center of Construction, Central Research Institute of Building Constructions Named after V.A. Koucherenko, Moscow, Russian Federation

⁴Grozny State Oil Technical University Named after Academician M.D. Millionshchikov, Grozny, Russian Federation

⁵Academy of Sciences of the Chechen Republic, Grozny, Russian Federation

✉ seismofund@mail.ru

Abstract

Introduction. The scientific problem lies in ensuring earthquake resistance of the buildings by optimizing design solutions, selecting the computational models and developing a methodology, which takes into account the nonlinear behaviour of the load bearing structures under the action of design-earthquakes and reference-earthquakes. For adhering to regulatory requirements in calculation of earthquake resistance of the structures of life-saving buildings, the nonlinear calculations of structures' behaviour under intense seismic actions were made.

Materials and Methods. The calculations were made by the analytical method and the finite element method using the “STARK ES” and “LIRA-SAPR” software.

Results. The comparative computation results of the estimated multi-storey building dynamic model subject to the horizontal progressive dynamic action with the use of eigenforms in a linear formulation have been obtained. In addition, the results of dynamic calculation under the main and special combination of loads and corresponding combination of internal forces performed for the estimated structures of a multi-storey building with seismic isolation constructed in Grozny have been presented.

Discussion and Conclusion. The criteria for selecting the significant and excluding the insignificant forms of natural oscillations when performing the earthquake resistance calculations of structures with certain nonlinearities have been determined. The calculation results have demonstrated achievement of the required bearing capacity of a multi-storey building in the given calculation conditions.

Keywords: seismic protection, seismic isolation, seismic action, calculation, life-saving buildings, nonlinearity, oscillations

For Citation. 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. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-17-29>

Введение. В работе показываются способы реализации существующих положений СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах» (актуализированная редакция СНиП II–7–81*) по проведению расчета сооружений, оборудованных различными сейсмоизолирующими и сейсмозащитными устройствами, при динамических воздействиях, которые в тексте свода правил недостаточно полно освещены, и поэтому могут быть различными. Представлены способы учета этих указаний, использованные при реализации различных методик в программных комплексах «ЛИРА-САПР» и «STARK ES».

Основные положения СП 14.13330.2018, касающиеся расчета конструкций многоэтажного здания при динамических воздействиях, дают возможность инженеру применить практически любую методику их выполнения. Нами предлагаются некоторые варианты методик, значительно сокращающих время на проектирование многоэтажных зданий [1–16].

Материалы и методы. С целью учета положения СП 14.13330.2018 о необходимости выполнения нелинейного динамического расчета конструкций при сейсмическом воздействии в расчетных комплексах «ЛИРА-САПР» и «STARK ES» с использованием предлагаемых методик реализованы нелинейные расчеты конструкций на воздействия проектного (ПЗ) и контрольного (КЗ) землетрясений.

В качестве объекта исследования рассматривается 33-х этажное здание с двумя этажами, находящимися ниже планировочных отметок земли, которое имеет в плане квадратную форму, с размерами в осях — 26,0×26,0 м.

Высота 1-го этажа — 3,92 м. Высота 2-го этажа — 3,91 м. Высота 3-го и 4-го этажей — 4,5 м. Высота типовых этажей — 3,1 м. Высота последнего 33-го этажа — 3,7 м. Высота технического этажа — 2,05 м.

Конструктив здания состоит из монолитных железобетонных колонн, балок, фундаментной плиты, плит перекрытий и покрытий, лестниц и сборных трубобетонных сейсмоизолирующих опор (на основе патента № 2477353 «Трубобетонная сейсмоизолирующая опора»).

Различные подходы к вопросу учета работы неупруго-деформированных сейсмоизолирующих конструкций при динамическом расчете приведены в работах [11, 12].

Для расчета физической и аналитической моделей зданий применялись расчетные комплексы «ЛИРА-САПР» и «STARK ES» [2, 14, 15]. Расчеты проводились аналитическим методом и методом конечных элементов.

Указание о необходимости проведения нелинейного расчета конструкций зданий и сооружений при динамическом воздействии землетрясений уровня «КЗ» (контрольное землетрясение) содержится в СП 14.13330.2018. Разновидностью таких расчетов служит расчет на реальные или генерированные акселерограммы [2]. В общем случае такой подход реализуется методом решения системы уравнений динамического равновесия, выражаемой в виде [2]:

$$M \cdot \ddot{Y}(t) + C \cdot \dot{Y}(t) + S(t) = P(t), \quad (1)$$

где M — матрица масс; C — матрица демпфирования; $\ddot{Y}(t)$, $\dot{Y}(t)$ — неизвестные векторы соответствующих ускорений и скоростей перемещения конструкций в пространстве во времени t ; $S(t)$ — вектор неупругих сил реакции отпора; $P(t)$ — вектор нагрузок, который соответствует выбранной модели динамического воздействия.

В системе уравнений динамического равновесия (1) с целью упрощения принято, что нелинейность влияет на жесткостные характеристики конструкции, но в то же время остаются постоянными матрица демпфирования и матрица масс [10].

Решение системы уравнений динамического равновесия (1) с применением численных методов интегрирования выражаем в виде:

$$M \cdot \Delta \ddot{Y}(t) + C \cdot \Delta \dot{Y}(t) + K_{\text{кас}}(t) \cdot \Delta Y(t) = \Delta P(t), \quad (2)$$

где $K_{\text{кас}}(t)$ — матрица касательной жесткости соответствующей конструкции в текущий промежуток времени t ; $\Delta P(t)$, $\Delta Y(t)$, $\Delta \dot{Y}(t)$, $\Delta \ddot{Y}(t)$ — соответствующие приращения для нагрузок на текущем шаге и перемещений, скоростей, ускорений в текущий промежуток времени t .

Значения перемещений, скоростей, сил отпора и ускорений в текущий промежуток времени t определяются путем интегрирования системы уравнений динамического равновесия (2) [2]:

$$Y(t) = Y(t - \Delta t) + \Delta Y(t), \quad S(t) = S(t - \Delta t) + K_{\text{кас}}(t) \cdot \Delta Y(t),$$

$$\dot{Y}(t) = \dot{Y}(t - \Delta t) + \Delta \dot{Y}(t), \quad \ddot{Y}(t) = \ddot{Y}(t - \Delta t) + \Delta \ddot{Y}(t).$$

В целях упрощения решения системы уравнений динамического равновесия (2) допускаем, что в решаемой системе присутствует незначительное количество элементов с существенной нелинейностью (например, выключающиеся связи или резинометаллические опоры), а для ее другой части можно в первом приближении допустить, что матрица начальной жесткости обратно пропорциональна матрице ее касательной жесткости. Это утверждение аналогично случаю использования в различных вариантах приближенного нелинейного статического метода оценки сейсмостойкости сооружений «pushover analysis» [2–3]. На основании этого матрицу $K_{\text{кас}}(t)$ можно представить в следующем виде:

$$K_{\text{кас}}(t) = K_{e,\text{кас}}(t) + \chi(t)(K - K_e), \quad (3)$$

где $K_{e,\text{кас}}(t)$ — матрица касательной жесткости учитываемых нелинейных элементов в текущий промежуток времени t ; K — матрица начальной жесткости рассматриваемой системы в целом (при $Y = 0$); K_e — матрица начальной жесткости учитываемых нелинейных элементов (при $Y = 0$); $\chi(t) \in [0, 1]$ — коэффициент пропорциональности.

После соответствующих подстановок (3) в (2) и перемещения членов, взаимосвязанных с нелинейными элементами, за знак равенства получим уравнение (4) [2]:

$$M \cdot \Delta \ddot{Y}(t) + C \cdot \Delta \dot{Y}(t) + \chi(t)K \cdot \Delta Y(t) = \Delta P(t) + [\chi(t)K_e - K_{e,\text{кас}}(t)] \cdot \Delta Y(t). \quad (4)$$

В принятых начальных условиях становится возможным учесть напряженно-деформированное состояние несущих конструкций при действии постоянных нагрузок, приложенных к моменту начала сейсмического воздействия.

Результаты исследования. На рис. 1 показаны результаты расчетов перемещения верха здания и поперечной силы в одной из колонн его каркаса. Представлены решения, полученные в линейно-упругой постановке, в нелинейной постановке с учетом упругопластической работы сейсмоизоляторов, установленных между фундаментом и конструкциями здания, и в нелинейной постановке с учетом упругопластической работы сейсмоизоляторов и конструкций. Эти результаты показывают, что учет сейсмоизоляции здания и неупругого деформирования его конструкций позволил получить существенно меньшие расчетные усилия в элементах каркаса здания без увеличения амплитуды перемещений верха здания (в других случаях учет пластичности сможет приводить как к снижению, так и к увеличению амплитуды перемещений) [2].

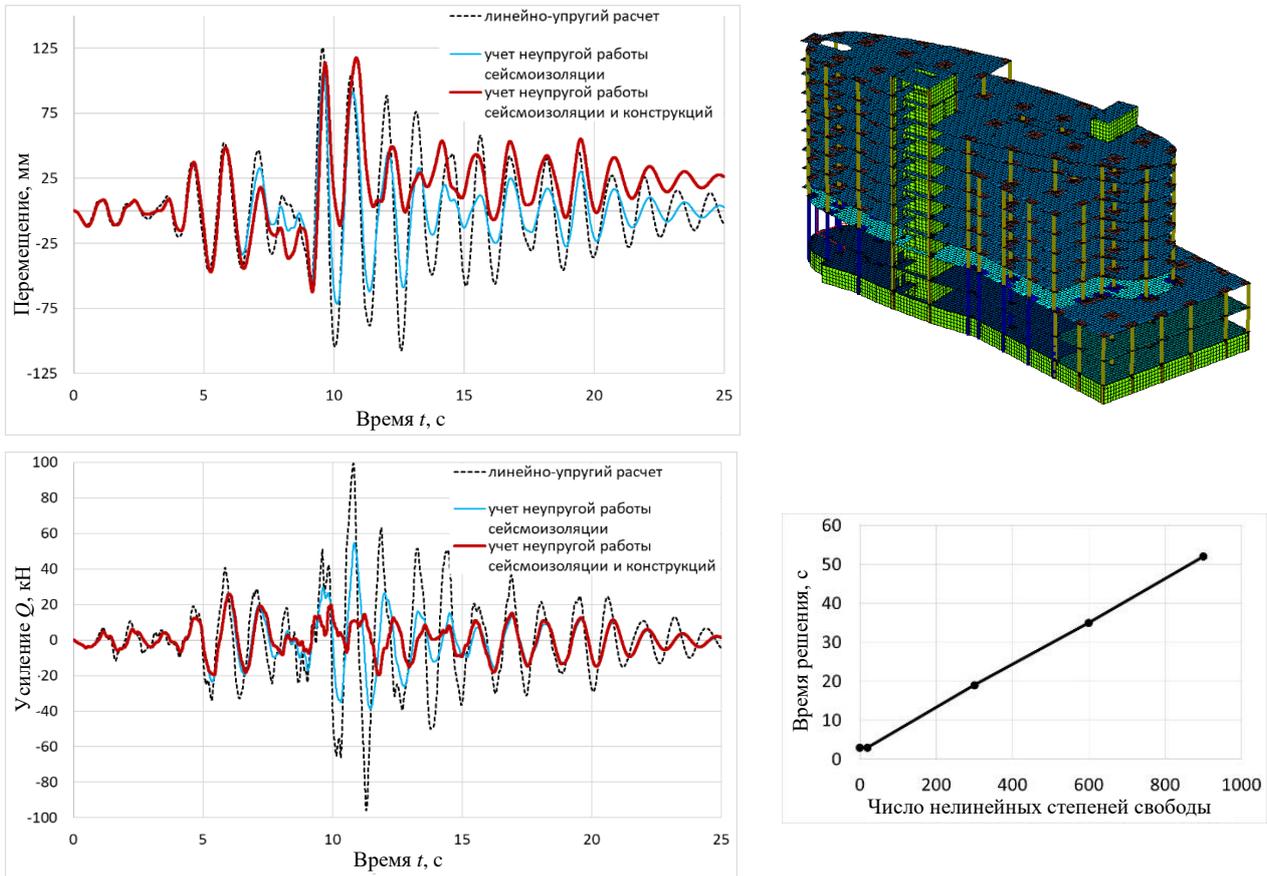


Рис. 1. Результаты линейного и упругопластического расчетов каркаса здания и его конечно-элементная расчетная модель [2]

При расчете систем с локальными нелинейностями недостаточно использование лишь форм колебаний со значимой общей эффективной модальной массой. Например, для расчета плоской рамы с упругопластическими сейсмоизолирующими опорными элементами (рис. 2) при поступательном сейсмическом воздействии вдоль рамы потребовалось учесть 68-ю и 69-ю формы собственных колебаний рамы, связанные с деформацией нелинейных опорных элементов. Эти формы имеют нулевой вклад в сумму эффективных модальных масс и на линейное решение никак не влияют (таблица 1). Напротив, при нелинейном расчете эти формы имеют большое значение при определении усилий в элементах рамы [2].

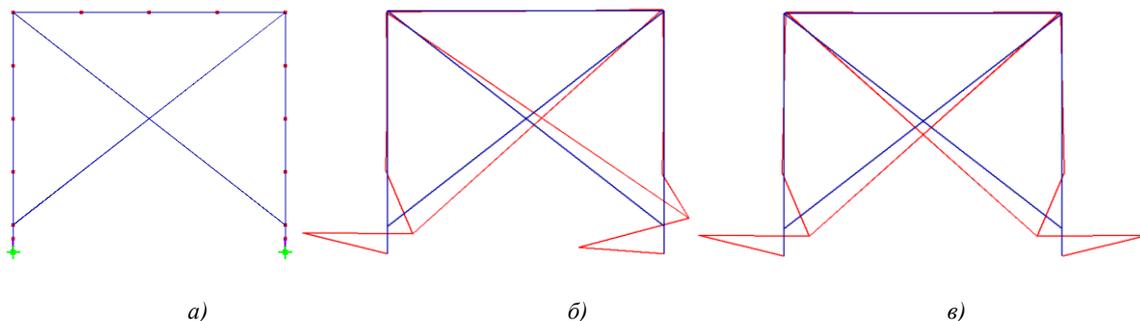


Рис. 2. Сейсмоизолированная рама: а — общий вид конечно-элементной модели рамы; б — форма собственных колебаний №68; в — форма собственных колебаний № 69

Таблица 1

Результаты расчета рамы [2]

Число учтённых собственных форм	μ_k	Линейное решение			Нелинейное решение		
		Перемещение, мм	Продольная сила в диагональной связи, кН	Поперечная сила в опоре, кН	Перемещение, мм	Продольная сила в диагональной связи, кН	Поперечная сила в опоре, кН
69 (точное решение)	1,0000	30,0	152,6	176,4	27,8	115,3	107,5
68	1,0000	30,0	152,6	176,4	27,8	115,3	168,3
67	1,0000	30,0	152,6	176,4	27,8	115,3	245,0
19	1,0000	30,0	152,6	176,4	27,9	115,4	262,7
9	0,9999	30,0	152,6	176,4	28,1	116,0	262,3
5	0,9968	30,0	152,6	176,4	28,3	119,4	235,2
3	0,9860	30,0	152,6	176,4	29,0	132,3	194,1
1	0,9550	30,0	153,0	176,0	29,6	150,9	173,5

Ниже приводятся результаты расчета на основные и особые сочетания нагрузок и усилий жизнесберегающего многоэтажного здания с сейсмоизоляцией, возводимого в г. Грозный, которое представляет собой монолитное железобетонное здание в виде железобетонного каркаса с диафрагмами и ядром жесткости и встроенной системой сейсмозащиты — кинематической системой сейсмоизоляции, которая разработана для снижения динамической реакции здания на сейсмическое воздействие на основе патента № 2477353 «Трубобетонная сейсмоизолирующая опора». Кинематическая система сейсмоизоляции обеспечила снижение расчетных горизонтальных сейсмических нагрузок на сейсмоизолированную часть здания до ускорений, не превышающих 80 см/с^2 [12–16].

Приняты симметричные конструктивные и объемно-планировочные решения с равномерным распределением нагрузок на перекрытия, масс и жесткостей конструкций в плане и по высоте. При этом более 80 % поэтажной жесткости на каждом из этажей здания, кроме верхнего этажа, обеспечивают колонны, стены, ядро жесткости.



Рис. 3. Аналитическая модель жизнесберегающего многоэтажного здания

Пространственная жесткость и общая устойчивость системы обеспечивается за счет совместной работы колонн, балок, стен с горизонтальными плитами, жестких узлов сопряжения монолитных железобетонных конструкций, а также шарнирных соединений сейсмоизолирующих опор с фундаментной плитой и плитой перекрытия второго этажа.

Сечения элементов конструкций и их соединения приняты с учетом результатов расчетов.

Стыки элементов расположены вне зоны максимальных усилий, обеспечена монолитность, однородность и непрерывность конструкций.

Создается возможность развития в элементах допустимых неупругих деформаций.

Для создания физической и аналитической модели здания применялась программа САПФИР-3D 2019, являющаяся частью расчетно-вычислительного комплекса «ЛИРА-САПР 2019». Расчетная модель создавалась автоматически в «ЛИРА-САПР 2019» по аналитической модели [16].

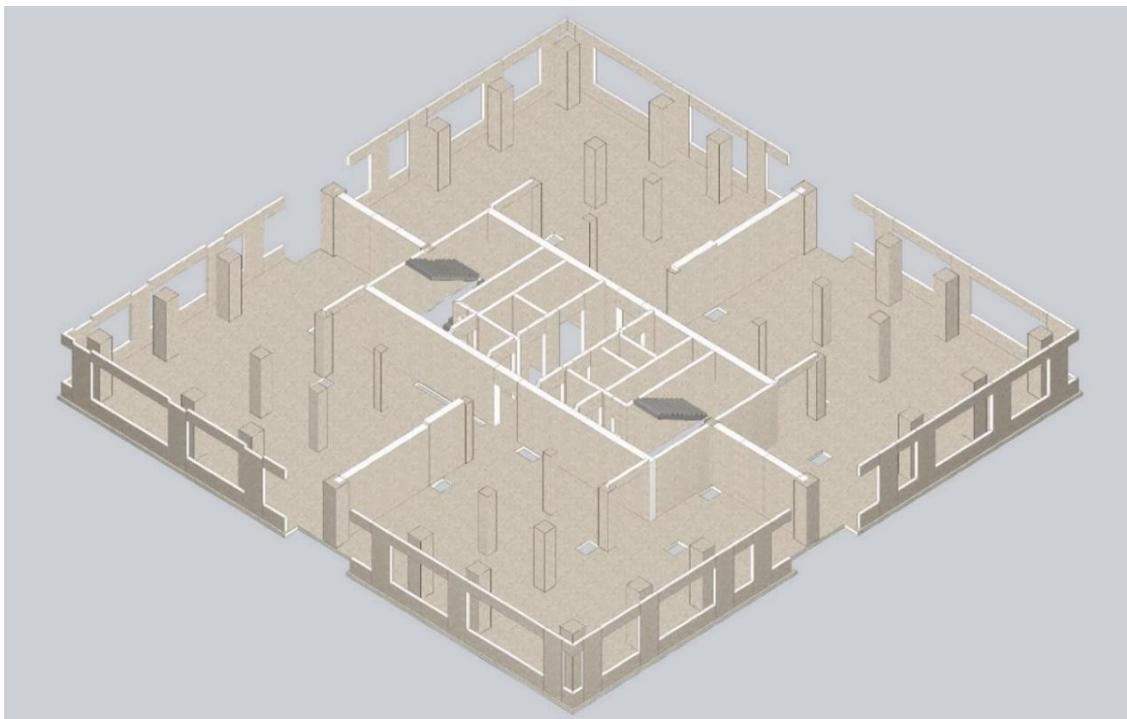


Рис. 4. Физическая модель типового этажа жизнеберегающего здания

Частоты собственных колебаний многоэтажного здания приведены в таблицах 2–3.

Результаты подбора армирования для плиты перекрытия типового этажа многоэтажного жизнеберегающего здания приведены на рис. 5–8 [16].

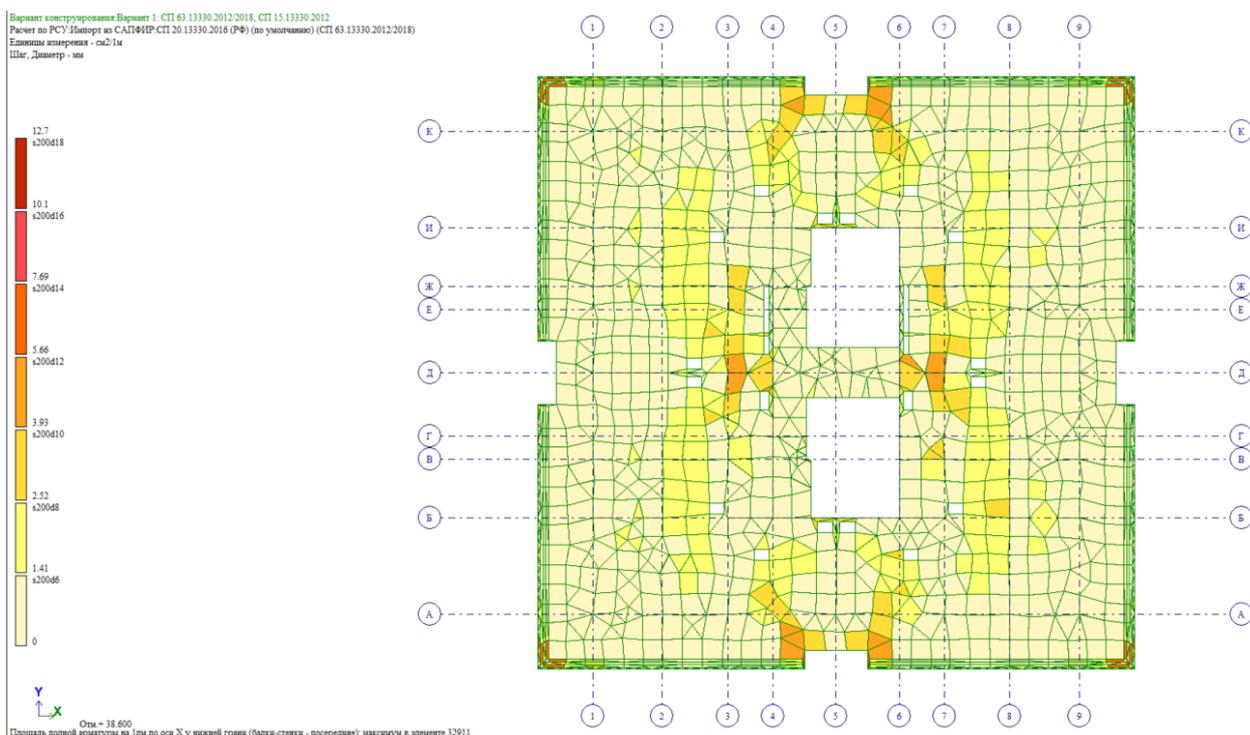


Рис. 5. Армирование плиты перекрытия типового этажа в нижней зоне по оси X [16]

Частоты собственных колебаний для загрузки № 7 [16]

№ загрузки	№ формы	Собст. значения	Частоты		Период, с	Коэф. распред.	Мод. масса, %	Сумма мод. масс, %
			Круг. частота, рад/с	Частота, Гц				
7	1	3,831	0,261	0,042	24,068	0,000	0,000	0,000
7	2	2,278	0,439	0,070	14,311	0,000	0,000	0,000
7	3	1,240	0,807	0,128	7,791	-0,003	0,000	0,000
7	4	0,477	2,095	0,333	2,999	-1,595	59,283	59,283
7	5	0,360	2,781	0,443	2,259	-0,001	0,000	59,283
7	6	0,275	3,636	0,579	1,728	0,005	0,001	59,284
7	7	0,126	7,967	1,268	0,789	1,130	20,768	80,052
7	8	0,099	10,095	1,607	0,622	-0,001	0,000	80,052
7	9	0,096	10,446	1,663	0,601	0,008	0,001	80,053
7	10	0,063	15,806	2,516	0,398	1,648	9,511	89,564
7	11	0,055	18,147	2,888	0,346	0,012	0,000	89,564
7	12	0,052	19,388	3,086	0,324	0,027	0,000	89,564
7	13	0,050	19,899	3,167	0,316	0,062	0,000	89,564
7	14	0,050	20,172	3,210	0,311	1,669	0,240	89,804
7	15	0,049	20,458	3,256	0,307	0,156	0,002	89,806
7	16	0,048	20,812	3,312	0,302	-0,012	0,000	89,806
7	17	0,047	21,089	3,356	0,298	0,011	0,000	89,806
7	18	0,047	21,236	3,380	0,296	-1,418	0,181	89,987
7	19	0,046	21,539	3,428	0,292	-0,111	0,001	89,988
7	20	0,046	21,598	3,437	0,291	-0,023	0,000	89,988
7	21	0,046	21,845	3,477	0,288	-1,177	0,001	89,990
7	22	0,044	22,848	3,636	0,275	0,007	0,000	89,990
7	23	0,043	23,493	3,739	0,267	0,962	0,427	90,416
7	24	0,042	24,095	3,835	0,261	0,167	0,009	90,425
7	25	0,041	24,171	3,847	0,260	0,115	0,005	90,430
7	26	0,038	25,976	4,134	0,242	-0,780	1,932	92,362
7	27	0,037	26,791	4,264	0,235	0,048	0,005	92,367
7	28	0,031	32,280	5,137	0,195	-0,001	0,000	92,367
7	29	0,030	33,040	5,258	0,190	0,006	0,000	92,367
7	30	0,029	34,136	5,433	0,184	-0,047	0,001	92,368
7	31	0,029	34,166	5,438	0,184	-0,010	0,000	92,368
7	32	0,029	34,506	5,492	0,182	-0,286	0,000	92,368
7	33	0,029	34,811	5,540	0,180	-0,204	0,002	92,370
7	34	0,028	35,190	5,601	0,179	0,395	0,006	92,376
7	35	0,028	35,250	5,610	0,178	-0,195	0,002	92,378
7	36	0,028	35,676	5,678	0,176	-0,013	0,000	92,378
7	37	0,027	36,568	5,820	0,172	0,045	0,001	92,379
7	38	0,027	36,782	5,854	0,171	0,028	0,000	92,380
7	39	0,027	37,018	5,892	0,170	-0,001	0,000	92,380
7	40	0,026	38,189	6,078	0,165	0,411	0,440	92,819
7	41	0,024	41,604	6,621	0,151	-0,041	0,000	92,819
7	42	0,024	41,873	6,664	0,150	-0,008	0,000	92,820
7	43	0,024	42,289	6,730	0,149	-0,060	0,000	92,820
7	44	0,024	42,445	6,755	0,148	-0,007	0,000	92,820
7	45	0,023	42,912	6,830	0,146	-0,009	0,000	92,820
7	46	0,023	43,500	6,923	0,144	0,012	0,000	92,820
7	47	0,022	44,658	7,108	0,141	0,027	0,000	92,820
7	48	0,022	44,809	7,132	0,140	0,012	0,000	92,820
7	49	0,022	46,120	7,340	0,136	-0,077	0,001	92,821
7	50	0,022	46,229	7,358	0,136	-0,022	0,000	92,821
7	51	0,021	48,501	7,719	0,130	-0,004	0,000	92,821

Таблица 3

Частоты собственных колебаний для загрузки № 9 [16]

№ загрузки	№ формы	Собст. значения	Частоты		Период, с	Коэф. распред.	Мод. масса, %	Сумма мод. масс, %
			Круг. частота, рад/с	Частота, Гц				
9	1	3,831	0,261	0,042	24,068	0,199	0,000	0,000
9	2	2,278	0,439	0,070	14,311	0,362	0,000	0,000
9	3	1,240	0,807	0,128	7,791	-0,273	0,000	0,000
9	4	0,477	2,095	0,333	2,999	-1,382	44,494	44,495
9	5	0,360	2,781	0,443	2,259	0,823	15,434	59,928
9	6	0,275	3,636	0,579	1,728	0,009	0,002	59,931
9	7	0,126	7,967	1,268	0,789	0,979	15,615	75,545
9	8	0,099	10,095	1,607	0,622	0,627	6,060	81,606
9	9	0,096	10,446	1,663	0,601	-0,012	0,003	81,609
9	10	0,063	15,806	2,516	0,398	1,426	7,127	88,736
9	11	0,055	18,147	2,888	0,346	0,060	0,003	88,738
9	12	0,052	19,388	3,086	0,324	2,381	0,730	89,468
9	13	0,050	19,899	3,167	0,316	-0,159	0,002	89,471
9	14	0,050	20,172	3,210	0,311	1,366	0,160	89,631
9	15	0,049	20,458	3,256	0,307	0,095	0,001	89,632
9	16	0,048	20,812	3,312	0,302	-2,000	0,643	90,275
9	17	0,047	21,089	3,356	0,298	-0,178	0,003	90,278
9	18	0,047	21,236	3,380	0,296	-1,273	0,146	90,424
9	19	0,046	21,539	3,428	0,292	0,197	0,003	90,426
9	20	0,046	21,598	3,437	0,291	-0,003	0,000	90,426
9	21	0,046	21,845	3,477	0,288	-0,686	0,000	90,427
9	22	0,044	22,848	3,636	0,275	0,003	0,000	90,427
9	23	0,043	23,493	3,739	0,267	0,832	0,320	90,747
9	24	0,042	24,095	3,835	0,261	0,253	0,021	90,768
9	25	0,041	24,171	3,847	0,260	-0,149	0,008	90,775
9	26	0,038	25,976	4,134	0,242	-0,676	1,448	92,224
9	27	0,037	26,791	4,264	0,235	0,050	0,006	92,230
9	28	0,031	32,280	5,137	0,195	-0,247	0,215	92,444
9	29	0,030	33,040	5,258	0,190	0,016	0,001	92,445
9	30	0,029	34,136	5,433	0,184	-0,056	0,001	92,446
9	31	0,029	34,166	5,438	0,184	-0,031	0,000	92,446
9	32	0,029	34,506	5,492	0,182	-0,843	0,001	92,448
9	33	0,029	34,811	5,540	0,180	-0,289	0,004	92,452
9	34	0,028	35,190	5,601	0,179	0,383	0,005	92,457
9	35	0,028	35,250	5,610	0,178	-0,012	0,000	92,457
9	36	0,028	35,676	5,678	0,176	0,019	0,000	92,458
9	37	0,027	36,568	5,820	0,172	0,008	0,000	92,458
9	38	0,027	36,782	5,854	0,171	0,067	0,002	92,460
9	39	0,027	37,018	5,892	0,170	0,009	0,000	92,460
9	40	0,026	38,189	6,078	0,165	0,355	0,329	92,789
9	41	0,024	41,604	6,621	0,151	-0,038	0,000	92,789
9	42	0,024	41,873	6,664	0,150	-0,006	0,000	92,789
9	43	0,024	42,289	6,730	0,149	-0,079	0,000	92,789
9	44	0,024	42,445	6,755	0,148	-0,048	0,000	92,789
9	45	0,023	42,912	6,830	0,146	-0,034	0,000	92,790
9	46	0,023	43,500	6,923	0,144	0,067	0,001	92,791
9	47	0,022	44,658	7,108	0,141	-0,069	0,002	92,793
9	48	0,022	44,809	7,132	0,140	0,283	0,031	92,824
9	49	0,022	46,120	7,340	0,136	-0,054	0,000	92,825
9	50	0,022	46,229	7,358	0,136	-0,035	0,000	92,825
9	51	0,021	43,501	7,719	0,130	-0,017	0,000	92,825

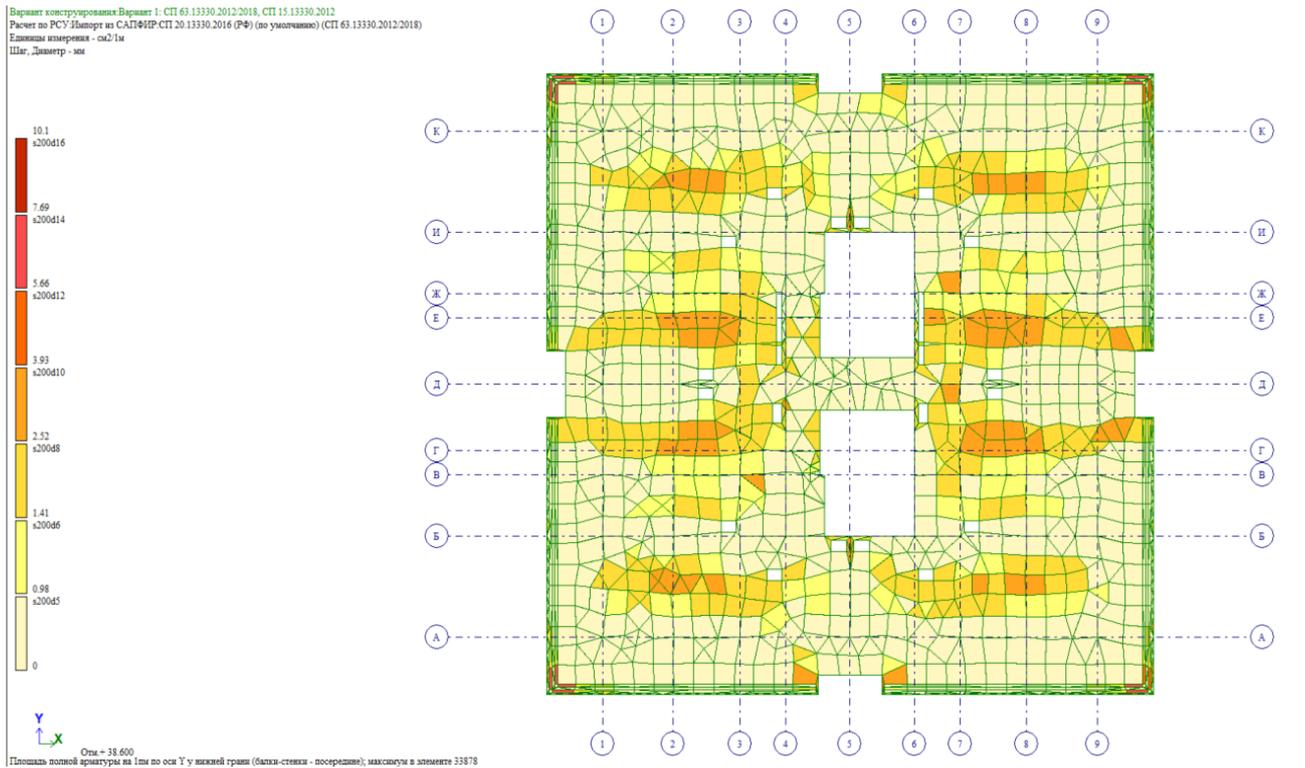


Рис. 6. Армирование плиты перекрытия типового этажа в нижней зоне по оси Y [16]

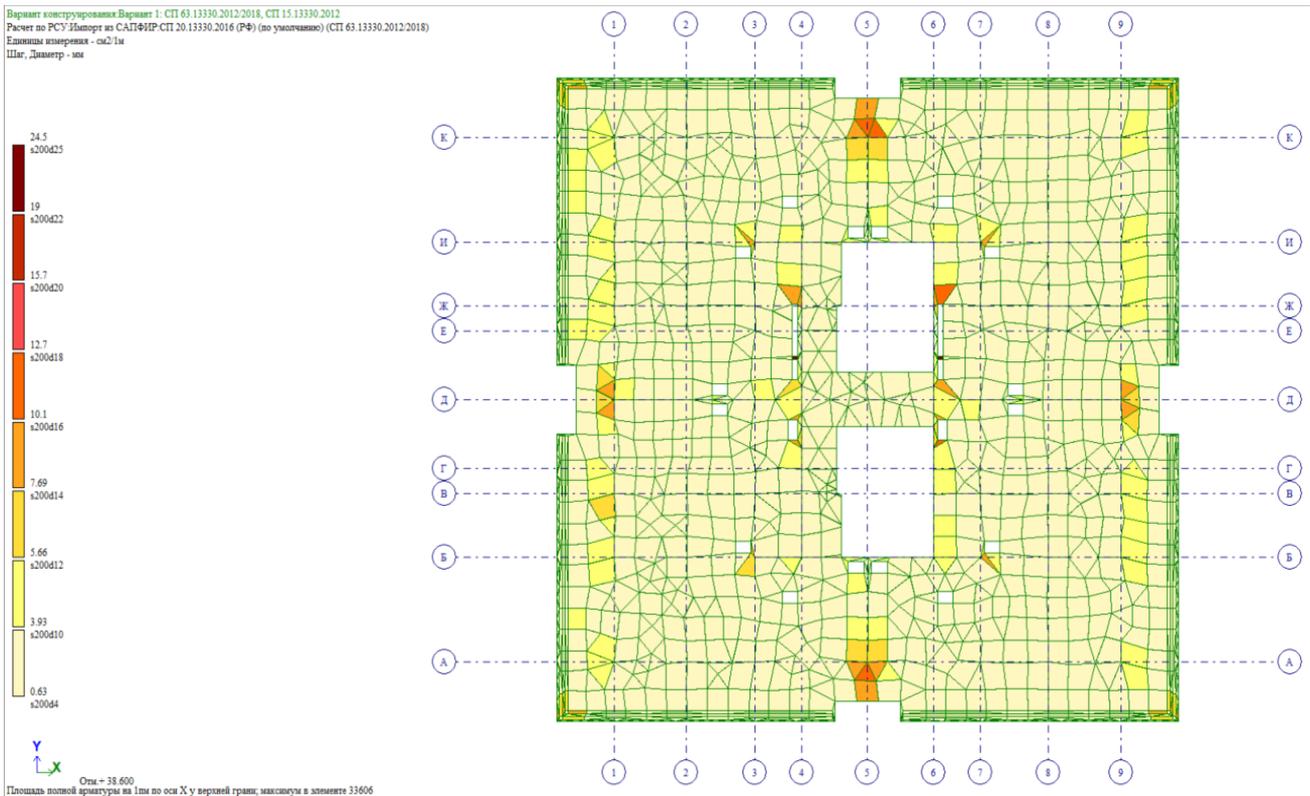


Рис. 7. Армирование плиты перекрытия типового этажа в верхней зоне по оси X [16]

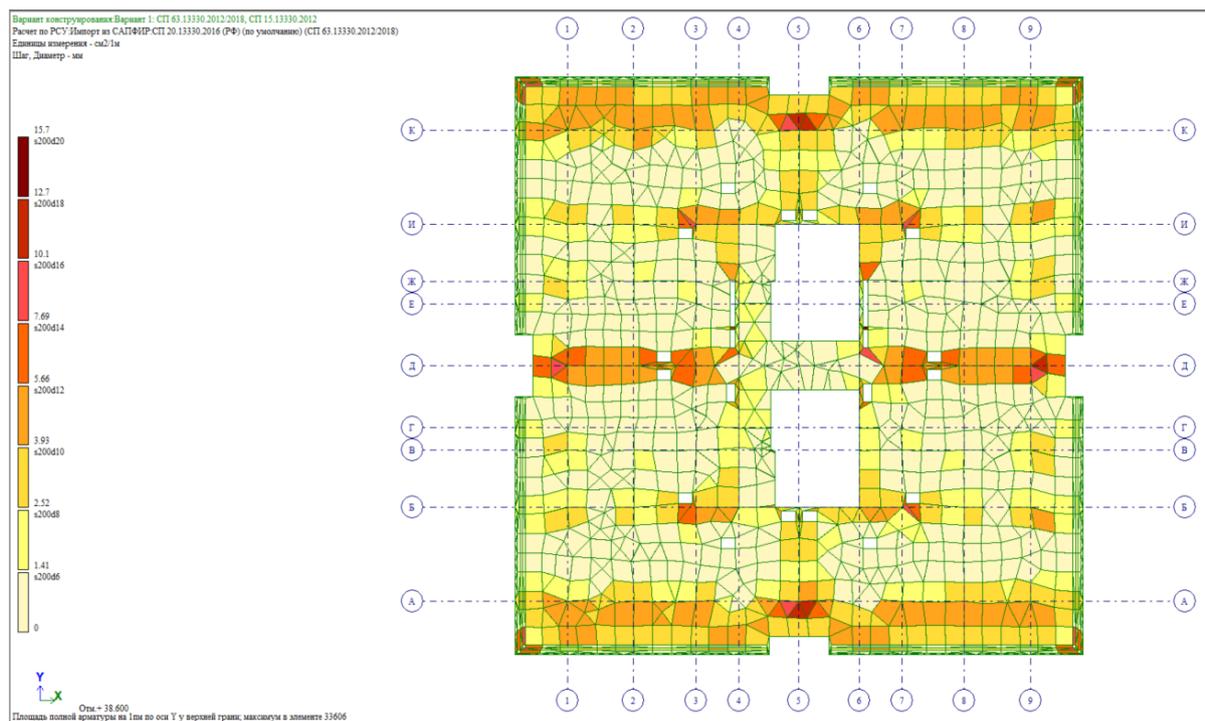


Рис. 8. Армирование плиты перекрытия типового этажа в верхней зоне по оси Y [16]

Обсуждение и заключение. На основании проведенных расчетов здания можно сделать следующее заключение:

1. Учет нормативных требований при расчете конструкций жизнесберегающих зданий на сейсмические воздействия позволил получить существенно меньшие расчетные усилия в элементах каркаса здания без увеличения амплитуды перемещений верха здания (в других случаях учет пластичности сможет приводить как к снижению, так и к увеличению амплитуды перемещений).
2. Расчет на основное сочетание нагрузок показал достаточную жесткость конструкций здания.
3. Расчет на действие особого сочетания нагрузок, включая сейсмическую (9 баллов), показал, что выбранная конструктивная схема обеспечивает достаточную жесткость, прочность и устойчивость здания и его элементов.

Список литературы / References

1. Айзенберг Я.М., Деглина М.М., Мажиев Х.Н. и др. *Сейсмоизоляция и адаптивные системы сейсмозащиты*. М.: Наука; 1983. 142 с.
Ayzenberg YaM, Deglina MM, Mazhiev KhN, et al. *Seismic Isolation and Adaptive Seismic Protection Systems*. Moscow: Nauka Publ.; 1983. 142 p. (In Russ.)
2. Симбиркин В.Н., Панасенко Ю.В. Учет указаний СП 14.13330.2018 при реализации расчета сооружений на сейсмические воздействия в программном комплексе STARK ES. *Вестник НИЦ Строительство*. 2019;2(21):103–113. URL: <https://vestnik.cstroy.ru/jour/article/view/26> (дата обращения: 02.09.2024).
Simbirkin VN, Panasenکو YuV. Implementation of Seismic Structural Analysis in STARK ES Software According to the Building Code SP 14.13330.2018. *Bulletin of the Scientific Research Center of Construction*. 2019;(2(21)):103–113. (In Russ.) URL: <https://vestnik.cstroy.ru/jour/article/view/26> (accessed: 02.09.2024).
3. 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 (accessed: 02.09.2024).
4. Wilson EL. *Static & Dynamic Analysis of Structures: a Physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering*. Computers and Structures Publ.; 2004. 394 p.
5. 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.
Mailyan LR, Zubritskiy MA, Ushakov OYu, Sabitov LS. Calculation of High-Rise Buildings under Seismic Effect of “Controlling Earthquake” Level by Nonlinear Static Method on the Example of Adyge Wind Power Plant. *Construction Materials and Products*. 2020;3(1):14–20. (In Russ.)
6. Маилян Д.Р., Мурадян В.А. К методике расчета железобетонных внецентренно сжатых колонн. *Инженерный вестник Дона*. 2012; ;(4–2(23)):182. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1333> (дата обращения: 02.09.2024).

Mailyan DR, Muradyan VA. The Method of Calculating Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Columns. *Engineering Journal of Don*. 2012;(4–2(23)):182. (In Russ.) URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1333> (accessed: 02.09.2024).

7. 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 02.09.2024).

Muselemov HM, Mailyan DR, Muselemov DU. Stress-Strain State of a Three-Layer Tubular Structure Under the Influence of a Uniformly Distributed Pulse Load. *Engineering Journal of Don*. 2023;(11(107)):386–400. (In Russ.) URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8786> (accessed: 02.09.2024).

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

Pshenichkina VA, Drozdov VV, Chauskin AYU. *Seismic Reliability of High-Rise Buildings*. Volgograd: VolgGTU; 2022. 180 p. (In Russ.)

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

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

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

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

11. Mailyan LR, Yazyev SB, Sabitov LS, Konoplev YuG, Radaykin OV. Stress-Strain State of the System “Combined Tower — Reinforced Concrete Foundation — Base 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>

12. Абаканов Т., Кусаинов А.А., Теплых А.В., Бондарев Д.Е. *Сейсмология и сейсмостойкость сооружений*. М.: Издательство СКАД СОФТ, Издательство АСВ; 2024. 624 с. URL: <https://iasv.ru/seismologiya-i-sejstmostojkost-sooruzhenij.html> (дата обращения: 02.09.2024).

Abakanov T, Kusainov AA, Teplykh AV, Bondarev DE. *Seismology and Seismic Stability of Structures*. Moscow: SKAD SOFT Publ., ASV Publ.; 2024. 624 p. (In Russ.) URL: <https://iasv.ru/seismologiya-i-sejstmostojkost-sooruzhenij.html> (accessed: 02.09.2024).

13. 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 Construction and Restoration of Buildings and Structures in Seismic Areas*. Grozny: Complex Institute of the Russian Academy of Sciences Named after Kh. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences; 2014. 652 p. (In Russ.)

14. Симбиркин В.Н., Панасенко Ю.В. Упрощенный нелинейный динамический расчет сооружений при сейсмических воздействиях. *Строительная механика и расчет сооружений*. 2017;(5(274)):5:32–36. URL: <https://elibrary.ru/zipgcd> (дата обращения: 02.09.2024).

Simbirkin VN, Panasenko YuV. Simplified Nonlinear Dynamic Calculation of Structures under Seismic Impacts. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2017;(5(274)):32–36. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/zipgcd> (accessed: 02.09.2024).

15. Мажиев Х.Н., Мажиев К.Х., Мажиева А.Х., Шестаков И.И., Кадаев И.Х., Мажиев А.Х. и др. Опыт строительства зданий с системами сейсмоизоляции в Чеченской Республике. В: *Материалы Международных академических чтений «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения»*. Курск: Курский государственный университет; 2021. С. 17–31. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47478153> (дата обращения: 02.09.2024).

Mazhiev KhN, Mazhiev KKh, Mazhieva AKh, Shestakov II, Kadaev IKh, Mazhiev AKh, et al. Experience in Constructing Buildings with Seismic Isolation Systems in the Chechen Republic. In: *Proceedings of the International Academic Readings “Safety of the Russian Construction Stock. Problems and Solutions”*. Kursk: Kursk State University; 2021. P. 17–31. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47478153> (accessed: 02.09.2024).

16. Расчетно-пояснительная записка по результатам расчета на основные и особые сочетания нагрузок и усилий по объекту: «Высотный жилой комплекс со встроенно-пристроенными помещениями общественного назначения и 2-х уровневый подземным паркингом по адресу: Чеченская Республика, г. Грозный, Ленинский район, ул. Шейха-Али Мутаева, 2 «а». Блок-секция I. Сочи: ООО «СочиЭкспертПроект»; 2021. 172 с.

Calculation and Explanatory Note Based on the Results of Calculations for the Main and Special Combinations of Loads and forces Referring to the Facility: "High-Rise Residential Complex with Built-in and Attached Public Spaces and a Two-Level Underground Parking at the Address: 2a, Sheikh-Ali Mitayev Str., Grozny, Chechen Republic. Block Section I. Sochi: SochiExpertProect, LLC; 2021. 172 p. (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 Центральный научно-исследовательский институт 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

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

Заявленный вклад авторов:

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

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

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

Ю.В. Панасенко: разработка подхода к вопросу учета работы неупруго-деформированных сейсмоизолирующих конструкций при динамическом расчете, решение системы уравнений динамического равновесия, линейный и упругопластический расчет каркаса здания;

А.Х. Мажиев: проведение 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 разработке конструктивной системы жизнесберегающего здания, проведение 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. (Engineering), Professor, Head of the Building Structures Department, Grozny State Oil Technical University Named after Academician M.D. Millionshchikov (100, Kh.A. Isaev Ave., Grozny, 364051, Chechen Republic, Russian Federation), [ORCID](#), seismofund@mail.ru

Kazbek Kh. Mazhiev, Cand.Sci. (Engineering), Scientific Director of the Scientific and Technical Center “Safety of Buildings and Structures under Natural and Anthropogenic Impacts”, Associate Professor of the Building Structures Department, Grozny State Oil Technical University Named after Academician M.D. Millionshchikov (100, Kh.A. Isaev Ave., Grozny, 364051, Chechen Republic, Russian Federation); Senior Research Associate of the Complex Institute of the Russian Academy of Sciences Named after Kh. Ibragimov (21a, V. Aliev Str., Grozny, 364051, Chechen Republic, Russian Federation), [ORCID](#), seismofund@mail.ru

Yuri V. Panasenko, Head of the Expert Calculation 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 of Construction (6, 2-ya Institutskaya Str., Moscow, 109428, Russian Federation), [ORCID](#), panyuriy@eurosoft.ru

Amina Kh. Mazhieva, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Building Structures Department, Grozny State Oil Technical University Named after Academician M.D. Millionshchikov (100, Kh.A. Isaev Ave., Grozny, 364051, Chechen Republic, Russian Federation), [ORCID](#), seismofund@mail.ru

Aslan Kh. Mazhiev, Research Associate of the Physics, Mathematics and Engineering Sciences Department of the Material Engineering Research Center, Academy of Sciences of the Chechen Republic (19a, V. Aliev Str., Grozny, 364043, Chechen Republic, Russian Federation); Senior Lecturer of the Building Structures Department, Grozny State Oil Technical University Named after Academician M.D. Millionshchikov (100, Kh.A. Isaev Ave., Grozny, 364051, Chechen Republic, Russian Federation), [ORCID](#), seismofund@mail.ru

Adam Kh. Mazhiev, Research Associate of the Physics, Mathematics and Engineering Sciences Department of the Material Engineering Research Center, Academy of Sciences of the Chechen Republic (19a, V. Aliev Str., Grozny, 364043, Chechen Republic, Russian Federation), [ORCID](#), seismofund@mail.ru

Claimed Contributorship:

KhN Mazhiev: scientific supervision, formulating the main concept, aim, objectives of the research and its general planning, participation in the implementation of the research, analysis of the research results, refining and evolving the conclusions, correcting the manuscript.

KKh Mazhiev: participation in the implementation of the research, analysis of the obtained results, correcting the manuscript, formulating the conclusions.

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

YuV Panasenko: developing approaches to estimating behaviour of the inelastically deformed seismic isolation structures in dynamic calculations, solving the system of equations of the dynamic equilibrium, linear and elastic-plastic calculation of the building frame.

AKh Mazhiev: conducting the calculations, implementing the main stages of the research, processing and analysing obtained results, formulating the conclusions, preparing the illustrations and the original text, general layout of the manuscript.

AKh Mazhiev: participation in the development of the structural system of a life-saving building, conducting the calculations, implementing the main stages of the research, processing and analysing obtained results, formulating the conclusions.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 20.10.2024

Поступила после рецензирования / Revised 15.11.2024

Принята к публикации / Accepted 29.11.2024

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

FOUNDATIONS AND FOUNDATIONS, UNDERGROUND STRUCTURES



УДК 624.131.5:550.394

Original Empirical Research

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-30-40>

Analysis of the Effect of Pile Arrangement on Soil Slope Stability during Earth-quakes



EDN: FSXUDJ

Al-Eqabi Haqi Hadi Abbood , Albert Yu. Prokopov , Nikita A. Adoniev

Don State Technical University, Rostov on Don, Russian Federation

✉ haqqi@uowasit.edu.iq

Abstract

Introduction. Natural and man-made slopes may lose stability in the event of change of the physical and mechanical properties of soils, seismic impact or additional loading. This often leads to the activation of landslide processes, damage of buildings, structures, roads and poses a threat to the safety and lives of people. Slopes in earthquake-prone places are the most dangerous and difficult for ensuring stability areas, therefore improving methods of engineering protection of slopes remains a relevant objective. The article studies the physical and numerical modeling of a sandy slope anchored by piles under the seismic impacts.

Materials and Methods. The paper uses the numerical methods to study the effect of earthquakes on sandy soil slopes reinforced with piles. The finite element method (FEM) is a widely used method for studying the interaction of structures and soil, especially in the complex combinations of loads and impacts. It accurately reproduces the complex behaviour of the massif, including stresses, deformations, horizontal and vertical displacements, as well as the nature of the collapse observed in the slope-pile system when it is subjected to seismic loads. The simulation of the specified above system is performed in a nonlinear formulation.

Results. The work of the pile allows transferring the part of the weight of the surface layers of the slope to deeper and more stable layers, which helps to maintain the stability of the slope. The parameters of the piles affecting the perception of seismic loads and the stability of a reinforced slope, including the type of pile, the method of its construction, earthquake and slope parameters, are studied. The conducted study of the interaction of piles and dynamic loads makes it possible to improve design solutions for engineering protection of slopes from landslide processes in seismic places.

Discussion and Conclusion. As a result of modeling, it was found that piles can reduce lateral pressure on the soil, increase the shear strength of the soil and significantly affect the stability of the slope, especially in the event of an earthquake or flood. However, the efficiency of stabilization with piles depends on several factors, such as stiffness, distance between the piles, their length, location on the slope and connection to the foundation.

Keywords: soil stabilization, concrete piles, sandy soil, landslide, piles, finite element method (FEM)

For Citation. Haqi Hadi Abbood AE, Prokopov AYu, Adoniev NA. Analysis of the Effect of Pile Arrangement on Soil Slope Stability during Earthquakes. *Modern Trends in Construction, Urban Development and Territorial Planning*. 2024;3(4):30–40. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-30-40>

Оригинальное эмпирическое исследование

Анализ влияния устройства свай на устойчивость грунтовых откосов при землетрясениях

Аль-Екаби Хаки Хади Аббуд , А.Ю. Прокопов , Н.А. Адоньев

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

✉ haqqi@uowasit.edu.iq

Аннотация

Введение. Природные и техногенные склоны при изменении физико-механических свойств грунтов, сейсмическом воздействии или дополнительном нагружении могут терять устойчивость. Это зачастую приводит к активизации оползневых процессов, повреждению зданий, сооружений, дорог и создает угрозу безопасности и

жизни людей. Наибольшую опасность и сложность обеспечения устойчивости представляют склоны в сейсмоопасных районах, для которых совершенствование методов инженерной защиты склонов остается весьма актуальной задачей. В настоящей статье рассматривается физическое и численное моделирование песчаного склона, укрепленного сваями, при сейсмических воздействиях.

Материалы и методы. В работе использованы численные методы для изучения влияния землетрясений на склоны из песчаного грунта, укрепленные сваями. Метод конечных элементов (МКЭ) — популярный метод изучения взаимодействия конструкций и грунта, особенно при сложных сочетаниях нагрузок и воздействий. Он точно воспроизводит сложное поведение массива, включая напряжения, деформации, горизонтальные и вертикальные смещения, а также характер разрушения, наблюдаемый в системе склон-свая, когда она подвергается сейсмическим нагрузкам. Моделирование указанной системы выполнено в нелинейной постановке.

Результаты исследования. Работа свай позволяет перенести часть веса поверхностных слоев склона на более глубокие и устойчивые слои, что помогает поддерживать устойчивость склона. Исследованы параметры свай, влияющие на восприятие сейсмических нагрузок и устойчивость укрепленного склона, в том числе тип свай, способ ее возведения, параметры землетрясения и склона. Проведенное исследование взаимодействия свай и динамических нагрузок позволит улучшить проектные решения по инженерной защите склонов от оползневых процессов в сейсмических районах.

Обсуждение и заключения. В результате моделирования установлено, что сваи могут уменьшить боковое давление на грунт, увеличить прочность грунта на сдвиг и существенно повлиять на устойчивость склона, особенно в случае землетрясения или наводнения. Однако эффективность стабилизации с помощью свай зависит от нескольких факторов, таких как жесткость, расстояние между сваями, их длина, расположение на склоне и соединение с фундаментом.

Ключевые слова: стабилизация грунта, бетонные сваи, песчаный грунт, оползень, сваи, метод конечных элементов

Для цитирования. Аль-Екаби Хаки Хади Аббуд, Прокопов А.Ю., Адоньев Н.А. Анализ влияния устройства свай на устойчивость грунтовых откосов при землетрясениях. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(4):30–40. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-30-40>

Introduction. When designing, constructing and operating buildings and structures near natural or man-made slopes, the problem of ensuring their stability arises, which is aggravated in areas dangerous for seismic impacts and is assessed differently in different countries [1]. There are various scientific approaches to assessing the stability of slopes under seismic impacts [2, 3], including the ones taking into account various retaining and fixing engineering structures [4].

Scientific research in this area was carried out taking into account regional specifics for certain earthquake-prone areas of Russia [5–7] and other countries, as well as for particularly dangerous conditions, including the possibility of flood, flooding [8–10], mining [11] and other natural and man-made impacts.

The operating conditions of transport infrastructure facilities [12, 13], characterized by dynamic loads, which, in combination with seismic impacts, increase the risk of loss of slope stability and activation of landslide processes, are of particular difficulty for modeling and calculating slopes.

For the analysis of such complex geotechnical systems, numerical calculation and modeling methods are currently most widely used [14, 15], implemented in modern software and computing complexes.

Materials and Methods. PLAXIS 3D is a software that uses the finite element method to do geotechnical studies for a variety of soils and in different engineering disciplines. PLAXIS 3D allows you to simulate a variety of soils and pile materials, add boundary conditions, and stresses. PLAXIS 3D can simulate dynamic challenges such as earthquake excitation using a range of methodologies, including the equivalent linear method, modal analysis, and direct integration. PLAXIS 3D can offer both graphical and numerical results when investigating the impact of earthquakes on sandy soil slopes reinforced by piles. [16–18].

The purpose of this work is to analyze the current literature on this issue and to give some insights and recommendations for future research using PLAXIS 3D software, with modeling boundary conditions employed in this study indicated in Figure (1).

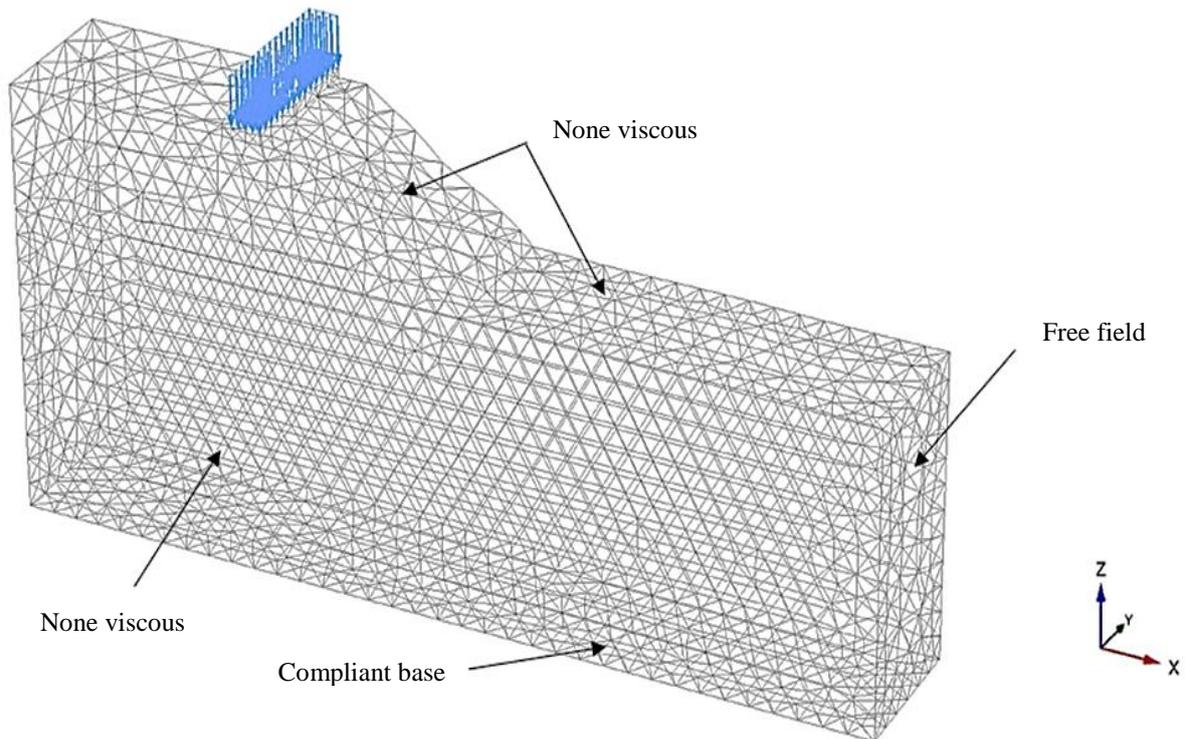


Fig. 1. Modelling boundary condition

This research uses the FEM (PLAXIS 3D) to assess the seismic stability of a soil slope with a strip footing before and after it is reinforced with rows of piles. FEM analysis is used to calculate the resistance of passive piles. The modifications proposed within the research include the positioning of pile rows, footings in respect to the slope crest, foundation depth, and the horizontal seismic coefficient of the crest and foundation. The footing seismic stability is computed using seismic slope stability with the PLAXIS software, and pile rows, as well as soil stability beneath the footing, are computed using the finite element method. The primary objective is to evaluate and establish the link between the various factors and the seismic stability of the soil slope and footing, as well as to choose the ideal placement for the pile row to maximize the seismic carrying capacity of the footing. The results show that stabilizing the soil slope with rows of piles significantly improves the footing's seismic carrying capacity. Furthermore, the findings of the current approach are compared to scientific codes for allowable limits of deformation for the case of an earthquake to show a reasonable compatibility. To determine whether it is essential to add piles to the critical slope of sandy soil at an angle of 35° in earthquake-prone areas, the soil and pile model properties are shown in Table 1.

Table 1

Soil and pile model properties

Parameter	Medium Sand	Concrete Footing	Concrete Pile
Material model	Mohr-coulomb model	Linear	Linear
Young's modulus, E (kPa)	$10 \cdot 10^3$	$23.5 \cdot 10^6$	$40 \cdot 10^6$
Poisson's ratio, V	0.25	0.15	0.10
Cohesion, C (kPa)	0.5	–	–
Friction angle, (ϕ°)	31.2	–	–
Dilatancy angle, (ψ°)	1.2	–	–
Unit weight, γ (kN/m ³)	18	25	25
Diameter of the pile, D (m)	–	–	0.3

The findings were obtained for the piles set at a distance ($X/L_x = 0.7$) from the summit of the slope and with a spacing equal to 2D of the piles:

1. The soil has bearing capacity enough to accept the foundation load
2. The value that approaches the maximum value of the factor of safety differs from other sites examined to establish the maximum bearing capacity and factor of safety.

In the present study, the time domain seismic response of frictional soil slopes was investigated using recordings from the 1995 Kobe earthquake (2). The elastic, totally plastic Mohr-Coulomb soil model criteria was used to generate a 3-dimensional dynamic finite element model under the plain-strain condition. The analysis simulates both the maximum horizontal and vertical seismic accelerations at the slope base. In terms of displacement generated by earthquake shaking, the seismic response of the slope to coupled seismic accelerations has been defined. The results show that the generated displacement of a slope under seismic loadings is higher in both horizontal and vertical dimensions. Furthermore, it is predicted that the slope will collapse at the crest level rather than the foundation level.

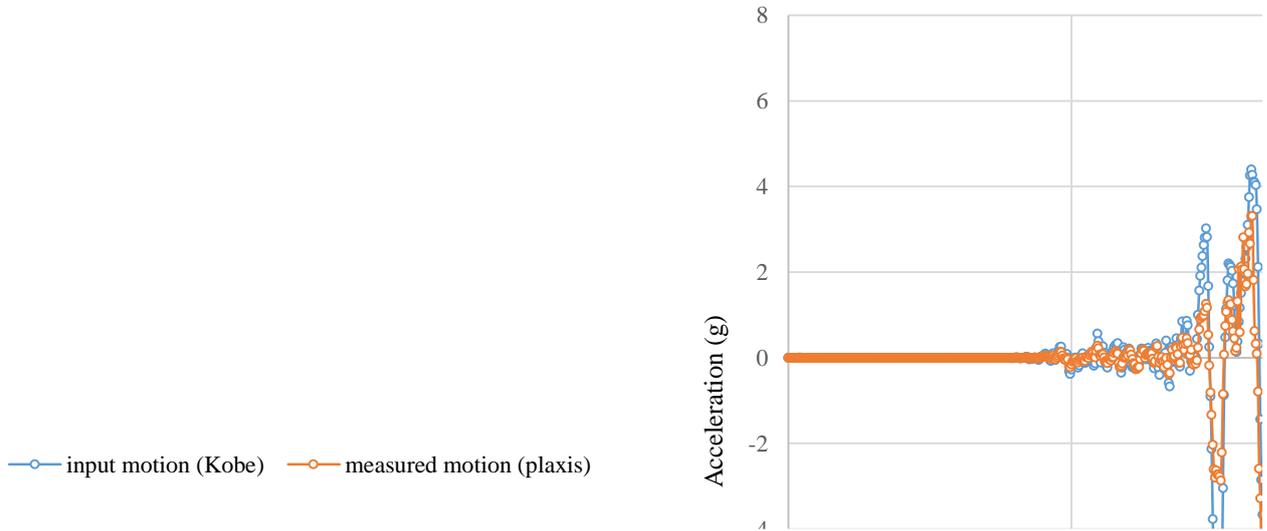


Fig. 2. Shows the acceleration time history of the recorded Kobe earthquake motion (PGA = 0.80g) vs measured motion (PLAXIS)

Results

The soil slope without piles underwent considerable horizontal and vertical displacements during the earthquake. The highest horizontal displacement was around 0.363 m at the slope's crest, while the maximum vertical displacement was about 0.295 m at the foundation. The surface load also contributed to the slope deformation, resulting in a total displacement of 0.5287 meters.

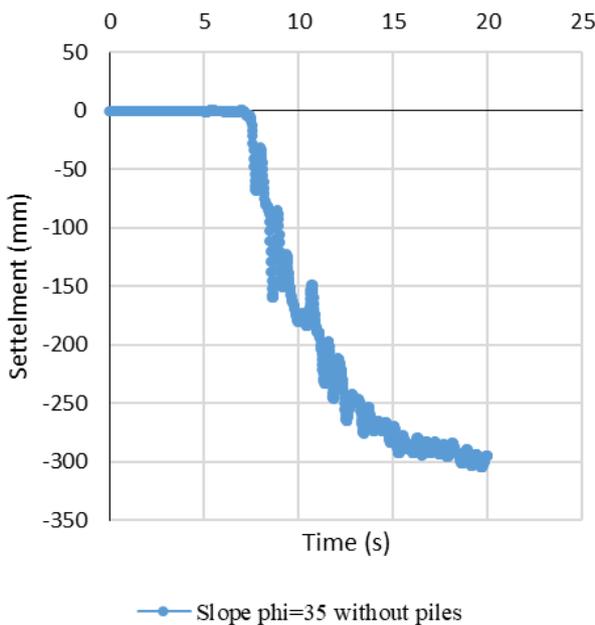


Fig. 3. V.D. for footing after earthquake

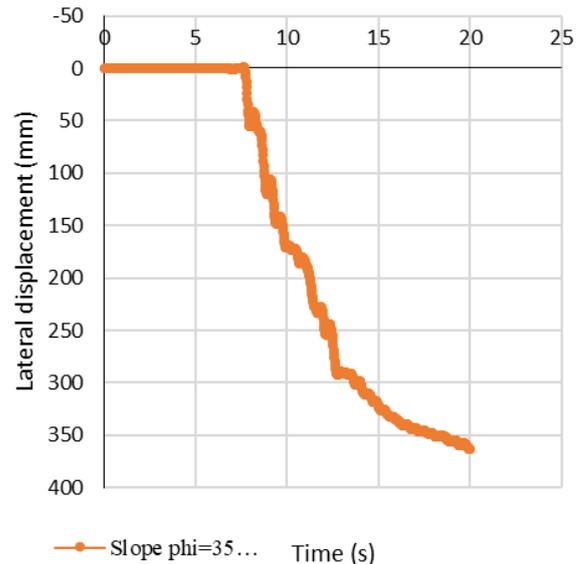


Fig. 4. H.D. for the crest after an earthquake

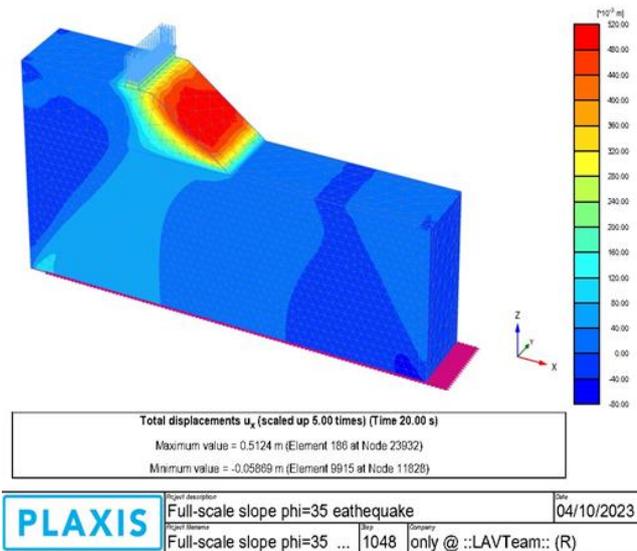


Fig. 5. Total horizontal displacements U_x for Crest soil slope without piles after the earthquake

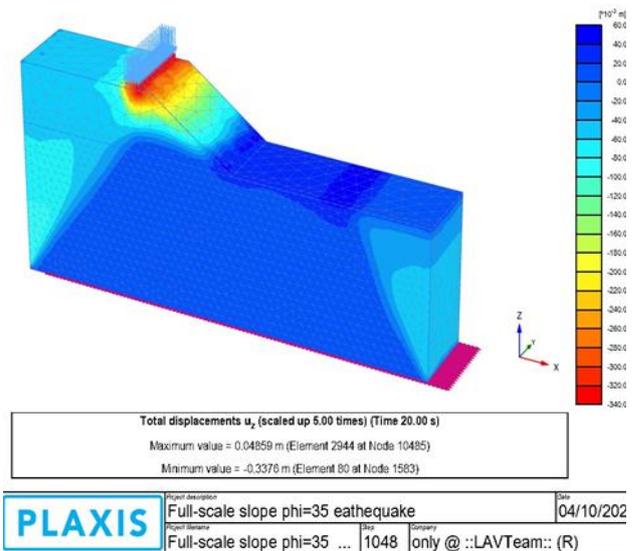


Fig. 6. Footing total vertical displacements U_z without piles after the earthquake

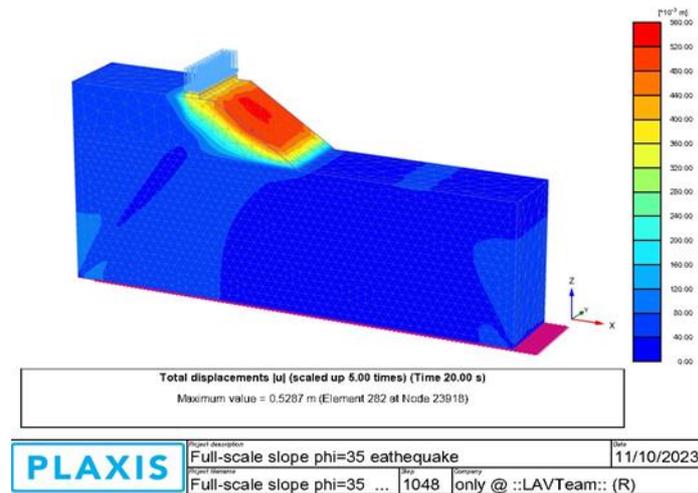
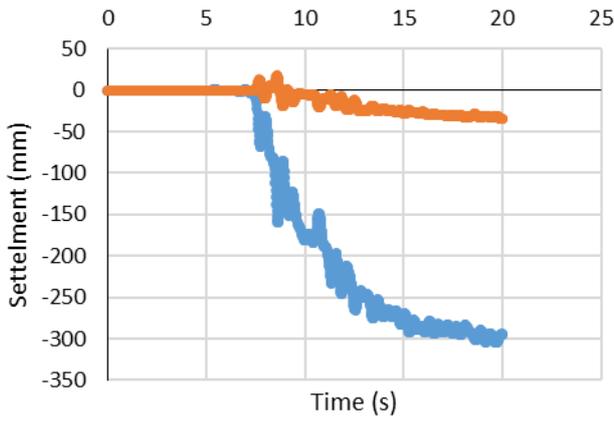


Fig. 7. Total displacements $|U|$ for soil slope without piles after the earthquake

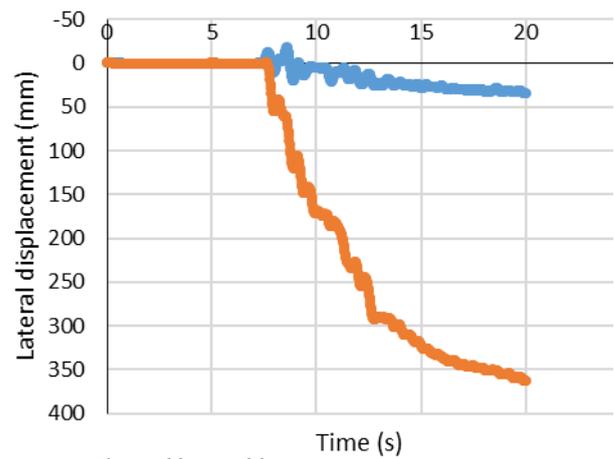
The use of piles at $L=h$ (height slope), resulted in efficient slope stabilization, reducing displacements and boosting safety. The piles served as anchors, distributing the weight to deeper soil layers while resisting the slope lateral displacement. The safety factor of the slope without piles was around 1.05, whereas the safety factor of the slope with piles was approximately 1.62. The results also demonstrate that soil nonlinearity and damping had a substantial effect on the slope's reaction. The nonlinear nature of soil reduced stiffness while increasing damping, which resulted in less displacements and stresses. Damping also dissipated some of the earthquake energy input, reducing the ground motion amplification, the horizontal displacement was reduced from 0.363 to 0.0346 m, vertical displacement from 0.295 to 0.0346 m, and total displacement from 0.5287 to 0.01156 m. Figures (8, 9).

Soil movement both before and after the placement of piles was studied. PLAXIS 3D, a software program that uses the finite element method to predict the behaviour of soil and rock structures, was used to evaluate and discuss the soil displacement in front of and behind the piles placed on a sandy soil slope under the Kobe earthquake loading. The slope consisted of a layer of sand, and the piles were shown as embedded beams of varied lengths and patterns. The studied dynamic loading was based on the Kobe earthquake data. The research demonstrated that parameters such as the quantity and configuration of piles, the angle and saturation level of the slope, and the capacity of soil for liquefaction, all had an impact on soil displacement. The piles aided in stabilizing the slope by providing lateral support, which minimized soil movement in their proximity. Nevertheless, they also led to increased soil displacement behind them as a result of a drag effect. Steep slopes prone to collapse have more significant soil displacement.



— Slope phi=35 with piles
— Slope phi=35 without piles

Fig. 8. V.D. for footing after the earthquake



— Slope phi=35 with piles
— Slope phi=35 without piles

Fig. 9. H.D. for the crest of the slope after an earthquake

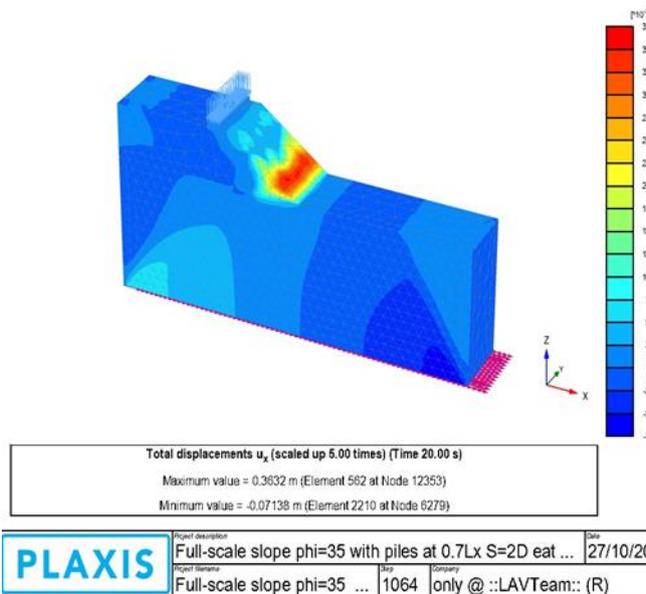


Fig. 10. Total horizontal displacements U_x for crest with piles after the earthquake

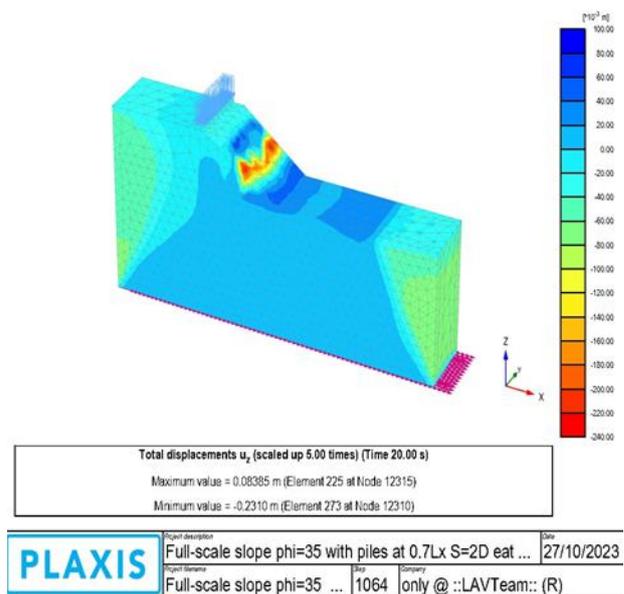


Fig. 11. Footing total vertical displacements U_z with piles after the earthquake

Within the study soil displacement was measured by analyzing the horizontal motion, vertical settlement, and total displacement. Researchers evaluated several cases to determine the efficiency of a design for stabilizing the piles. During an earthquake, the soil and piles on a slope are convoluted with seismic waves, resulting in complex soil movement around the piles. The soil movement may either enhance or hinder the efficiency of the piles and impact the stability of the slope, depending on the set of conditions.

While the pile is being subjected to pressure as a result of the motion of the soil above the slip surface, the soil in front of the pile is being displaced as a result of the pressure. The displacement caused by the arrangement and spacing of the piles may have an impact on the resistance of the piles by causing the development of axial and lateral forces. Thus the displacement has an effect on the piles. There is a number of elements that may have an effect on the displacement of the soil. Some of these factors include the severity of the slope, the distance from the pile to the crest of the soil, as well as the ferocity and period length of the earthquake [19]. Using piles resulted in a large reduction in the overall displacement in front of the piles, from 0.520 meters to 0.0480 meters. This is seen in Figure (13), which shows that the total displacement decreased significantly.

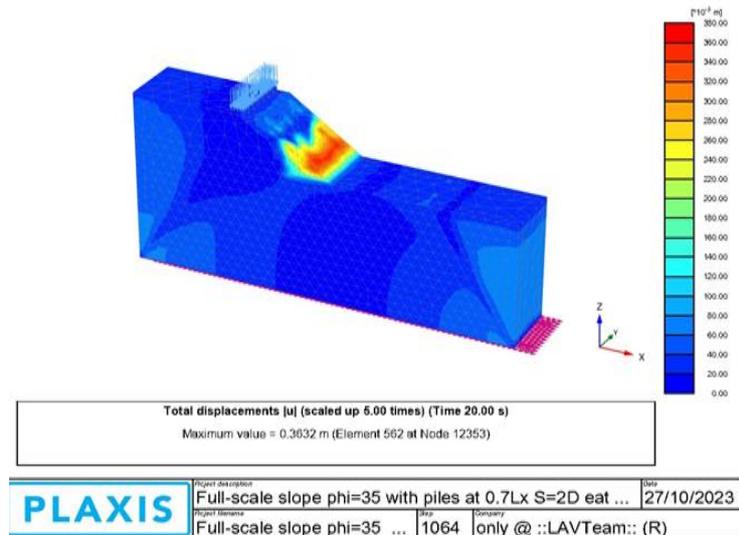


Fig. 12. Total displacements $|U|$ for soil slope with piles after the earthquake

During a landslide, the movement of soil that is confined by a pile that is positioned in the soil layer under the slip surface is referred to as “soil displacement behind a pile”. During this movement, shear and bending loads are applied to the pile, which may result in the pile becoming weaker and more deformed. Along with the frequency and magnitude of the earthquake, the shape, length, diameter, and material of the pile, as well as the pile itself, may have an effect on the soil displacement behind the pile [20].

Due to differences in the behaviour of the soil surrounding the piles, there was a greater amount of soil displacement behind the piles than there was in front of them. The piles served as solid structures that prevented the lateral movement of soil in front of them, forming an area known as the passive earth pressure range. There was less lateral movement in this location, which contributed to the slope increased stability. The soil, on the other hand, moved along the anchored piles, which resulted in the formation of an active earth pressure range. This zone increased horizontal displacement and impaired slope stability. The piles' drag effect on the earth led to the rise in soil displacement behind them. The magnitude of this force depended on the pile length, diameter, spacing, and configuration, as well as the soil properties and loading conditions. Therefore, there was a compromise between reducing the soil displacement in front of the piles and increasing it behind them. Total displacement behind piles was 0.363 m figure (13).

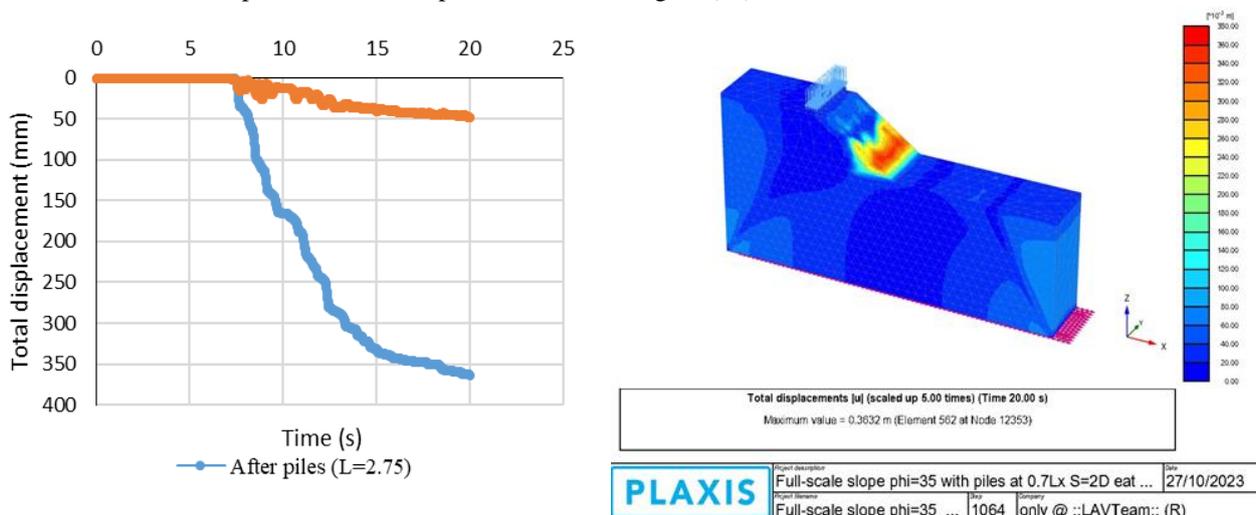


Fig. 13. Total displacement $|u|$ in front of and behind the piles

The numerical analysis findings obtained with PLAXIS 3D demonstrate that using piles to stabilize slopes for the case of an earthquake is a practical and reliable strategy. The piles can improve the slope safety factor by decreasing the driving force and raising the resisting force. The piles can help to reduce the slope deformation and displacement during seismic stress. The findings are compatible with the design regulations and recommendations of Eurocode 7, the Federal Highway Administration (FHWA), and the Terzaghi standards, which govern the geotechnical elements of slope stability and pile design. As a consequence, the findings may be regarded relevant and satisfactory for the project, as shown in table 2.

Table 2

Numerical analysis results using PLAXIS 3D with standard geotechnical limits

According to Eurocode 7	L.D. less than 1/150 of H slope = $0.0067 \times 4\text{m} = 0.0267\text{m}$	V.D. less than 1/100 of the H slope = $0.01 \times 4 = 0.04\text{ m}$
According to FHWA	L.D. does not exceed 0.5% of the pile length = $0.005 \times 2.75 = 0.01375\text{m}$	V.D. does not exceed 0.25% of the pile length = $0.0025 \times 2.75 = 0.0069\text{m}$
According to Terzaghi	L.D. should not exceed 0.3% of the pile length = $0.003 \times 2.75 = 0.00825\text{ m}$	V.D. should not exceed 0.15% of the pile length = $0.0015 \times 2.75 = 0.004125\text{ m}$
Slope deformation without piles	L.D. = 0.363 m	V.D. = 0.295 m
Slope deformation reinforced with piles $L = h$	L.D. = 0.035 m	V.D. = 0.0346 m

The big amount of horizontal displacements during an earthquake may be accurately measured in two locations: the crest and beneath the pile. Earthquakes can induce considerable horizontal displacements in sandy soil slopes, resulting in slope collapses or severe deformations. The horizontal displacement of the slope is determined by the earthquake dynamic loading, soil qualities, slope geometry, and the existence of stabilizing piles. The horizontal displacement may be measured at many points along the slope, including the crest, footing, and in front of and behind the pile position.

The arrangement and location of the piles influence the vertical displacement of the soil. Vertical displacement is greater directly under the foundation due to the weight transfer to the sandy soil, which can lead to soil settlement or lifting depending on the interaction between the piles and the soil. Using piles to stabilize soil slopes during earthquakes may efficiently reduce both vertical and horizontal soil displacement, if the exact modification of pile properties is taken into account.

Discussion and Conclusion. The study indicates that soil has more horizontal displacements under a pile and at the crest of the slope during seismic events compared to the other areas. The pile provides resistance against the sliding forces and decreases soil deformation in its proximity because of the sensibility of the crest to seismic effects. A gap opens behind the pile, causing soil displacement and rising movement. Analyzing and calculating the horizontal displacement in important areas is vital for understanding the earthquake effect on sandy soil slopes stabilized by row piles. As a result of using the piles for the purpose of stabilizing soil slopes, the least amount of soil displacements occurred in both the horizontal and vertical directions, which proves to be a good result. Piles may be used as structural components to stabilize soil slopes in places that are prone to earthquakes. This is something that can be done in places where earthquakes are common. It is possible for piles to increase the safety factor of a slope by reducing the amount of soil deformation that occurs and by having the capacity to withstand sliding forces. The soil displacement is affected by a number of factors, including the diameter of the piles, their spacing, and their stiffness. There is a possibility that the efficiency of restricting soil movement might be improved by the use of piles that are more robust, have larger diameters, and are positioned in closer proximity to one another. It is possible to carry out the assessment of soil displacement by collecting measurements at a number of various locations along the slope. These locations include the crest, the footing, and position both in front of and behind a pile. There is a possibility for the earthquakes to induce the significant vertical movements of sandy soil slopes, which may have an impact on the foundation capacity to operate and its stability. There is a wide variety of factors that have the potential to influence the process of vertical displacement. Some of these factors include the geometry of the slope, the properties of the soil, the dynamic seismic stress, and the existence of reinforcing piles. Within studying the vertical displacement of a slope, it is essential to evaluate the crest of the slope, the footing level, and a variety of various locations both in front of and behind the piles.

Список литературы / References

1. Кан К., Зеркаль О.В., Лю Ц. Сравнительный анализ учета сейсмического воздействия при количественной оценке устойчивости склонов в России, Китае и Европе. В: *Материалы докладов XIII Общероссийской конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»*. Москва: Геомаркетинг; 2017. С. 533–540. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32741019> (дата обращения: 23.07.2024).

Kang K, Zerkal OV, Liu C. Comparative Analysis of Taking into Account Seismic Impact in Quantitative Assessment of Slope Stability in Russia, China and Europe. In: *Proceedings of the XIII All-Russian Conference of Survey Organizations "Prospects for the Development of Engineering Surveys in Construction in the Russian Federation"*. Moscow: Geomarketing; 2017. P. 533–540. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32741019> (accessed: 23.07.2024).

2. Кан К., Зеркаль О.В., Фоменко И.К., Пономарев А.А. Современные подходы к количественной оценке устойчивости склонов при сейсмическом воздействии. *Инженерная геология*. 2018;13(1–2):72–85. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-1-2-72-85>

Kang K, Zerkal OV, Fomenko IK, Ponomarev AA. Modern Approaches to the Quantitative Assessment of Slope Stability under Seismic Conditions. *Inzhenernaya geologiya (Engineering Geology)*. 2018;13(1–2):72–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-1-2-72-85>

3. Кан К., Зеркаль О.В., Пономарев А.А., Фоменко И.К. Вероятностный анализ устойчивости склонов на основе обобщенного критерия Хоека-Брауна при сейсмическом воздействии. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2021;(3):11–16. <https://elibrary.ru/item.asp?id=46397799> (дата обращения: 23.07.2024).

Kang K, Zerkal OV, Ponomarev AA, Fomenko IK. Probabilistic Slope Stability Assessment under Seismic Conditions Based on the Generalized Hoek-Brown Criterion. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2021;(3):11–16. (In Russ.) <https://elibrary.ru/item.asp?id=46397799> (accessed: 23.07.2024).

4. Ye Sh, Shi Y. Reliability Analysis of Slope Reinforced by Anchors under Earthquake Action. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2022;59(4):376–384. <https://doi.org/10.1007/s11204-022-09825-4>

5. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Шварев С.В., Лутиков А.И., Новиков С.С. Оценка уровня сейсмической опасности района Большого Сочи в связи со строительством олимпийских объектов. *GeoRisk*. 2008;(4):6–12. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12774227> (дата обращения: 23.07.2024).

Rogozhin EA, Ovsyuchenko AN, Shvarev SV, Lutikov AI, Novikov SS. Assessment of the Seismic Hazard Level of the Greater Sochi Region in Connection with the Construction of Olympic Facilities. *GeoRisk*. 2008;(4):6–12. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12774227> (accessed: 23.07.2024).

6. Фоменко И.К., Захаров Р.Г., Самаркин-Джарский К.Г., Сироткина О.Н. Учет сейсмического воздействия при расчете устойчивости склонов (на примере Краснополянского геодинамического полигона). *GeoRisk*. 2009;4:50–55. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13502840> (дата обращения: 23.07.2024).

Fomenko IK, Zakharov RG, Samarkin-Dzharsky KG, Sirotkina ON. Taking Into Account Seismic Impact in Calculating Slope Stability (Using the Krasnopolyansky Geodynamic Test Site as An Example). *GeoRisk*. 2009;(4):50–55. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=1350284> (accessed: 23.07.2024).

7. Кропоткин М.П. Некоторые аспекты оценки влияния сейсмических воздействий на устойчивость склонов (на примере осваиваемой прибрежной зоны Западного Кавказа). *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2020;2:16–27. <https://doi.org/10.31857/S086978092002006X>

Kropotkin MP. Some Aspects of the Influence of Seismic Impacts on the Slope Stability (by the Example of the Developed Coastal Zone in the West Caucasus). *Geocology. Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya. (Engineering geology, hydrogeology, geocryology)*. 2020;2:16–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S086978092002006X>

8. Гридневский А.В., Прокопов А.Ю. Природно-техногенные условия формирования подтопления межбалочных пространств города Ростова-на-Дону. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2019;2:26–37. <https://elibrary.ru/item.asp?id=38509754> (дата обращения: 23.07.2024).

Gridnevskiy AV, Prokopov AYU. Natural and Technological Conditions of Formation Flooding Between Hollows in the City of Rostov-on-Don. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2019;2:26–37. (In Russ.) <https://elibrary.ru/item.asp?id=38509754> (accessed: 23.07.2024).

9. Прокопов А.Ю., Лебидко В.А. Выбор и обоснование методов берегоукрепления (на примере р. Кубань в г. Краснодаре). *Известия Ростовского государственного строительного университета*. 2015;20:41–48. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25294277> (дата обращения: 23.07.2024).

Prokopov AYU, Lebidko VA. Selection and Justification of Coastal Protection Methods (On the Example of the Kuban River in Krasnodar). *Izvestiya Rostovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta (News of the Rostov State University of Civil Engineering)*. 2015;20:41–48. (In Russ.) <https://elibrary.ru/item.asp?id=25294277> (accessed: 23.07.2024).

10. Стром А.Л., Калинин Е.Г., Ломоносов А.А. О специфике учёта сейсмических воздействий при проектировании сооружений, предназначенных для защиты от наводнений. *Гидротехническое строительство*. 2023;(6):2–7. <https://elibrary.ru/item.asp?id=54802079> (дата обращения: 23.07.2024).

Strom AL, Kalinkin EG, Lomonosov AA. About Specifics of Consideration of Strong Motion for the Flood Protection Structures' Design. *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo (Hydrotechnical Construction)*. 2023;(6):2–7. <https://elibrary.ru/item.asp?id=54802079> (accessed: 23.07.2024).

11. Прокопов А.Ю., Жур В.Н., Рубцова Я.С. Проблемы обеспечения безопасности городской застройки на подработанных территориях Восточного Донбасса. В: *Материалы юбилейной конференции, посвященной 25-летию образования ИГЭ РАН «Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные*

проблемы и прикладные задачи». Москва: Российский университет дружбы народов; 2016. С. 346–351. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25885381> (дата обращения: 23.07.2024).

Prokopov AYu, Zhur VN, Rubtsova YaS. Problems of Ensuring the Safety of Urban Development in the Underworked Territories of the Eastern Donbass. In: *Proceedings of the Conference Dedicated to the 25th Anniversary of the Formation of the IGE RAS "Sergeev Readings. Engineering Geology and Geoecology. Fundamental Problems and Applied Objectives"*. Moscow: RUDN University; 2016. P. 346–351. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25885381> (accessed: 23.07.2024).

12. Цомин В.Ю., Хататаев А.У., Петляков В.С., Проколова М.В. Проектирование объектов транспортной инфраструктуры в сейсмических районах. В: *Труды конференции «Транспорт: наука, образование, производство»*. Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения; 2020. С. 363–366. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44143300> (дата обращения: 23.07.2024).

Tsomin VYu, Khatataev AU, Petlyakov VS, Prokopova MV. Design of Objects of Transport Infrastructure in Seismic Areas. In: *Proceedings of the Conference "Transport: Science, Education, Production"*. Rostov-on-Don: Rostov State University of Railway Engineering; 2020. P. 363–366. (In Russ.) <https://elibrary.ru/item.asp?id=44143300> (accessed: 23.07.2024).

13. Ponomarev A.A., Zerkal O.V., Samarin E.N. Protection of the Transport Infrastructure from Influence of Landslides by Suspension Grouting. *Procedia Engineering*. 2017;189:880–885. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.137>

14. Zhang W, Wang TY, Wu HG, Yuan Y, Zhou AH. Remote Boundary for Numerical Simulations of Soil Slope Response to Earthquakes. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2023;60(5):459–465. <https://doi.org/10.1007/s11204-023-09915-x>

15. Гайджуров П.П., Савельева Н.А., Труфанова Е.В. Численное моделирование поведения кинематически нестабильных склонов при динамических воздействиях. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2021;21(4):300–307. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-300-307>

Gaidzhurov PP, Saveleva NA, Trufanova EV. Numerical Simulation of the Behavior of Kinematically Unstable Slopes under Dynamic Influences. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2021;21(4):300–307. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-300-307>

16. Al-Jeznawi D, Alzabeebee S, Mohammed Shafiqu QS, Güler E. Analysis of Slope Stabilized with Piles under Earthquake Excitation. *Transportation Infrastructure Geotechnology*. 2024;11:197–215. <https://doi.org/10.1007/s40515-022-00265-z>

17. Gong WB, Li JP, Li L. Limit Analysis on Seismic Stability of Anisotropic and Nonhomogeneous Slopes with Anti-Slide Piles. *Science China Technological Sciences*. 2018;61(1):140–146. <https://doi.org/10.1007/s11431-017-9147-8>

18. Jacob AS, Venkataramana K. Slope Stability Analysis Under Earthquake Load Using Plaxis Software. *Journal of Advances in Geotechnical Engineering*, 2021;3(3):1–8. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4432296>

19. Zhang AJ, Mo HH, Zhang JC. Analytical Prediction for Piles Used for Slope Stabilization. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2016;53(2):108–118. <https://doi.org/10.1007/s11204-016-9373-9>

20. Pantelidis L, Griffiths DV. Footing on the Crest of Slope: Slope Stability or Bearing Capacity? In: *Proceedings of the Conference "Engineering Geology for Society and Territory"*. Volume 2. Lollino G, Giordanet D, Crosta GB, Corominas J, Azzam R, Wasowski Janusz, et al (Eds). Cham: Springer; 2015. P. 1231–1234. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_215

Об авторах:

Аль-Екаби Хаки Хади Аббуд, аспирант кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов Донского государственного технического университета (344003, Россияская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/), haqqi@uowasit.edu.iq

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](https://orcid.org/), [ScopusID](https://orcid.org/), [ORCID](https://orcid.org/), prokopov72@rambler.ru

Никита Александрович Адоньев, аспирант кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов Донского государственного технического университета (344003, Россияская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), nikitaad1999@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Аль-Екаби Хаки Хади Аббуд: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, разработка моделей склонов.

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

Н.А. Адоньев: анализ отечественного и зарубежного опыта моделирования склонов с учетом сейсмических воздействий, формирование и оформление библиографического списка.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

Al-Eqabi Haqi Hadi Abbood, Postgraduate Student of the Engineering Geology, Footings and Foundations Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation, 344003), [ORCID](#), haqji@uowasit.edu.iq

Albert Yu. Prokopov, Dr.Sci. (Engineering), 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

Nikita A. Adoniev, Postgraduate Student of the Engineering Geology, Footings and Foundations Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation, 344003), niki-taad1999@gmail.com

Claimed Contributorship:

Al-Eqabi Haqi Hadi Abbood: formulating the main concept, aim and objectives of the research, developing the slope models.

AYu Prokopov: scientific supervision, research results' analysis, refining the text, formulating conclusions and recommendations.

NA Adoniev: analysis of national and foreign experience in slope modeling taking into account seismic impacts, compiling and designing the 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 05.10.2024

Поступила после рецензирования / Revised 15.11.2024

Принята к публикации / Accepted 30.11.2024

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS



УДК 691.42; 72.023

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-41-54>

Взаимосвязь эстетических и технологических свойств лицевого керамического кирпича

Ю.И. Небежко, К.А. Лапунова

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

[✉ keramik_kira@mail.ru](mailto:keramik_kira@mail.ru)



EDN: YDIXEN

Аннотация

Введение. В настоящее время актуальной задачей отечественной керамической отрасли является выпуск строительных изделий высокого качества с заданными эстетическими характеристиками. Лицевой кирпич как традиционный строительный материал продолжает занимать одно из ведущих мест в современном строительстве. Однако сегодня в России сложилась тенденция в потребности элитного кирпича с ярко выраженными эстетическими качествами: цвет, фактура, комбинаторность. В ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия» таким характеристикам кирпича должного внимания не уделено, нет определений, и не прописаны критерии оценки качества. Для этого необходимо изучить взаимосвязь технологических параметров производства и эстетических возможностей кирпича. На примере кирпича мягкой формовки мы рассмотрели варианты цветового декора (глазурь) и фактурного рисунка с учетом прямой зависимости «технология — эстетика».

Материалы и методы. Для исследований использовался кирпич мягкой формовки с полиструктурной фактурой производства ООО «Тандем-ВП» (г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация). Глазурь для декорирования была получена на основе фритты марки ГП-2 Лысьвенского завода силикатных фритт. При изучении взаимосвязи эстетики и технологии керамического кирпича использовался метод сравнительного анализа декоративных свойств и процесса их получения, выявлялись исторические закономерности влияния технологий на внешний вид изделий. На основании этого разработаны классификации по видам декорирования и фактурной поверхности кирпича, расширена терминология, связанная с эстетическими критериями, что является определенным шагом в подготовке дополнений к существующему ГОСТу или разработке нового.

Результаты исследования. Полученные варианты глазурованной поверхности кирпича мягкой формовки имеют разные эстетические эффекты в зависимости от состава глазури и технологии ее нанесения: гладкая блестящая поверхность, неравномерная с фрагментами без глазури, так называемая «пятнистая» поверхность, с подчеркиванием фактуры. Составлена таблица соответствий технологии нанесения глазури и получаемой поверхности. Фактурный «рисунок» поверхности при формовании кирпича ручным способом также структурирован в таблицу, и дана терминология. Данные результаты войдут в разработку производственной технологической линии по декорированию кирпича мягкой формовки.

Обсуждение и заключения. Предлагаемые системы классификации позволяют выявить прямую связь «технология — декор», данные могут корректироваться и уточняться при их прикладном использовании для определенного керамического производства. Установлено, что на получение заданной эстетической поверхности кирпича влияют: глинистое сырье, добавки, метод формования кирпича, материал для декорирования, процесс декорирования, сушка, обжиг. В данной работе нами затронуты в основном сырьевые материалы, метод формования и способ нанесения декора. Тема изучения взаимосвязи эстетических и технологических свойств очень ёмкая, нами она будет рассматриваться поэтапно. Полученные выводы и проведенный анализ результатов интересен для архитекторов, технологов, производственников, дистрибьюторов и керамистов в целом.

Ключевые слова: кирпич, технология производства, мягкое формование, декор, фактура, цвет, глазурь, поверхность, вид, декорирование

Для цитирования. Небежко Ю.И., Лапунова К.А. Взаимосвязь эстетических и технологических свойств лицевого керамического кирпича. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(4):41–54. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-41-54>

Original Empirical Research

Interrelation between Aesthetic and Technological Properties of the Face Ceramic Brick

Yurii I. Nebezhko, Kira A. Lapunova ✉ 

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

✉ keramik_kira@mail.ru

Abstract

Introduction. Nowadays, production of high-quality building products with the given aesthetic properties is a relevant objective for the national ceramic manufacturing industry. The face brick still occupies one of the leading places in the up-to-date construction as one of the traditional building materials. However, at present a trend demand is being formed in Russia for the high-end brick with the explicit aesthetic properties: colour, texture, combinability. In GOST 530-2012 “Ceramic Brick and Stone. General Specifications” such characteristics of brick are not properly specified, neither definitions are given nor the criteria for assessing the quality are defined. Therefore, it is necessary to study the interrelation between the technological parameters of manufacturing and the aesthetic potential of a brick. On the example of the soft-moulded brick, we have studied the variants of colour decor (glaze) and textured pattern taking into account the direct “technology — aesthetics” correlation.

Materials and Methods. A soft-moulded brick of the multi-structural texture manufactured by “Tandem-VP” LLC (Novocherkassk, Rostov Region, Russian Federation) was used in the research. The glaze for decoration was obtained on the basis of GP–2 grade frit of the Lysva Plant of Silicate Frits. When studying the interrelation between the aesthetics and technology of ceramic brick, the method of comparative analysis of decorative properties and the process of obtaining thereof was used, the historical regularities in the influence of technologies on the appearance of the products were identified. Based on the above, the classifications by types of decoration and textured surfaces of brick were developed, the terminology referring to the aesthetic criteria was extended making a certain step towards preparing the supplements to the existing GOST or developing a new one.

Results. The obtained variants of the glazed surface of the soft-moulded brick have different aesthetic effects depending on the composition of the glaze and the technology of its application: a smooth shiny surface, uneven surface with the unglazed fragments, the so-called “spotted” surface with an emphasis on the texture. A table of correspondence of the glaze application technology and the resulting surface has been compiled. The textured “pattern” of the surface of manually moulded brick has also been structured in a form of a table, and terminology has been assigned. These results will be taken into account when developing a technological processing line of soft-moulded brick decoration.

Discussion and Conclusion. The proposed classification frameworks allow us to identify the direct “technology — decor” correlation, the data can be adjusted and precised when applied to a specific ceramic production. It has been established that the following factors influence on brick surface obtaining the given aesthetic characteristics: clay raw materials, additives, brick moulding method, decoration material, decoration process, drying and firing. In this paper, we covered mainly the raw materials, moulding method and decor application method. Studying the interrelation between the aesthetic and technological properties has high research capacity, thus the topic will be investigated by us step by step. The conclusions drawn and the analysis of the results are of interest to the architects, technologists, production engineers, distributors and ceramists at large.

Keywords: brick, production technology, soft moulding, decor, texture, colour, glaze, surface, appearance, decoration

For Citation. Nebezhko YuI, Lapunova KA. Interrelation between Aesthetic and Technological Properties of the Face Ceramic Brick. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(4):41–54. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-41-54>

Введение. Кирпич всегда был самым популярным строительным материалом в силу своих технологических и эстетических характеристик. В настоящее время он также востребован. Однако сейчас задача производства кирпича переходит больше в область декоративной привлекательности. Неотъемлемые качественные показатели необходимо объединить с фактурно-цветовыми эффектами, которые становятся основой для архитектуры XXI века, когда на первый план выходят понятия устойчивости и ответственности, а также больше внимания уделяется психологической гармонии и поведению человека внутри архитектурного пространства [1].

Серьезность данной задачи состоит в знании и анализе маркетингового направления продаж кирпича, выпускаемых коллекций цветного декоративного кирпича, «модной динамики» востребованности данного изделия, заводских особенностей производства лицевого керамического кирпича (сырье, технологическая линия изготовления и декорирования, обжиг и др.) и финансовой выгоды. Заводы и дистрибьюторы дают свои «местные» маркетинговые названия кирпичу, что создает иллюзорный объем ассортимента (один и тот же цвет имеет несколько названий), трудности в подборе продукции и возможные разногласия между заказчиками, архитекторами, производителями. Нет общей классификации декоративной и цветовой поверхности кирпича [2].

К основным эстетическим свойствам кирпича относится форма, цвет, фактура. Эстетические свойства керамических материалов, также как и технологические, зависят от состава используемого глинистого сырья и технологического процесса производства изделий [3–5]. Если раньше процесс производства был направлен на изготовление качественного прочного кирпича как конструкционного строительного изделия, то сейчас кирпичу необходимо еще и «модный тренд» в виде колористического отличия от других производителей, фактурного рисунка или сочетания цвето-фактурного декора. Для современного строительного рынка Российской Федерации керамический кирпич интересен как элитный материал. И в этом у него ряд преимуществ, так как керамика имеет огромное множество декоративных техник, например, в отличие от бетона или стекла.

Современные коллекции лицевого кирпича известных производителей («Керма», «Терекс», «Браер», «Брик» и др.) имеют довольно широкую линейку ассортимента лицевого кирпича, однако очень похожи по цветам и шаблонному накатному рельефу. Интересен в плане эксклюзивности кирпич мягкой формовки. Большой выбор его представлен разными коллекциями кирпича фирмы «Тегса», произведенными на заводах Wienerberger в Голландии и Бельгии. Кирпич имеет уникальную фактуру, чем и интересен в эстетическом плане. В Российской Федерации кирпич мягкой формовки успешно выпускается ООО «Тандем-ВП» в г. Новочеркасске (Ростовская область).

Чтобы российскому предприятию выбрать перспективное направление выпуска декорированного кирпича, необходимо не только знать и мониторить выпускаемые коллекции отечественных и западных производителей, проводить маркетинговые исследования, но и стараться предвосхищать заранее модные тенденции на выпускаемый продукт с учетом спроса.

Выбор той или иной техники декорирования на производстве также имеет сильную зависимость от сырьевого состава, метода формообразования кирпича, производственных мощностей и оборудования.

Таким образом, для производства лицевого кирпича с заданными эстетическими характеристиками учитываются следующие факторы: производственные возможности; маркетинговый мониторинг; прогнозирование и планирование.

Каждое предприятие выпускает кирпич по разработанным условиям по согласованию между потребителем и изготовителем. В основном ГОСТе 530-2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия» в пункте 5.1 о внешнем виде лицевого кирпича сказано, что он может иметь гладкую или рельефную поверхность, «с поверхностью, офактуренной торкретированием, ангобированием, глазурированием, двухслойным формованием или иным способом», и что изделия могут быть естественного цвета или объемно окрашенные. В ГОСТе РФ не прописаны иные виды декорирования поверхности кирпича, нет определений декоративному лицевому кирпичу с разными цветовыми и фактурными характеристиками, нет описания эталонного образца при приемочном контроле изделий. Можно сказать, что эстетические требования, как и варианты применения лицевого кирпича, определяемые его свойствами, выражены недостаточно.

Наша задача состоит в том, чтобы классифицировать виды декорирования кирпича в соответствии с их формообразованием на производстве, показать возможные современные направления декора кирпича и вычленил самые актуальные методы декорирования на сегодняшний момент.

В статье предлагается общая классификация декоративной поверхности кирпича, дается объективный анализ соответствия декорированной поверхности кирпича и технологии его декорирования в заводских объемах, рассматриваются три вида производства лицевого керамического кирпича с выявлением для каждого способа соответствующих техник декорирования.

Материалы и методы. Объектом исследования является кирпич мягкого формования производства ООО «Тандем-ВП» г. Новочеркаска (Ростовская область, Российская Федерация).

Данный кирпич, произведенный по технологии ручного заполнения форм массой, имеющей влажность выше формовочной, обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики кладки и создание декоративного эффекта «состаренной» поверхности.

Лицевой кирпич выпускается согласно требованиям ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия» и Техническим условиям на продукцию, разработанным предприятием-изготовителем. Основные физико-технические характеристики кирпича представлены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-технические показатели лицевого кирпича мягкого формования

Наименование показателя	Значение
Формат, размер	WDF; 215×102×65
Пустотность	полнотельный
Марка по морозостойкости	F50
Марка по прочности	M125
Средняя плотность, кг/м ³	1800 ± 50
Водопоглощение, %	8–11
Теплопроводность, Вт/м · °С	0,5–0,56
Предел прочности при изгибе, МПа	2,5
Предел прочности при сжатии, МПа	> 12,5

Основное отличие кирпича мягкого формования от лицевого кирпича, полученного другими способами производства, — уникальная фактурная поверхность с неповторимым текстурным «рисунком» [6, 7]. Если лицевой кирпич с гладкой поверхностью декорируется цветным ангобом, реже — глазурью, то цвет кирпичу мягкой формовки придается пока только окрашиванием в массе. В рамках данного исследования получены опытные образцы кирпича с глазурным декором с применением следующих способов: аэрографии или пульверизации, полива, окутывания, набрызга, фроттажа. Эти способы тоже служат примером взаимосвязи декора и технологии изготовления.

Методом визуального наблюдения и анализа были выявлены 7 видов фактурных поверхностей кирпича мягкого формования. Полиструктурный вид фактуры зависит от метода формования, влажности массы, силы броска массы в форму, правильности изъятия сырца из формы и др [8].

Методом сравнительного анализа с учетом исторических закономерностей была изучена взаимосвязь цвета, фактуры и технологии их изготовления.

Результаты исследования. Кирпич в архитектуре является древнейшим искусственным материалом, с помощью которого человек создавал пространство для своей жизни. Античный архитектор Марк Витрувий в своем труде «Десять книг об архитектуре» сформировал основные постулаты архитектуры и строительства: прочность — польза — красота [9]. Данное утверждение можно смело перенести на кирпич, где прочность кирпича определяет прочность всего здания; польза определяется тем, что кирпич является модулем для строительства; красоту кирпичу придает форма, декорирование и кладка. Отдельный кирпич не представляет ценности — вся его красота и польза видна в кладке. Поэтому при изготовлении кирпича учитывается его комбинаторность.

Керамический кирпич как конструкционный и декоративный материал был востребован у зодчих с древних времен. Обожженный кирпич чаще всего имеет так называемый терракотовый цвет, который уже традиционно стал эталоном кирпичной архитектуры. Но цвет глины разных месторождений при обжиге дает также разные цветовые оттенки, поэтому и цветовые характеристики обожженного кирпича варьируются от розового до темно-коричневого и даже черного. Природа сама позаботилась о колористическом разнообразии керамических изделий. Тем не менее, чтобы получить определенный цвет на производстве, нужно обладать знаниями и технологиями.

Эволюция применения декоративного лицевого кирпича очень разнообразна и имеет большую географию. Сырцовый кирпич разных размеров использовали в Древнем Египте, в Вавилоне создавали цветной рельефный глазурованный кирпич для облицовки, персидские мастера умело обжигали кирпич, возводили дворцы с изразцовыми фризами, в римской архитектуре использовали разнообразие типоразмеров кирпича и видов кладки, орнаментальная кладка с глазурованным изразцом украшает памятники Среднего Востока, архитекторы Западной Европы сочетали в постройках кирпич с майоликовым декором. В России XVII в. зодчие создавали храмы «русское узорочье», где использовали фигурный кирпич с глазурованными цветными изразцами. Во второй половине XIX в. архитекторы виртуозно использовали лицевой кирпич разных форм, размеров, цветов и комбинаторных сочетаний. В Англии это направление называлось «викторианским стилем», на территории России — «кирпичным стилем». В конце XIX — начале XX вв. лицевой кирпич применяли архитекторы стиля модерн [10].

В настоящее время эстетические свойства кирпича стали цениться архитекторами очень высоко. Именно лицевой кирпич отлично «работает» в сочетании с бетоном, стеклом и металлом, что характерно для современной архитектуры. Поэтому не случайно возникает потребность в производстве кирпича с заданными эстетическими характеристиками: форма, цвет, фактура [11].

Декорирование поверхности кирпича представляет собой совокупность методов и способов придания ему цвета и фактуры. Классификация видов декорирования кирпича представлена на рис. 1.

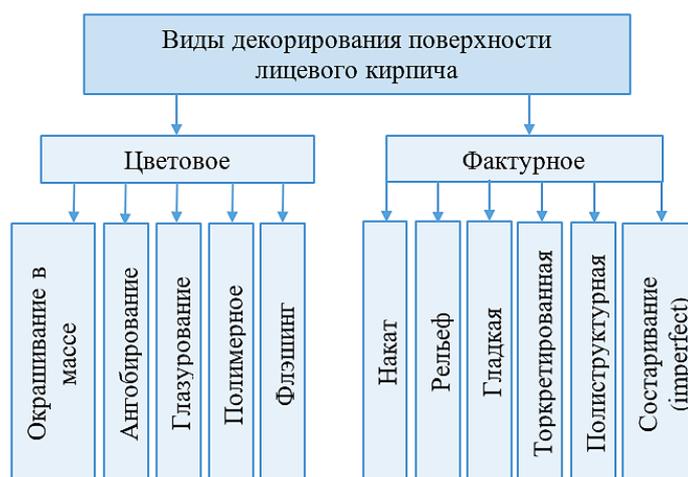


Рис. 1. Классификация видов декорирования поверхности кирпича

Производство является сложным процессом, где все «шаги» должны быть продуманы на этапе проектирования производства. Следовательно, необходимо понимать, как получают тот или иной декор или цветную поверхность лицевого кирпича. Декорирование происходит или одновременно с формообразованием кирпича, такие технологические линии нами определяются в основную подгруппу «Форма + декор» (рис. 2), или же в процесс изготовления встраивается дополнительный «шаг», где кирпич, например, глазуруют либо наносят торкрет в виде минеральной крошки перед процессом обжига. Такие технологические линии мы определяем в подраздел усложненных процессов «+ декор».

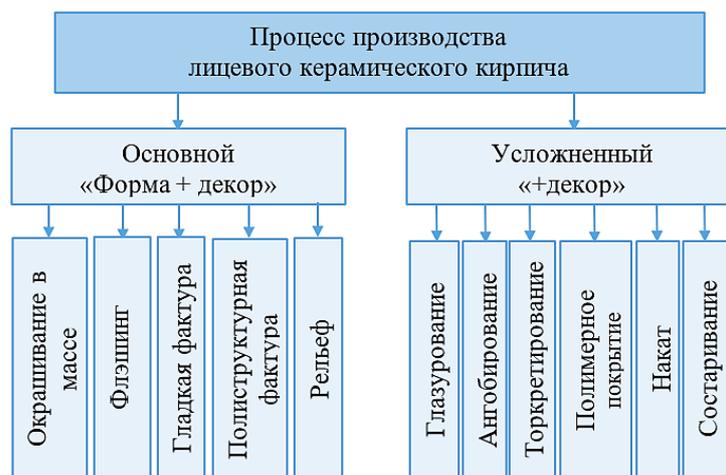


Рис. 2. Классификация лицевого кирпича по типу производственного процесса

Данное деление не определяет сложности процессов. Например, получение лицевого кирпича с полиструктурной фактурой относится к процессу «Форма + декор». В результате ручной формовки в формы кирпич приобретает данный вид уникальной фактуры, которую нельзя получить другим способом производства. При формовке кирпич одновременно приобретает и декоративность. Казалось бы, что это облегчает и удешевляет производство создания лицевого кирпича. Однако сложность состоит в системе подготовки глинистого сырья и самой формовке, где большую роль играет профессионализм и наработанные навыки мастеров (как бросить глиняную валушку, с какой силой, количество повторений и т.д.).

Другой декор — нанесение накатного рельефа. Чтобы его получить, достаточно встроить в процесс накатный ролик после выхода из экструдера глиняного бруса. Здесь тоже важна формовочная масса. Чтобы избежать деформации кирпича, формовочная масса должна обладать высокой пластической прочностью, которая характерна для высокодисперсных редко встречающихся полиминеральных глин.

Данная классификация показывает и уточняет, где процесс декорирования встраивается в формообразование кирпича, а где необходим дополнительный этап только декорирования.

Процесс производства керамического кирпича уходит в далекую древность, и на его эволюции интересно прослеживается развитие технологий и всего человечества. Особую важность в керамическом деле занимает процесс обжига и формообразования. Меняется процесс обжига, появляется новое оборудование для заводской формовки кирпича — совершенствуются керамические изделия и их эстетика.

Рассмотрим три вида производства лицевого кирпича: пластическое формование, полусухое прессование и мягкую формовку.

Пластическое формование кирпича производят с помощью экструдера из сырьевой массы влажностью 18–22 %. Глиняный брус нарезается на кирпич-сырец струнным аппаратом. Меняя форму мундштука, кирпич может производиться разных форм, а поверхность такого кирпича может быть ровной, гладкой или офактуренной с помощью специальной оснастки или роликов. Данный вид производства кирпича самый распространенный, так как один из самых производительных, и позволяет создать любой вид декоративной поверхности, кроме полиструктурной фактуры (рис. 3).

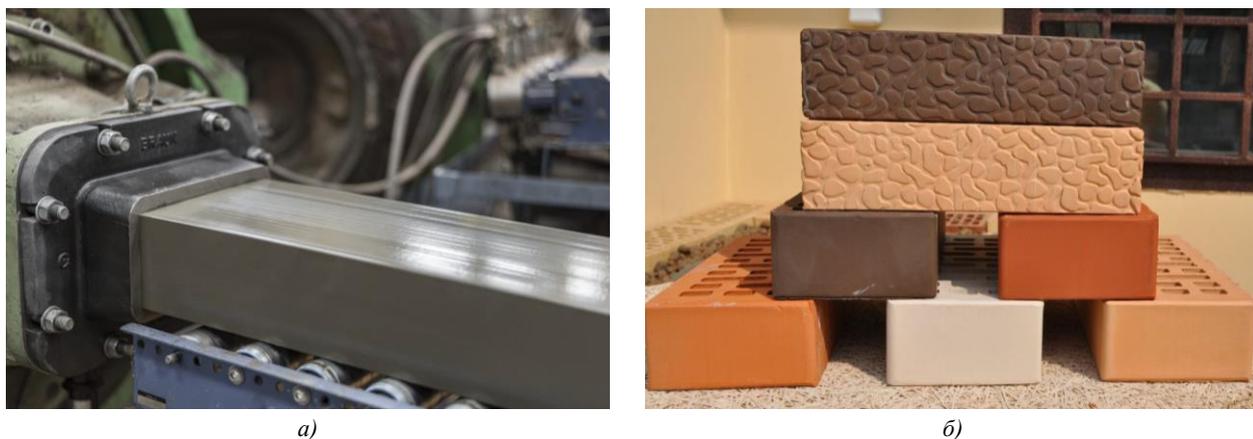


Рис. 3. Пластическое формование: *а* — мундштук вакуумного экструдера; *б* — виды лицевого кирпича

Способ полусухого прессования используют для малопластичных глин. Кирпич прессуется из пресс-порошка влажностью 9–12 %. Он имеет четкие ровные грани. Если в форму для прессования вставить металлический рельефный шаблон, то кирпич будет иметь четко пропечатанный заданный рельеф (орнамент, имитация поверхности или тематический рельеф). Такие виды рельефа нельзя получить другим способом. Все способы цветного декорирования кирпича встраиваются в процесс. Полусухое прессование, как и предыдущий способ, не дает получение полиструктурной поверхности.

Производство кирпича мягкой формовки направлено именно на получение лицевого кирпича с уникальной полиструктурной фактурной поверхностью. Ярко выраженный уникальный рисунок поверхности с замятинами и неровностями кирпич приобретает при формовании непосредственно вручную.

При этом большую роль на вид фактурной поверхности кирпича оказывают формовочные свойства керамических масс. Чем меньше критическое напряжение сжатия формовочной массы и больше степень деформации до определённого предела (состояния текучести), тем большую глубину рельефа можно получить на лицевой поверхности. Для кирпича мягкого формования критическое напряжение сжатия для формовочных масс составляет 0,5–5 кгс/см², для пластического экструзионного формования без вакуумирования — 5–10 кгс/см², с вакуумированием — 10–20 кгс/см² при соответствующих изменениях степени деформации образцов при формовании. Одним из основных факторов, влияющих на данные показатели, является водосодержание формовочных масс. На рис. 4 и 5 приведены зависимости влияния водосодержания формовочной массы на степень деформации образцов и критическое напряжение сжатия для типичных суглинков юга России из Новоаксайского месторождения.

Однако основной задачей технолога керамического производства является подбор составов керамических масс при заданных формовочных свойствах при минимальном их водосодержании. Это связано с тем, что с увеличением водосодержания возрастает воздушная усадка, чувствительность к сушке и время сушки. Наибольший результат для снижения водосодержания формовочных масс достигается при комплексном подходе: путём ввода отощителей определённого вещественного и зернового составов, а при мягком формовании — и путем ввода электролитов. Так ввод оптимального количества электролитов позволяет достичь необходимого критического напряжения сжатия при существенно меньшем водосодержании (рис. 6).

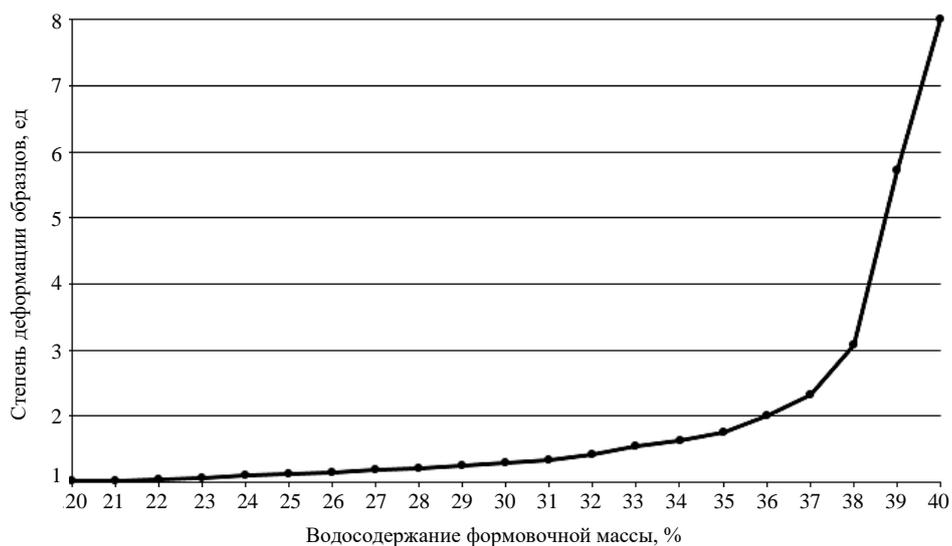


Рис. 4. Зависимость степени деформации образцов от водосодержания формовочной массы

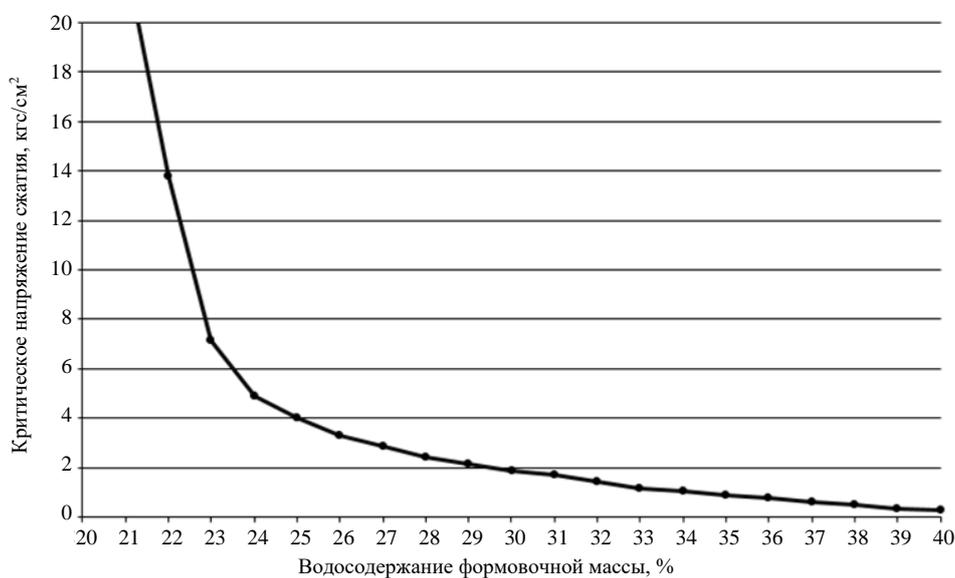


Рис. 5. Зависимость критического напряжения сжатия образцов от водосодержания формовочной массы

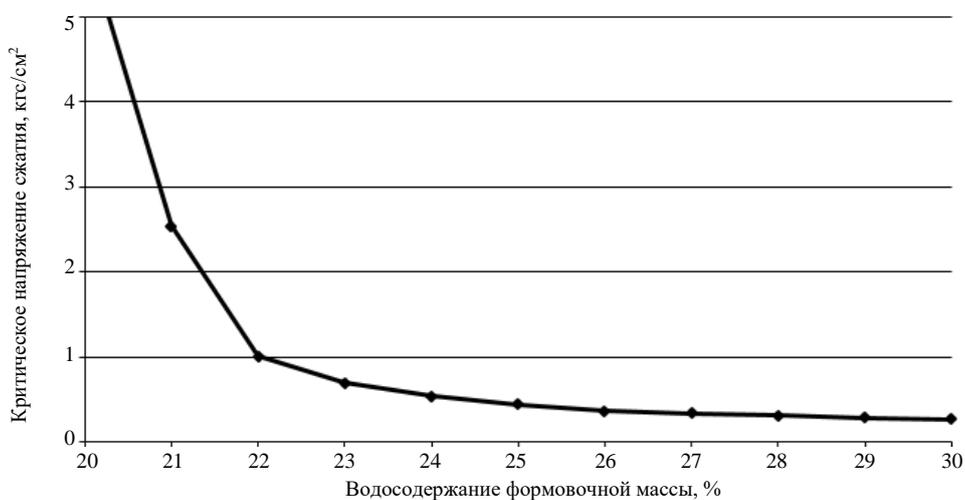


Рис. 6. Зависимость критического напряжения сжатия образцов от водосодержания формовочной массы при оптимальном содержании электролитов

Ввод кварцевого песка в состав формовочных масс также позволяет достичь необходимого критического напряжения сжатия и, соответственно, получения кирпича с необходимым видом фактурной поверхности при существенно меньшем водосодержании. На рис. 7 показано влияние количества зернового состава кварцевого песка в составе формовочных масс на основе типичных суглинков на критическое напряжение сжатия.

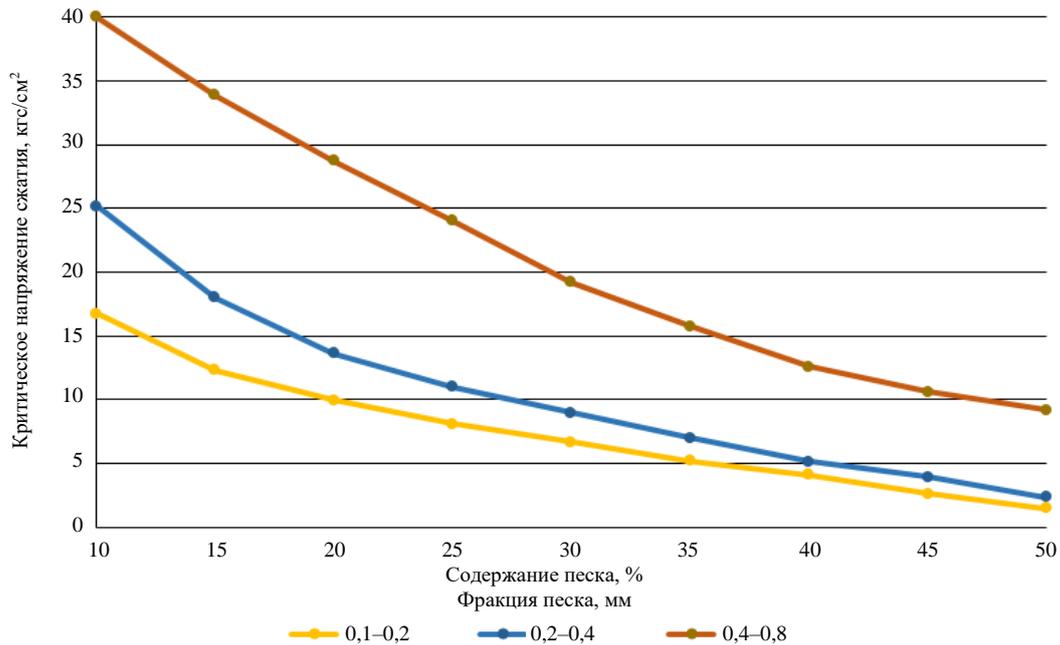


Рис. 7. Зависимость критического напряжения сжатия образцов от количества и зернового состава песка

Как видно, зерновой состав песка и его количество оказывают существенное влияние на формовочные свойства керамических масс при пластическом и мягком формовании. Таким образом, получение необходимой фактуры лицевого кирпича, которая может быть гладкой, шаблонной и полиструктурной, и каждая из которых имеет свои подвиды, во многом зависит от формовочных свойств керамических масс. Поиск взаимосвязи между технологическими особенностями производства и эстетическими характеристиками изделий — одна из важнейших задач при производстве лицевого керамического кирпича [12].

Нами выделено 14 разных фактурных поверхностей, где полиструктурная имеет 7 видов. Классификация фактурной поверхности лицевого кирпича представлена на рис. 8.

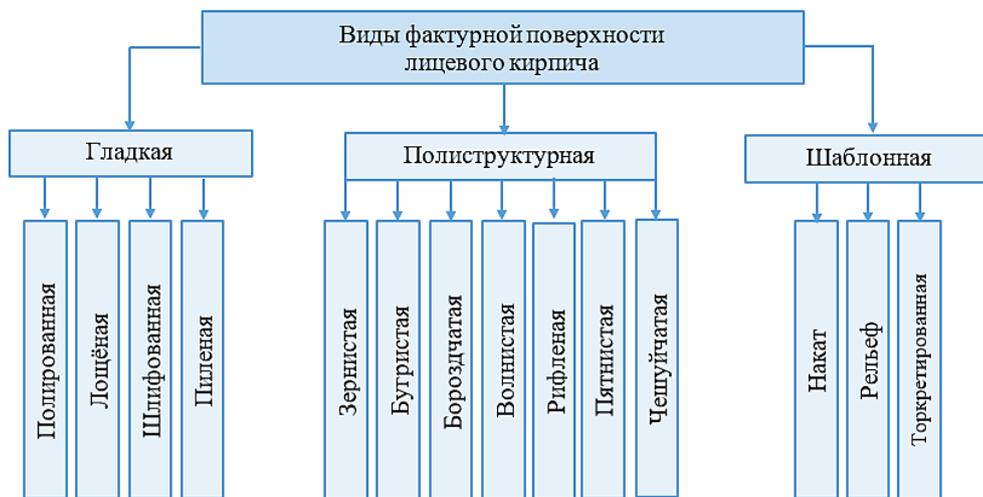


Рис. 8. Классификация фактурной поверхности лицевого кирпича

Соответствие вида полиструктурной поверхности и его определения представлены на рис. 9.

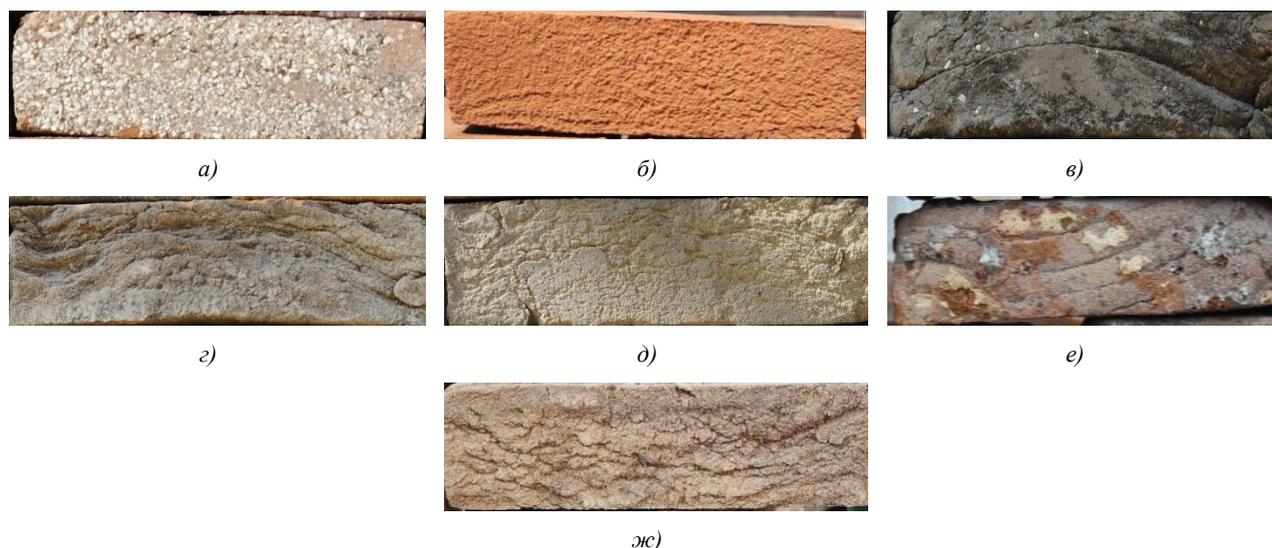


Рис. 9. Виды полиструктурной поверхности лицевого кирпича мягкого формования: *a* — зернистая; *б* — бугристая; *в* — бороздчатая; *г* — волнистая; *д* — рифлёная; *е* — пятнистая; *жс* — чешуйчатая

Понятие «фактуры» для лицевого кирпича в ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия» не прописано, нет её определения, видов, техник получения фактурной поверхности. Это затрудняет процесс контроля качества офактуренного кирпича. Фактурный декор кирпича часто сочетается с цветом, что дает еще большую эстетическую привлекательность. Фактурная поверхность кирпича — совокупность видимой структуры кирпича (текстуры), которая может выражаться рельефом разного вида с проявлением заданного или уникального фактурного «рисунка».

Взаимодействие эстетических и технологических свойств лицевого кирпича имеет очень много граней. Основные технологии производства лицевого кирпича рассмотрели с выявлением общих закономерностей и индивидуальных аспектов декорирования кирпича. Было принято решение остановиться на процессе взаимосвязи технологии производства и декорирования на примере процесса глазурирования кирпича мягкого формования.

Цвет является очень важной составляющей любой формы, в том числе и архитектурной. Цвет может «растворить» здание в среде или, наоборот, сделать его доминантой. Выбирая цвет фасада необходимо подобрать гармоничный цвет или сочетание оттенков, чтобы здание визуально не вступало в конфликт с окружением (соседними зданиями и природой), а являлось их продолжением. Чем ближе выбранные цветовые решения к естественным природным оттенкам земли, зелени и неба, тем больше они позитивно влияют на психику человека. К таким оттенкам относится основной объем производимого лицевого кирпича, где роль цвета играет природный оттенок обожженной глины от розового до темно-коричневого.

Холодные цвета, например, зеленый, синий, фиолетовый оказывают расслабляющее и успокаивающее действие на человека. Теплые и яркие, например, желтый, оранжевый, красный, возбуждают, бодрят, но и быстро начинают раздражать и угнетать нервную систему [13].

В настоящее время архитекторы, дизайнеры, художники, технологи могут пользоваться цветовым кругом Иттена для подбора цвета, оттенков и их сочетаний, для определения и отождествления цвета пользуются цветовыми системами: каталог цветов RAL, система Pantone®, HTML, CMYK, NCS или RGB.

Свой цветовой круг Йоханнес Иттен представил в 1961 году в книге «Искусство цвета». С его помощью осуществляется подбор единичного цвета, сближенных или контрастных цветовых сочетаний, основных цветов или дополнительных. Основными цветами являются три — красный, желтый и синий, при смешении этих базовых цветов получают все остальные оттенки и цвета. При гармоничных цветовых сочетаниях используют сближенные цвета, находящиеся рядом по кругу, а для контраста — цвета, находящиеся друг напротив друга. Цветовым кругом пользуются для получения цвета и его сочетания.

Каталог цветов RAL — это система международного уровня с 1927 г., палитра которой включает в себя 216 цветов из 9 диапазонов разной яркости и интенсивности. Например, наибольшее число в каталоге представлено оттенков серого (48), зеленого — 36, желтого — 30. Цвет маркируется четырехзначным числом и определением цвета. Каталог представлен в цифровом и печатном варианте.

Pantone Color Matching System (PMS) или Pantone® является промышленным мировым стандартом цветов для различных продуктовых линеек [14]. Эта система разработана в 1963 году американской фирмой Pantone Inc.,

с августа 2007 года принадлежит компании X-Rite. Это систематизированная коллекция цветов с присвоением каждому цвету определенного номера и названия. Институт цвета Pantone® с 2000 года на специальных закрытых встречах, проходящих два раза в год в какой-либо европейской столице, выбирает один из цветов «Цветом года». Например, цветом 2024 года был выбран Peach Fuzz (Персиковый пушок). Цветовая коллекция вмещает большое количество цветов и оттенков. К примеру, коричневых тонов — 195, зеленых — 376, желтых — 136. Данный каталог является хорошим подспорьем для широкого круга маркетологов, производителей, архитекторов и дизайнеров в плане маркировки цвета. На рис. 10 представлена часть палитры зеленых оттенков цветовой таблицы Pantone®.

Каталоги цветов и таблицы позволяют определить цвет, вычленив его для эталонного образца, избежать разногласий при согласовании и прийти к общему мнению по отношению к цветовосприятию изделия.

Pantone 317	Pantone 318	Pantone 319	Pantone 320	Pantone 321	Pantone 322	Pantone 323	Pantone 324
Pantone 325	Pantone 326	Pantone 327	Pantone 328	Pantone 329	Pantone 330	Pantone 331	Pantone 332
Pantone 333	Pantone 334	Pantone 335	Pantone 336	Pantone 337	Pantone 338	Pantone 339	Pantone 340
Pantone 341	Pantone 342	Pantone 343	Pantone 344	Pantone 345	Pantone 346	Pantone 347	Pantone 348
Pantone 349	Pantone 350	Pantone 351	Pantone 352	Pantone 353	Pantone 354	Pantone 355	Pantone 356
Pantone 357	Pantone 358	Pantone 359	Pantone 360	Pantone 361	Pantone 362	Pantone 363	Pantone 364
Pantone 365	Pantone 366	Pantone 367	Pantone 368	Pantone 369	Pantone 370	Pantone 371	Pantone 372
Pantone 373	Pantone 374	Pantone 375	Pantone 376	Pantone 377	Pantone 378	Pantone 379	Pantone 380
Pantone 381	Pantone 382	Pantone 383	Pantone 384	Pantone 385	Pantone 386	Pantone 387	Pantone 388
Pantone 389	Pantone 390	Pantone 391	Pantone 392	Pantone 393	Pantone 394	Pantone 395	Pantone 396

Рис. 10. Фрагмент палитры зеленых оттенков цветовой таблицы Pantone®

Однако среди производителей строительных материалов в Российской Федерации, в том числе кирпича, нет разработанной общей системы цветов, на который ссылались бы, например, отечественные производители. То, что заводы сами дают названия цветам, с одной стороны придает индивидуальность продукту, но с другой — вызывает некоторое затруднение при выборе кирпича нужного цвета, и создает иллюзорный объем ассортимента, когда на рынке представлен продукт одного и того же цвета, фактуры, но под разными названиями (рис. 11).

В дальнейшем мы планируем систематизировать названия цветов и оттенков для строительных керамических изделий. При тесном контакте с производителями, маркетологами и дистрибьютерами открываются перспективы для разработки системы «Номер — название» и каталога цветов для российских производителей строительных материалов с той возможностью, чтобы предприятия могли давать свое «местное» название и общее, стандартизированное для выпускаемых изделий [15].

В зависимости от техники и вида декорирования поверхность цветного лицевого кирпича может быть матовая, блестящая или глянцевая, что влияет на насыщенность и яркость цвета.

Фактурная поверхность с нанесением глазури разными способами получает разные декоративные качества. На примере глазурования кирпича мягкой формовки зеленой глазурью ниже мы пронаблюдаем, как меняется поверхность кирпича.

Для изучения глазурования кирпича мягкого формования разными способами в лабораторных условиях были получены глазури зелено-голубого оттенка, состоящие из фритты, пигментов, в роли которых выступают оксиды цинка, меди, олова, клея КМЦ-7Н и глины Владимирского месторождения ВКН-2. В таблице 2 представлены технические характеристики сырьевого состава зелено-голубой глазури ГП2-М5Ц10.

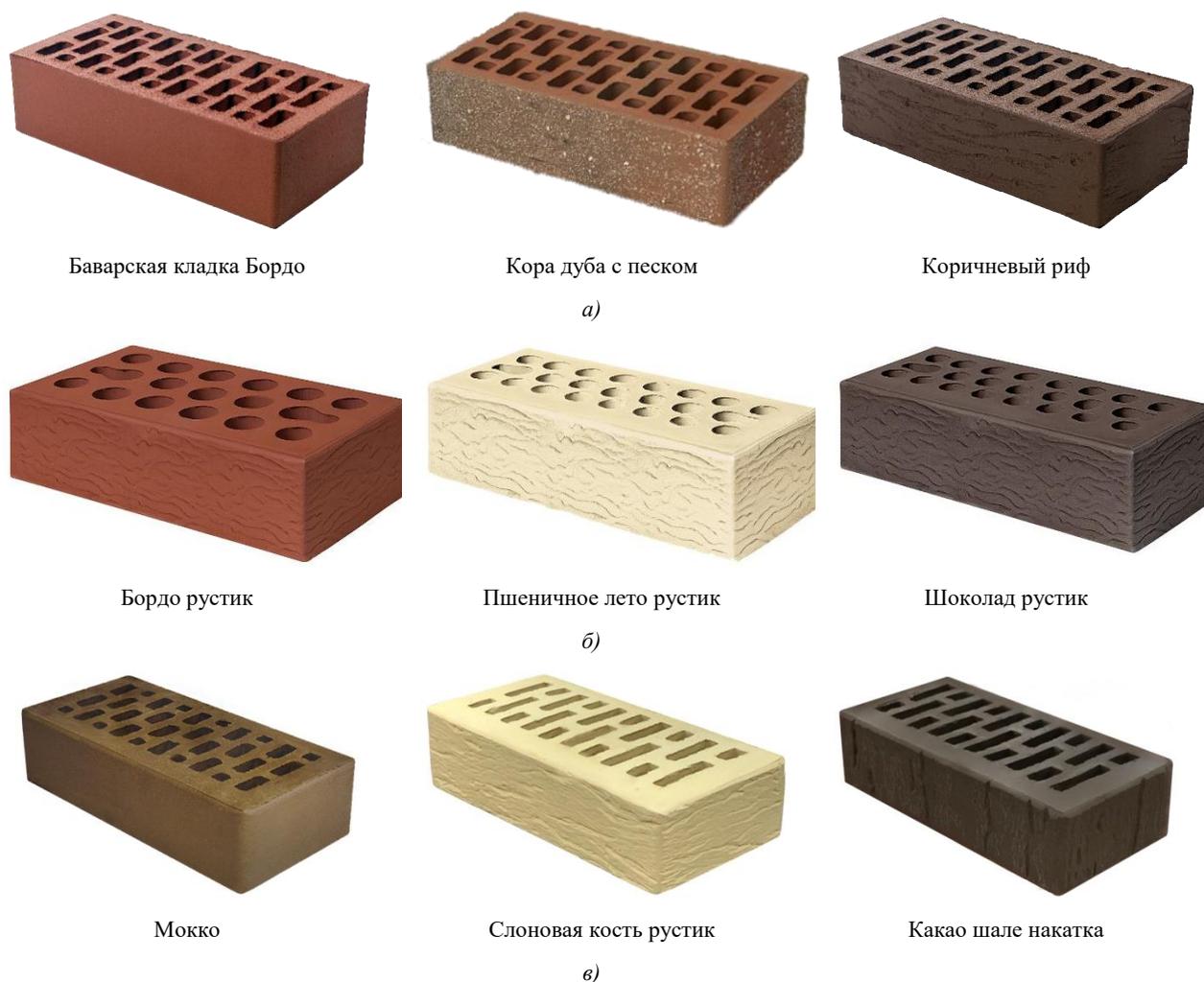


Рис. 11. Виды лицевого кирпича разных производителей: а — Браер; б — Керма; в — Терекс

Таблица 2

Состав глазури ГП2-М5Ц10 зелено-голубого цвета

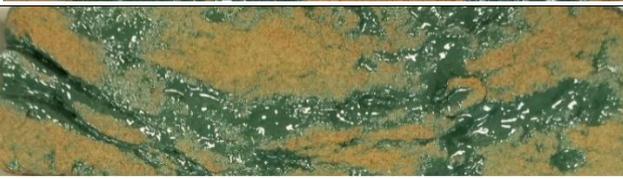
№	Наименование сырьевого материала	Технические характеристики	Весовая составляющая, %
1	Фритта ГП2	Размер гранул — не более 10 мм Влажность — не более 3 % Температурный коэффициент линейного расширения — $68-72 \times 10^{-7}$, 1/С Оптимальная температура обжига — 960–1000 °С	79
2	Оксид цинка	Насыпная плотность — 5,61 г/см ³ Дисперсность — остаток на сите 40 мкм не более 1 % Массовая доля — не менее 99,0 %	5
3	Оксид меди	Насыпная плотность — 2,2 г/см ³ Дисперсность — остаток на сите 40 мкм не более 1 % Массовая доля — не менее 90,0 %	10
4	Клей КМЦ-7Н	Растворимость в воде — не менее 97 % Массовая доля воды — не более 10 %	1
5	Глина Владимировского месторождения ВКН-2	Критическая влажность — 12,3 % Коэффициент чувствительности к сушке — 1,4 Дисперсность — 85 до 10 мкм; 60 — до 1 мкм	5

Процесс глазурования производился несколькими методами: кистью, поливом, окунанием, фроттажем, пульверизатором. Каждый метод имеет свои особенности. Данными способами можно получить полностью укрывистое покрытие поверхности, где пульверизация дает самый стабильный слой глазури. Вместе с тем можно получить частичное покрытие поверхности, когда полив, окунание дают четкую грань покрытию, а аэрозольное распыление позволяет получить мягкий градиентный переход. Фроттаж характерен для фактурной поверхности,

когда слой глазури стирается после нанесения и остаётся лишь в углублениях фактурной поверхности. Взаимосвязь нанесения покрытия и его внешнего вида очень ярко проявляется при декорировании глазурью кирпича мягкого формования, что показано в таблице 3.

Таблица 3

Соответствие метода глазурования и внешнего вида поверхности кирпича мягкого формования

№	Маркировка, покрытие	Метод декорирования	Фото кирпича
1	ГП2-М5 Зелёный цвет (Panton 336), сплошное	Окунание	
2	ГП2-М5Ц10 Голубо-зеленый цвет (Panton 325), сплошное	Пулверизация	
3	ГП2-М5 Зелёный цвет (Panton 336), частичное, пятна	Полив, фроттаж	
4	ГП2-М5 Зелёный цвет, проявление фактуры	Пулверизация, фроттаж	

Для глазурного декорирования на производстве применяется метод пульверизации, который является экономичным в плане расхода глазури: покрытие имеет равномерный тонкий слой 0,1–0,2 мм с возможностью плавного цветового перехода, получения эффекта деградации и других нюансных сочетаний.

Обсуждение и заключение. Взаимосвязь эстетики и технологии на примере кирпича мягкого формования прослеживается и в фактурном поллиструктурном «рисунке», и при его цветном декорировании с помощью глазури. Своеобразная уникальная поверхность кирпича мягкого формования с так называемой «состаренной» фактурой получается на этапе формования кирпича и относится к типу «Форма + декор», типы возможных фактур изучены и определены выше. В дальнейшем необходимо описать получение каждого вида фактурной поверхности с учетом сырьевого состава и производственного процесса. Процесс глазурования кирпича позволяет расширить ассортимент продукции с эстетической точки зрения, однако он увеличивает расходы на производство. Чтобы выпускать элитный кирпич, заводу необходимо изучить все риски, провести маркетинговые и экономические исследования. Эстетика кирпича напрямую зависит от технологии, и эту взаимосвязь надо учитывать при планировании нового производства или расширении ассортимента уже выпускаемой продукции. Элитный кирпич с необычными эстетическими характеристиками не будет иметь большой объем производства, но он необходим, чтобы здание, район и город в целом приобрели уникальность, декоративность и красоту. В настоящее время кирпич ручной формовки пользуется большим спросом, его неяркие природные оттенки в сочетании с фактурностью входят в трендовые облицовки. В 2023 г. на пике популярности были оттенки серого. Но мода переменчива и, возможно, в будущем от производителей и строителей можно ожидать смелых решений.

Предлагаемые в исследовании поиски декоративности кирпича, системы классификации, терминологические изменения позволят усовершенствовать и скорректировать процесс развития стеновой керамики и керамической промышленности.

Список литературы / References

1. Герасимова Е.Б., Мельникова Л.А., Лосева А.В. Экологическая безопасность строительства в моногородах. *Строительные материалы и изделия*. 2023;6(3):59–78. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-3-59-78>

- Gerasimova EB, Melnikova LA, Loseva AV. Ecological Safety of Construction in Single-Industry Town. *Construction Materials and Products*. 2023;6(3):59–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-3-59-78>
2. Котляр В.Д., Терехина Ю.В., Котляр А.В., Ященко Р.А. Оценка кремнистых опал-кристобалитовых пород для производства стеновой керамики. В: *Труды XV Международной научной конференции «ИНТЕРАГРОМАШ 2022»*. Ростов-на-Дону: Springer; 2022. С. 2268–2282. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-21432-5-248>
- Kotlyar VD, Terekhova YuV, Kotlyar AV, Yashchenko RA. Evaluation of Siliceous Opal-Cristobalite Rocks for the Production of Wall Ceramics. In: *Proceedings of the XV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2022”*. Rostov-on-Don: Springer; 2022. P. 2268–2282. (In Russ.) <https://doi.org/10.1007/978-3-031-21432-5-248>
3. Салахов А.М. *Керамика для строителей и архитекторов*. Казань: Парадигма; 2009. 296 с. Salakhov AM. *Ceramics for Builders and Architects*. Kazan: Paradigm; 2009. 296 p. (In Russ.)
4. Котляр В.Д., Небежко Ю.И., Божко Ю.А., Явруян Х.С. Особенности производства лицевого керамического кирпича мягкой формовки на основе опоковидных пород. *Строительные материалы*. 2019;(12):18–23. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-18-22>
- Kotlyar VD, Nebezhko YuI, Bozhko YuA, Yavruyan KhS. Features of Production of Facial Ceramic Bricks the Soft Forming on the Basis of Opoka-Like Rocks. *Stroitel'nye Materialy (Construction Materials)*. 2019;(12):18–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-18-22>
5. Каримова И.С. *Объективное и субъективное в дизайне среды. Монография*. Благовещенск: АГУ; 2012. 116 с. Karimova IS. *Objective and Subjective in Environmental Design. Monograph*. Blagoveshchensk: ASU; 2012. 116 p. (In Russ.)
6. Божко Ю.А., Лапунова К.А. Применение облицовочного кирпича мягкой формовки в современной архитектуре. *Дизайн. Материалы. Технология*. 2018;1:61–65. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32698429> (дата обращения: 29.07.2024).
- Bozhko YuA, Lapunova KA. Application of Soft-Molded Facing Bricks in Modern Architecture. *Design. Materials. Technology*. 2018;1:61–65. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32698429> (accessed: 29.07.2024).
7. Месхи Б.Ч., Божко Ю.А., Терехина Ю.В., Лапунова К.А. Brick-дизайн и его основные элементы. *Строительные материалы*. 2020;(8):47–51. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-783-8-47-51>
- Meskhi BCh, Bozhko YuA, Terekhina YuV, Lapunova KA. Brick-Design and Its Main Elements. *Stroitel'nye Materialy (Construction Materials)*. 2020;(8):47–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-783-8-47-51>
8. Небежко Ю.И., Лапунова К.А. Особенности лицевой поверхности керамического кирпича мягкого формования. В: *Сборник материалов III Всероссийской научной конференции «Строительное материаловедение: настоящее и будущее»*. М.: МГСУ; 2023. С. 204–210. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=56168172> (дата обращения: 21.08.2024).
- Nebezhko YuI, Lapunova KA. Features of the Face Surface of Soft-Molded Ceramic Brick. In: *Proceedings of the III All-Russian Scientific Conference “Materials Science in Construction: Present and Future”*. Moscow: MGSU; 2023. P. 204–210. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=56168172> (accessed: 21.08.2024).
9. Витрувий М.П. *Десять книг об архитектуре*. М.: Азбука; 2023. 320 с. Vitruvii MP. *Ten Books on Architecture*. Moscow: Azbuka; 2023. 320 p. (In Russ.)
10. Лапунова К.А., Котляр В.Д. *Технология и дизайн лицевых изделий стеновой керамики на основе кремнистых опоковидных пород*. Ростов н/Д: РГСУ; 2013. 193 с. Lapunova KA, Kotlyar VD. *Technology and Design of Facing Products of Wall Ceramics Based on Siliceous Opoka-Like Rocks*. Rostov-on-Don: RGSU; 2013. 193 p. (In Russ.)
11. Божко Ю.А., Лапунова К.А. Виды лицевой поверхности керамического кирпича мягкого формования. В: *Материалы национальной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники»*. Ростов н/Д: ДГТУ; 2020. С. 1644–1647. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44086646> (дата обращения: 21.07.2024).
- Bozhko YuA, Lapunova KA. Types of the front surface of soft-molded ceramic bricks. In: *Proceedings of the National Scientific and Practical Conference “Topical Problems of Science and Technology”*. Rostov-on-Don: DSTU; 2020. P. 1644–1647. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44086646> (accessed: 21.07.2024).
12. Котляр В.Д., Небежко Ю.И., Семенова М.Ю. Формовочные свойства глиняных смесей при производстве мягкого сырцового кирпича. *Строительные материалы и изделия*. 2024;7(1):1–14. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-1-5>
- Kotlyar VD, Nebezhko YuI, Semenova MYu. Molding Properties of Clay Mixtures in the Soft Mud Brick Manufacture. *Construction Materials and Products*. 2024;7(1):1–14. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-1-5>
13. Сурина М.О. *Цвет и символ в искусстве, дизайне и архитектуре*. М.: Школа дизайнера; 2003. 152 с. Surina MO. *Color and Symbol in Art, Design and Architecture*. Moscow: School of Design; 2003. 152 p. (In Russ.)
14. Эйсман Л., Рекер К. *История пантона. XX век в цвете*. М.: Эксмо; 2022. 192 с. Eisman L, Recker K. *History of Pantone. 20th Century in colour*. Moscow: Eksmo; 2022. 192 p. (In Russ.)

15. Божко Ю.А., Лапунова К.А. Проблемы регламентации терминологии brick-дизайна и области его применения. *Строительные материалы*. 2021;(4):37–41. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-790-4-37-41>

Bozhko YuA, Lapunova KA. Methodology for Determining the Brick Design and the Possibility of Its Application in Construction and Architecture. *Stroitel'nye Materialy (Construction Materials)*. 2021;(4):37–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-790-4-37-41>

Об авторах:

Юрий Иванович Небежко, кандидат технических наук, аспирант кафедры строительных материалов Донского государственного технического университета (344022, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162), ceramic_nyi@mail.ru

Кира Алексеевна Лапунова, доцент кафедры строительных материалов Донского государственного технического университета (344022, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162), [ScopusID](#), [ORCID](#), keramik_kira@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Ю.И. Небежко: формирование основной концепции, цели и задач исследования, обоснование критериев, общее планирование эксперимента, анализ результатов исследований, редактирование текста, корректировка выводов;

К.А. Лапунова: детальное планирование, организация и реализация исследований, обработка и анализ результатов исследований, подготовка текста, формулировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

Yurii I. Nebezsko, PhD Student of the Building Materials Department, Don State Technical University (162, Sotsialisticheskaya Str., Rostov-on-Don, 344022, Russian Federation), ceramic_nyi@mail.ru

Kira A. Lapunova, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Building Materials Department, Don State Technical University (162, Sotsialisticheskaya Str., Rostov-on-Don, 344022, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), keramik_kira@mail.ru

Claimed Contributorship:

YuI Nebezsko: formulating the main concept, aim and objectives of the research, substantiating the criteria, general planning of the experiment, analysis of the research results, editing the text, correcting the conclusions.

KA Lapunova: detailed planning, organization and implementation of research, processing and analysis of the research results, preparing the text, formulating the conclusions.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию/ Received 10.10.2024

Поступила после рецензирования/ Revised 28.10.2024

Принята к публикации/ Accepted 10.11.2024

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS



УДК 691.316; 549.02

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-55-65>

Особенности составов и микроструктуры кладочных растворов башенных комплексов Ингушетии

В.Д. Котляр

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

[✉ diatomit_kv@mail.ru](mailto:diatomit_kv@mail.ru)



EDN: YZMWOV

Аннотация

Введение. Башенные комплексы Республики Ингушетии являются не только уникальными историко-архитектурными памятниками, но памятниками «строительной» истории региона. Особый интерес у специалистов в последние годы проявляется к кладочным растворам, которые применялись для скрепления каменной кладки при возведении и ремонте башен. Изучение кладочных растворов может рассказать специалистам о применяемых материалах, древних строительных технологиях, а по микроструктурным признакам — о возрасте самих башен или их отдельных частей, что особенно актуально для специалистов в области строительного материаловедения, истории архитектуры, реставрации и реконструкции историко-архитектурного наследия. Целью данных исследований является определение составов кладочных растворов башенных комплексов Республики Ингушетии и их возраста по степени кристалличности вторичного кальцита.

Материалы и методы. Объектом исследований являлись образцы кладочных растворов, отобранных из башенных комплексов «Эгикал», «Таргим», «Пуй», «Лейми», «Алби-Ерды», «Эрзи» и другие. Изучение химического состава растворов проводилось по методике ГОСТ 8269.1-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы химического анализа». Рентгенофазовые исследования проводились на приборе ARL X'TRA с шириной щелей 2–4–1–0,5. Условия съемки на дифрактометре ARL X'TRA: интервал — 5–70 °; скорость: 5–6 град/мин; напряжение — 40 кВ; ток — 30 мА. Расшифровка дифрактограмм проводилась с использованием соответствующих методик путем сопоставления с подобными исследованиями, а также с использованием международных баз данных. Минералого-петрографические исследования проводились с помощью оптических и цифровых микроскопов различных модификаций.

Результаты исследования. Приводятся авторские результаты исследования, которые получены в описываемой работе. Проведённые исследования позволили установить, что составы древних кладочных растворов изначально в подавляющем большинстве случаев были представлены смесью воздушной извести и песчано-гравийного материала или смесью воздушной извести и измельчённых глинистых сланцев. Установлено, что степень кристалличности вторичного кальцита существенно отличается и зависит от возраста каменных кладок башен.

Обсуждение и заключение. Результаты, полученные в ходе проведения данных исследований, в практическом плане могут быть полезны при проведении реставрационных работ, в теоретическом плане позволяют определить относительный возраст башен и их отдельных частей, что существенно поможет при воссоздании истории их строительства.

Ключевые слова: башни, кладочный раствор, состав, известь, кальцит, степень кристалличности, возраст

Благодарности. Автор благодарит зав. кафедрой «Архитектурная реставрация, реконструкция и история архитектуры» ДГТУ, доктора архитектуры, профессора Пищулину Викторию Владимировну за материальную поддержку при проведении исследований, высказанные автору ценные замечания и рекомендации при написании статьи.

Для цитирования. Котляр В.Д. Особенности составов и микроструктуры кладочных растворов башенных комплексов Ингушетии. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2024;3(4):55–65. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-55-65>

Compositional and Microstructural Features of Masonry Mortars of Ingushetia Tower Complexes

Vladimir D. Kotlyar 

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

 diatomit_kv@mail.ru

Abstract

Introduction. The tower complexes of the Republic of Ingushetia are not only unique historical and architectural monuments, but also monuments to the history of “construction” of the region. In recent years, specialists are particularly interested in the masonry mortars used for bonding the stonework during building-up and repairing the towers. The study of the masonry mortars can provide the specialists the information about the materials used, ancient construction technologies, and, based on microstructural features, the age of the towers or their separate parts, which is especially relevant for the specialists in the field of materials science in construction, history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage. The aim of the research is to determine the composition of the masonry mortars in tower complexes of the Republic of Ingushetia and, based on the degree of crystallinity of secondary calcite, determine their age.

Materials and Methods. The objects of the research were the samples of masonry mortars taken from the tower complexes of Ehgikal, Targim, Pui, Leimi, Albi-Erdy, Ehrzi and others. The study of the chemical composition of the mortars was carried out according to the methodology of GOST 8269.1-97 “Crushed Stone and Gravel from Dense Rocks and Industrial Waste for Construction Work. Methods of Chemical Analysis”. X-ray diffraction phase analysis was carried out using the ARL X’TRA diffractometer with slit widths of 2-4-1-0.5. Measurement capacity provided by the ARL X’TRA diffractometer: angle range — 5–70°; speed: 5–6 deg/min; voltage — 40 kV; current — 30 mA. Diffractogram decoding was carried out in accordance with the appropriate methods by comparing with the similar studies, as well as with the use of international databases. Mineralogical and petrographic examinations were carried out using optical and digital microscopes of various modifications.

Results. The retrieved author’s research results are presented in the paper. The conducted research made it possible to establish that originally the overwhelming majority of ancient masonry mortars were represented by a mixture of air-setting lime and sand and gravel material or a mixture of air-setting lime and crushed clay slates. It was acknowledged that the degree of crystallinity of secondary calcite differs significantly and depends on the age of the tower stonework.

Discussion and Conclusion. The results obtained within this research can have practical value for carrying out the restoration works, and theoretical value for determining the relative age of the towers and their separate parts, which will significantly help to reconstruct the history of their construction.

Keywords: towers, masonry mortar, composition, lime, calcite, degree of crystallinity, age

Acknowledgements. The author thanks the head of DSTU Architectural Restoration, Reconstruction and History of Architecture Department, Dr.Sci. (Architecture), Professor, Victoria V. Pishchulina for financial support of the research, for valuable comments and recommendations made to the author while preparing the article.

For Citation: Kotlyar VD. Compositional and Microstructural Features of Masonry Mortars of Ingushetia Tower Complexes. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(4):55–65. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-55-65>

Введение. В последние годы повышенный интерес у историков, архитекторов, археологов и любителей культурно-познавательного туризма проявляется к башенным комплексам Республики Ингушетии. Это закономерно, так как Северный Кавказ является уникальным в своём роде регионом, а сохранившиеся древние башни Ингушетии — это живая «строительная» история Республики. Они стали символами региона, активно реставрируются, и, несмотря на очень малое количество письменных источников, по крупицам воссоздаётся история их строительства, и выявляется роль, которую они играли в прошлом в жизни народа (рис. 1).

Работы в данном направлении вызывают множество вопросов, основные из которых: из каких материалов и когда были построены древние башни. Первый вопрос является основным вообще для любого строительства, так как наличие тех или иных строительных материалов определяет, каким будет то или иное сооружение, технологию его возведения и архитектурную форму. Что касается строительства башен Ингушетии, то основным изделием для возведения стен, как и во многих других районах Кавказа, служили стеновые камни, полученные из плитчатых песчаников и известняков. Данные породы имеют широкое распространение в отложениях юрского и мелового периодов, протягивающихся широкой полосой от северо-западной до юго-восточной окраины Кавказа,

в том числе и в горных районах Ингушетии. Так как такие песчаники имеют слоистую текстуру, они легко раскалываются по плоскостям напластования на большие фрагменты, из которых уже раскалыванием перпендикулярно к плоскостям напластования получают нужные по размеру камни.



Рис. 1. *а* — отреставрированный архитектурный башенный комплекс «Бишт»; *б* — башенный комплекс «Герете» («Герате») не подвергавшийся перестройке и реставрации

Второй вопрос о возрасте строительства башен имеет, помимо чисто научного, большое историко-общественное значение и вызывает наибольшие дискуссии [1–3]. Применяемые в настоящее время методы датировки объектов культурного наследия как физико-химические, так и историко-архитектурные, не являются абсолютно точными и работают только комплексно. Кроме того, точная датировка тех или иных башен осложняется тем обстоятельством, что на протяжении своей истории они многократно перестраивались, и, так как получение стеновых камней процесс достаточно трудоёмкий, повсеместной практикой было повторное использование камней, на которые не ставили клейма, как на керамический кирпич. Учитывая особенности гидратации, твердения и последующих микроструктурных преобразований, происходящих в известковых растворах, которые применялись при строительстве башен, по степени кристалличности вторичного кальцита можно точно сказать, какой раствор имеет тот или иной относительный возраст. Это в комплексе с другими методами позволяет более точно определить возраст башен или их отдельных частей [4–7]. Работы в данном направлении начались только в последние 5 лет и имеют большой научный интерес. Определение же составов растворов с учётом геологических особенностей конкретного района и атрибуции конкретных башен является основой для проведения реставрации и реконструкции данных памятников историко-архитектурного наследия.

Материалы и методы. Для проведения исследований нами были отобраны образцы кладочных известковых растворов на различных башенных комплексах Ингушетии: «Эгикал», «Таргим», «Пуй», «Лейми», «Алби-Ерды», «Эрзи» и других. Всего было отобрано 56 образцов. На каждом объекте отбиралось по несколько образцов в минимально затронутых выветриванием точках (рис. 2).

При отборе образцов учитывались условия, которые могли бы повлиять на изменения первоначального состава раствора: возможность увлажнения, надземная или приземная часть сооружения, доступ воды из воздушной среды, освещённость и др. Указанные факторы в определённой степени могут влиять на скорость протекания химических реакций в растворе и соответственно на преобразование портландита в кальцит и последующий рост степени его структурного совершенства. При отборе проб были отдельно выделены образцы из башен с подтверждёнными по историческим данным датами постройки, и на которые ориентировались при сравнении и анализе полученных результатов [8–11]. Также были отобраны и изучены образцы карбонатных пород, находящихся в районе башен, из которых вероятнее всего получали известь для растворов, для определения степени структурного совершенства природного кальцита.



Рис. 2. Характерные точки отбора образцов

Изучение растворов происходило в 3 этапа. На первом этапе образцы изучались визуально и под оптическими микроскопами различных модификаций. На втором этапе изучался химический состав вяжущей составляющей растворов и заполнителей. Для этого, учитывая, что вяжущая составляющая имеет гораздо меньшую прочность, чем заполнители, образцы измельчались в фарфоровой ступке твёрдым резиновым пестиком, чтобы не разрушались зёрна заполнителя. После чего полученный материал просеивался на сите с размером ячеек 0,05 мм. Таким образом мы отделяли вяжущую составляющую растворов, представленную вторичным кальцитом, и заполнители. Последние подвергались минералого-петрографическому анализу с помощью методов оптической микроскопии. Определение химического состава вяжущей составляющей проводилось по методике НСАМ №138-Х «Определение породообразующих элементов в горных породах и рудах ускоренными фотометрическим и титриметрическими методами». Определение минерального состава вяжущей составляющей и степени кристалличности вторичного кальцита по интенсивности главного пика кальцита ($3,03 \text{ \AA}$) проводилось на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA с шириной щелей 2–4–1–0,5. Условия съёмки на дифрактометре ARL X'TRA: интервал — $5\text{--}70^\circ$; скорость — 5–6 град/мин; напряжение — 40 кВ; ток — 30 мА. Расшифровка рентгенограмм осуществлялась по соответствующим методикам с использованием международных баз данных и путём сопоставления с подобными исследованиями. Количественное определение минерального состава проводили методом корундовых чисел и путём петрохимических пересчётов.

Результаты исследования. Результаты исследований показали, что заполнителями в кладочных растворах башен Ингушетии являлись в основном аллювиальные грубо- и среднеобломочные отложения реки Асса, представленные дресвой, гравием, разнозернистыми песками. Это закономерно, так как измельчать крупные куски прочных пород для получения песка достаточно трудоёмко. Минералого-петрографический состав заполнителей достаточно разнообразен. Встречаются зёрна от мелкозернистого песка до гравия, представленные кварцем, различными известняками, песчаниками, алевролитами, доломитами, аргиллитами и глинистыми сланцами (рис. 3), т. е. теми породами, которые характерны для геологии Ингушетии. Какой-либо чёткой закономерности между расположением башен и видом заполнителя не выявлено. В общих чертах можно говорить, что в кладочных растворах наиболее южных башенных комплексов в большей мере встречаются доломиты и глинистые сланцы. В растворах северных башенных комплексов в большей мере встречаются кварц, известняки и алевролиты.

По аналогии со структурами осадочных пород тип цементации (соотношение вяжущего вещества и заполнителей) можно назвать базальным или базально-поровым. В редких случаях — контактовым. Примерное соотношение по массе вяжущего вещества и заполнителя в среднем составляет 20/80. При этом надо иметь в виду, что плотность вяжущего вещества ($2,1\text{--}2,3 \text{ г/см}^3$) — первоначально извести, которая со временем карбонизировалась и перешла в кальцит, — существенно меньше плотности заполнителя ($2,6\text{--}2,8 \text{ г/см}^3$).

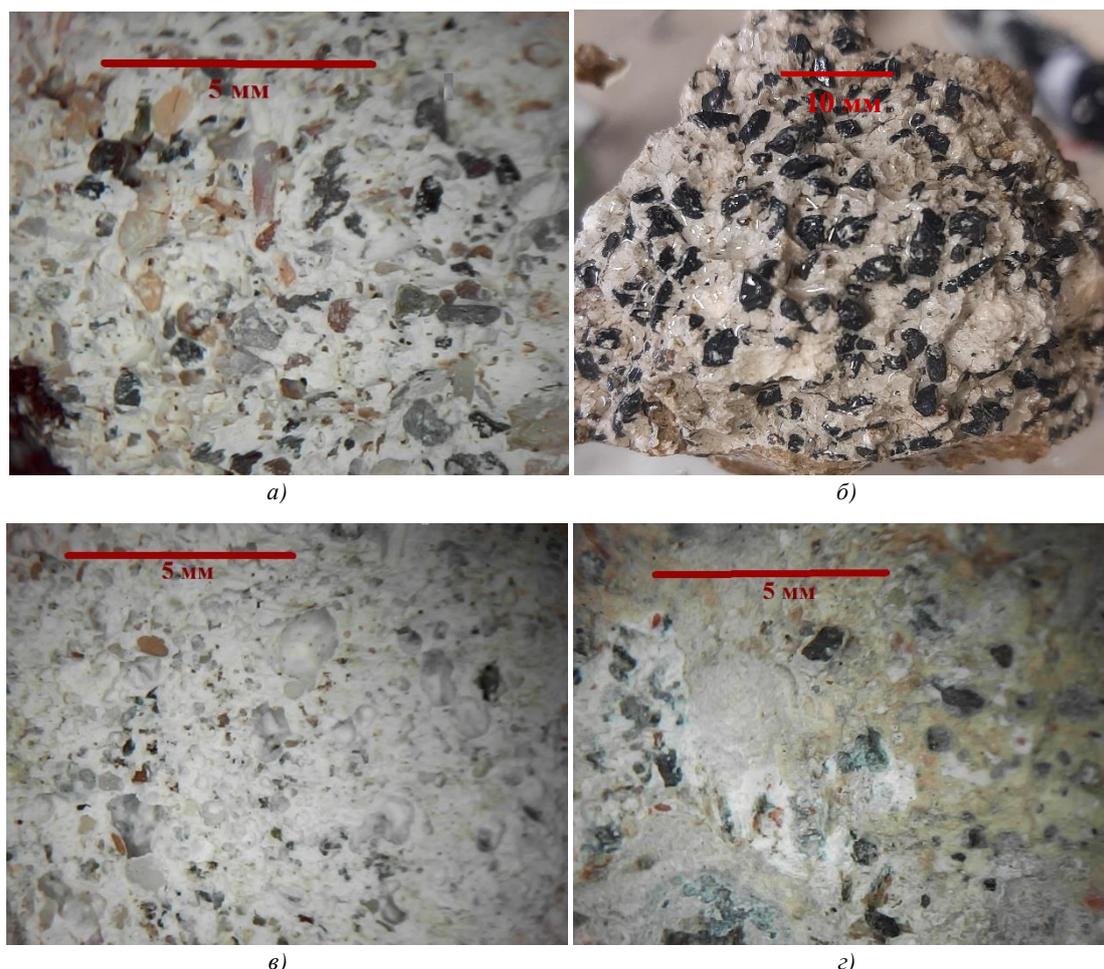
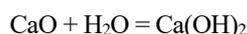


Рис. 3. Различные виды заполнителей в кладочных растворах: *а* — преимущественно кварцевый песок; *б* — глинистый сланец; *в* — преимущественно доломитизированный известняк; *з* — алевролиты и песчаники

Особый интерес при изучении кладочных растворов вызывает именно вяжущая часть. Исследования подтвердили, что в подавляющем большинстве случаев вяжущая часть кладочных растворов башен представлена вторичным кальцитом, образованным за счёт карбонизации извести. Как известно, процесс схватывания и набора прочности известковых растворов проходит в два основных этапа. Первый этап характеризуется гидратацией оксида кальция с образованием микрокристаллов минерала портландита (гидроксида кальция) по реакции:



с дальнейшим увеличением размеров кристалликов и их срастанием между собой. Второй этап характеризуется карбонизацией гидроксида кальция за счёт его реакции с парами воды и углекислым газом, которые всегда присутствуют в атмосфере:



Скорость процесса карбонизации зависит от многих условий. На этот процесс влияют температура и влажность окружающей среды, содержание углекислого газа в атмосфере, плотность раствора, от чего зависит доступ углекислого газа вглубь кладки и другие факторы. В любом случае для башенных комплексов Ингушетии эти условия были практически одинаковы. Исследования показали, что в известковых растворах возрастом более 100 лет нет гидроксида кальция, и он полностью перешёл в кальцит. Также установлено, что в подавляющем большинстве случаев для получения извести для растворов использовались «чистые» известняки. В более редких случаях — мергелистые известняки и доломитизированные известняки. Первые выходят на поверхность в северных предгорных районах республики — это эоцен-палеоценовые отложения палеогена. Вторые (в южной части республики) — это отложения верхнего мела. Наиболее чистыми и наиболее пригодными для получения извести в Республике Ингушетия являются известняки верхнего мела ичкерийской свиты. Мощность их отложений достигает 160 метров. Есть предположение, что именно известняки ичкерийской свиты в большинстве случаев использовались при строительстве башен для получения извести. Их крупные выходы наблюдаются южнее селения Алкун около реки Асса и около дороги, которая идёт вдоль реки, что позволяло организовывать их доставку как на юг, так и на север (рис. 4).



Рис. 4. Выходы известняков ичкерийской свиты верхнего мела по левому берегу реки Асса

Минеральный состав известняков, представленный в основном кальцитом, и химический состав подходит для получения извести (таблица 1, рис. 5). При естественном разрушении (выветривании) Алкунские известняки распадаются на небольшие куски, что благоприятствовало их разработке и последующему получению извести. В настоящее время разведано крупное проявление известняков верхнего мела ичкерийской свиты — Алкунское месторождение. Порода данного месторождения периодически разрабатывается для дорожного строительства, получения щебня, производства кирпича компрессионного формования.

Таблица 1

Усреднённый химический состав известняков Алкунского месторождения

ппп	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
41,37	4,31	0,47	0,68	51,98	0,44	0,03	0,20	0,01	0,02

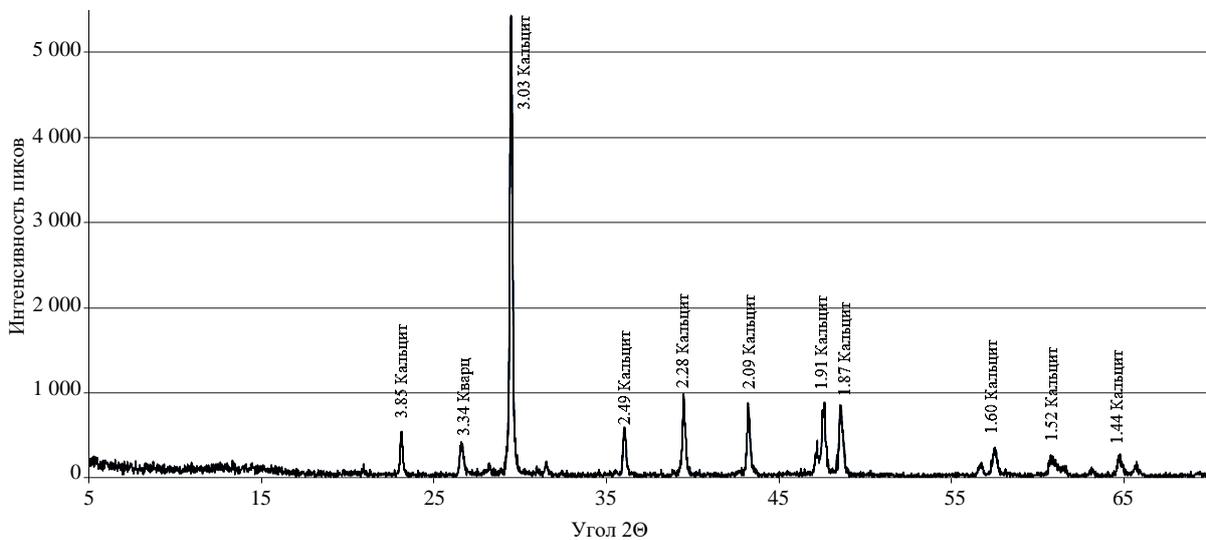


Рис. 5. Рентгенограмма известняков Алкунского месторождения

После карбонизации извести (минерал портландит) и перехода её в минерал кальцит наступает самый длительный этап микроструктурных преобразований известкового раствора — рекристаллизация микрокальцита, образованного за счёт карбонизации портландита, и рост степени его структурного совершенства, сопровождающийся увеличением размеров нано- и микрокристаллов кальцита и ростом степени структурной упорядоченности кристаллической решетки. Наиболее высокой степенью структурного совершенства отличается кальцит, слагающий мрамор, в меньшей степени — кальцит известняков, особенно мелоподобных, и относительно небольшой степенью структурного совершенства отличается вторичный кальцит известковых растворов. И если процесс карбонизации известковых растворов достаточно хорошо изучен, то процесс роста структурного совершенства вторичного кальцита в известковых растворах находится в стадии изучения [12–16]. Последний интересен тем, что он может говорить о возрасте известковых растворов и, соответственно, башен или их отдельных частей: чем выше степень структурного совершенства вторичного кальцита, тем больше возраст известкового раствора. Степень структурного совершенства (рекристаллизации) можно определить рентгенодифракционным методом с

учётom определённых допусков: чем выше главный рефлекс кальцита (3,03 Å) на рентгенограмме, тем больше относительный возраст раствора.

Многочисленные исследования вяжущей части известковых растворов показали, что главный рефлекс кальцита при абсолютно одинаковых условиях съёмки и подготовки проб для различных башенных комплексов и для отдельных частей имеет различную интенсивность. Для примера, на рис. 6 и 7 приведены рентгенограммы кладочных растворов, отобранных на башенном комплексе «Таргим» и на руинированном раннеправославном христианском храме «Альби-Ерды». Как видно, главный рефлекс кальцита (3,03 Å) на образцах, отобранных на различных объектах и на отдельных участках одного и того же объекта, имеет различную интенсивность, т. е. вторичный кальцит имеет более высокую или меньшую степень структурного совершенства, и, соответственно, кладочный раствор с учётом определённых допусков имеет различный возраст.

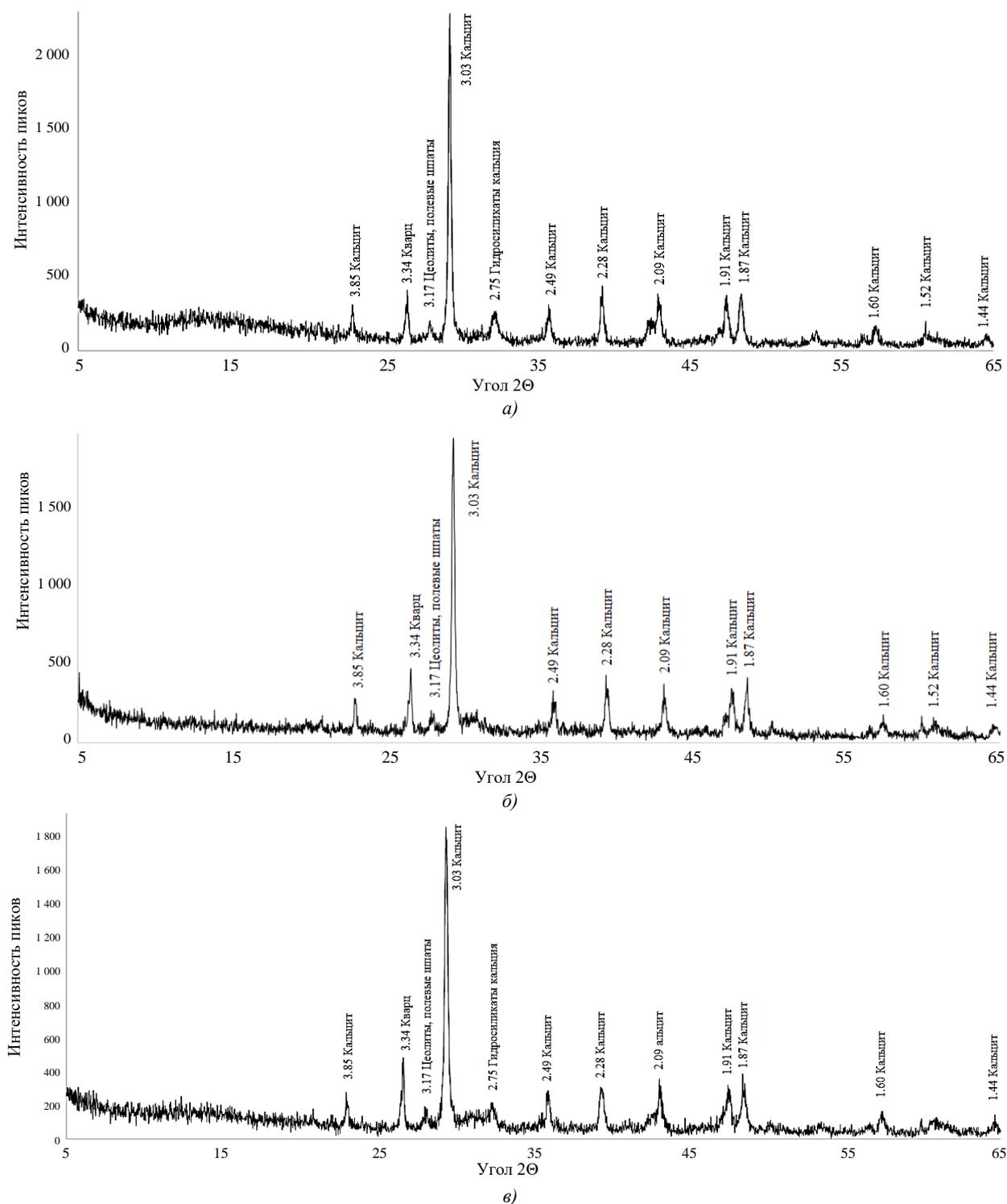


Рис. 6. Рентгенограммы вяжущей части кладочных растворов, отобранных на башенном комплексе «Таргим»: а — башня Плиевых; б — башня старая; в — святилище

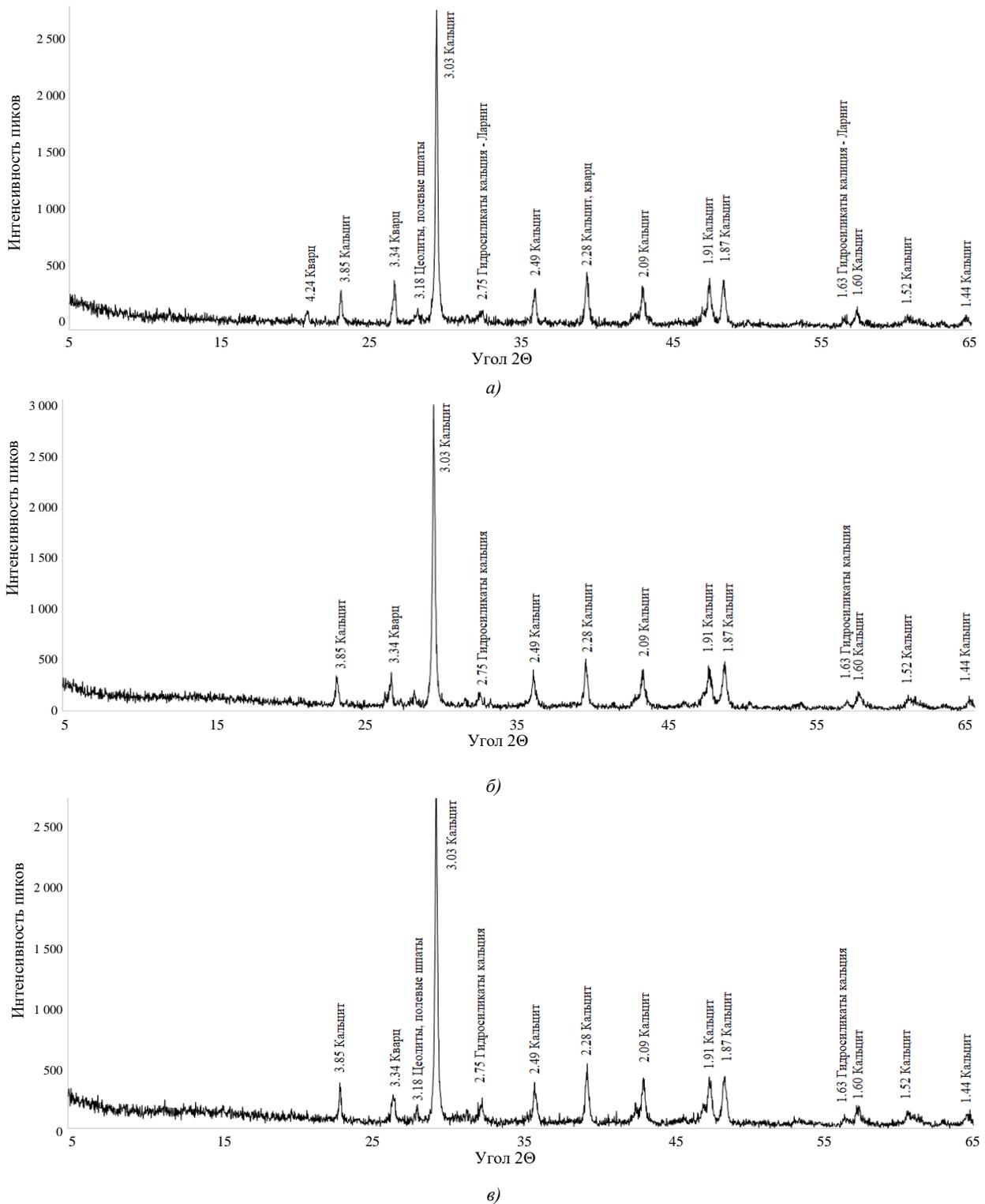


Рис. 7. Рентгенограммы вяжущей части кладочных растворов, отобранных на раннеправославном христианском храме «Альби-Ерды»: *а* — восточный фасад; *б* — верхняя часть стены; *в* — левая апсида

Сопоставляя полученные нами данные по образцам-эталонам, т. е. образцам, отобранным на объектах, с подтверждёнными историческими данными времени их строительства, мы получили высокий процент ($\approx 85\%$) схожести результатов [9–11]. При съёмке образцов с одинаковыми параметрами и равном содержании минералов прослеживается чёткая закономерность: чем выше главный рефлекс кальцита ($3,03 \text{ \AA}$) на рентгенограмме, т. е. выше степень его структурного совершенства, тем больше относительный возраст раствора. К примеру, возраст объектов башенного комплекса «Таргим» относится к XIII–XVI веку. Возраст объектов башенного комплекса «Лейми» относится к XV–XVI веку. Возраст раннеправославного христианского храма «Альби-Ерды» относится к VIII–XII веку. Представленные нами датировки башенных комплексов нельзя принимать буквально, так как проблемой при отборе и изучении образцов кладочных растворов древних объектов архитектурного наследия

для уточнения времени их строительства является то, что в подавляющем большинстве случаев они неоднократно перестраивались, и в каждом случае применялся новый раствор. С другой стороны, изучение кладочных растворов на одном и том же объекте позволяет воссоздать его историю, так как стеновые камни неоднократно использовались при ремонтах и перестройках объектов башенных комплексов, в отличие от кладочных растворов, которые каждый раз надо готовить по-новому.

При наблюдении под электронным микроскопом при увеличении в 1000–5000 раз видно, что вторичный кальцит, образованный за счёт карбонизации гидроксида кальция, представляет собой в основном коллоидные микрозернистые образования размером до 5 мкм (рис. 8). При этом самих нанокристаллитов вторичного кальцита не наблюдается за счёт их очень малых размеров.

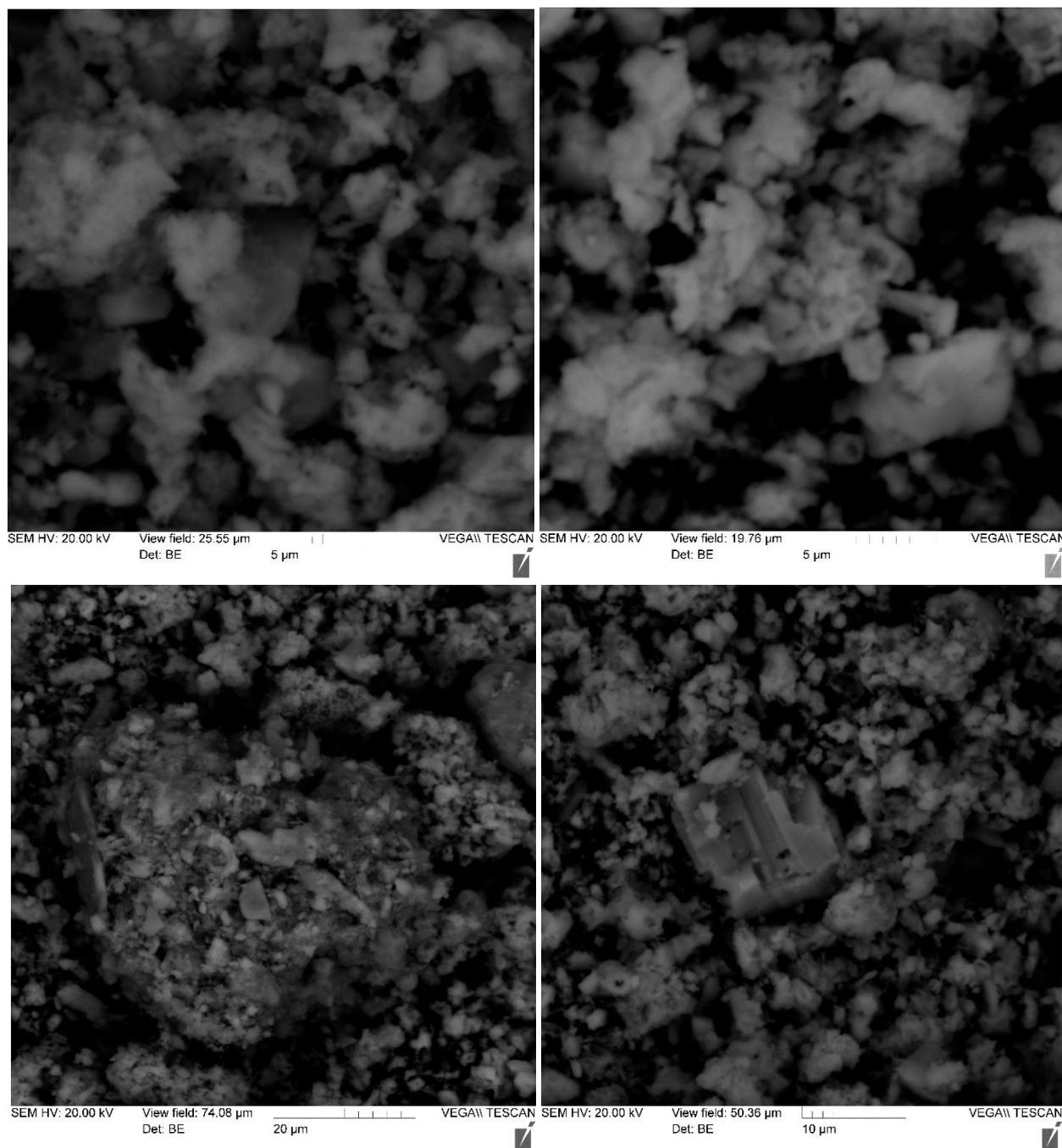


Рис. 8. Микрообразования вторичного кальцита в известковых растворах башенных комплексов Ингушетии

Определять степень кристалличности кальцита и, соответственно, относительный возраст кладочных растворов с учётом определённых факторов можно не только по высоте главного рефлекса (в области угла $2\Theta \sim 29,4 \text{ \AA}$), но и по индексу кристалличности — это ширина пика на половине высоты (FWHM) или интегральная ширина главного пика, то есть отношение площади к высоте пика над фоном.

Обсуждение и заключение. Проведённые нами исследования позволили установить определённую закономерность: чем выше степень рекристаллизации вторичного кальцита, образованного из порландита, тем больше возраст каменной кладки, что подтверждается по объектам с подтверждённой датировкой по архитектуроведческим и археологическим данным. Сделанные нами сопоставления совместно со специалистами по истории архитектуры показали, что для большей части объектов ($\approx 80\text{--}85\%$) относительный возраст, определённый по нашим данным, коррелируется с историческим возрастом объектов башенных комплексов, установленном на основе анализа архитектурно-исторических и археологических данных. Для некоторых объектов такой корреляции не наблюдается. В основном это объекты, дата постройки которых не установлена или является спорной.

Исследования известковых кладочных растворов древних сооружений предлагаемым методом позволяют в некоторых случаях уточнить, а в некоторых случаях установить и подтвердить возраст древних башенных комплексов Ингушетии и их отдельных частей. Учитывая сложность и многофакторность задач по определению возраста объектов башенных комплексов Ингушетии, для разработки методики определения возраста известковых растворов по рекристаллизации вторичного кальцита требуется накопление большого количества фактических данных, создание базы эталонных образцов и скоординированная работа со специалистами по истории архитектуры и археологии. Работы, связанные с датировкой древних построек, являются достаточно трудоёмкими, а их результаты требуют тщательного анализа, поэтому могут проводиться длительное время. Изучение степени рекристаллизации кальцита известковых растворов может стать хорошим дополнением к уже имеющимся методам определения возраста памятников архитектурного наследия.

Список литературы / References

1. Крупнов Е.И. *Средневековая Ингушетия*, 2-е изд. Магас: Сердало; 2008. 256 с.
Krupnov EI. *Medieval Ingushetia*, 2nd Ed. Magas: Serdalo; 2008. 256 p. (In Russ.)
2. Шеина С.Г., Батаев Д.К., Малороев М.М., Батаева П.Д. Материалы и технологии для восстановления объектов башенного типа. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2022;49(3):146–151. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-3-146-151>
Sheina SG, Bataev DK, Maloroev MM, Bataeva PD. Materials and Technologies for the Restoration of Tower-Type Objects. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2022;49(3):146–151. (In Russ.) <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-3-146-151>
3. Сампиев И.М. К проблеме классификации боевых башен Ингушетии. *История, археология и этнография Кавказа*. 2023;19(1):221–240. <https://doi.org/10.32653/CH191221-240>
Sampiev IM. On the Issue of Classification of Military Towers of Ingushetia. *History, Archeology and Ethnography of the Caucasus*. 2023;19(1):221–240. <https://doi.org/10.32653/CH191221-240> (In Russ.)
4. Пищулина В.В. Варианты «народного» храмоостроения на территории Ингушетии как проявление религиозных контаминаций в архитектурном формообразовании храмов. *Инженерный вестник Дона*. 2022;7(91):348–364. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7796> (дата обращения: 01.08.2024).
Pishchulina VV. Variants of "Folk" Temple Construction on the Territory of Ingushetia as a Manifestation of Religious Contaminations in the Architectural Form-Formation of Temples. *Engineering Journal of Don*. 2022;7(91):348–364. (In Russ.) URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7796> (accessed: 01.08.2024).
5. Pishchulina V, Kotlyar V, Argun A. Integrated Cross-Disciplinary Approach to Dating the Architectural Heritage Objects Based on Abkhazia and Chechnya Architectural Monuments Dating back from 2nd to 11th Centuries. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Art Studies: Science, Experience, Education (ICASSEE 2018). Advances in Social Science, Education and Humanities Research. Volume 284*. Atlantis Press, Part of Springer Nature; 2018. P. 613–617. <https://doi.org/10.2991/icassee-18.2018.121>
6. Котляр В.Д., Пищулина В.В., Попов Ю.В., Талпа Б.В. Микроструктурные изменения в известковых растворах древних кирпичных кладок. *Строительные материалы*. 2021;(4):47–53. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-790-4-47-53>
Kotlyar VD, Pishchulina VV, Popov YuV, Talpa BV. Microstructural Changes in Lime Mortars of Ancient Brick Masonries. *Stroitel'nye Materialy (Construction Materials)*. 2021;(4):47–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-790-4-47-53>
7. Batt C. Archaeomagnetic Dating. In book: *Encyclopedia of Scientific Dating Methods*. Rink W, Thompson J (Eds.). Dordrecht: Springer; 2013. P. 1–9. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6326-5_11-1
8. Kotlyar VD. The Calcite Crystallinity and the Age of Limestone Brick Mortars of Medieval Objects of the North of the Byzantine Oecumene. In: *Proceedings of the Materials Science Forum, Vol. 974*. Trans Tech Publications; 2019. P. 83–89.

9. Пищулина В.В., Котляр В.Д. Новые данные о хронологии средневековых архитектурных объектов северных провинций Византийской Ойкумены. *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году*. 2020;72–81.

Pishchulina VV, Kotlyar VD. New Data on the Chronology of Medieval Architectural Objects of the Northern Provinces of the Byzantine Oycumena. In: *Collection of Scientific Papers of the RAACS "Fundamental, Exploratory and Applied Research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences on Scientific Support for the Development of Architecture, Urban Planning and the Construction Industry of the Russian Federation in 2019"*. Vol.1. Moscow: ASV Publ.; 2020. P. 72–81. (In Russ.)

10. Pishchulina V, Kotlyar V, Argun A. The medieval lime mortars for carrying out dating of monuments (on the example of objects of Abkhazia of the 2-11th c.). *Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics (TPACEE 2018)*. 2019;91:02006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199102006>

11. Pishchulina V, Kotlyar V, Argun A. Integrated Cross-Disciplinary Approach to Dating the Architectural Heritage Objects Based on Abkhazia and Chechnya Architectural Monuments Dating back from 2nd to 11th Centuries. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Art Studies: Science, Experience, Education (ICASSEE 2018)*. Advances in Social Science, Education and Humanities Research. Volume 284. Atlantis Press, Part of Springer Nature; 2018. P. 613–617. <https://doi.org/10.2991/icassee-18.2018.121>

12. Lyubomirskiy N, Bakhtin A, Fic S, Szafraniec M, Bakhtina T. Intensive Ways of Producing Carbonate Curing Building Materials Based on Lime Secondary Raw Materials. *Materials*. 2020;13(10):2304. <https://doi.org/10.3390/ma13102304>

13. Nikolaenko V, Lyubomirskiy N., Bakhtina T. The Effect of Forced Carbonation on the Change in the Structure of Lime-Containing Systems over Time. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;753:032078. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/3/032078>

14. Lyubomirskiy N.V., Bakhtina T.A., Bakhtin A.S., Fedorkin S.I. The Carbonate-Hardening Lime Construction Material Properties Formation during Their Long-Term Storage and Use under Normal Conditions. In: *Proceedings of the Materials Science Forum, Vol. 974*. Trans Tech Publications; 2019. P. 187–194. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.974.187>

15. Kotlyar V, Pishchulina V, Beskopylny A, Meskhi B, Popov Yu, Efremenko I. Estimation of the Age of Architectural Heritage Objects by Microstructural Changes of Calcite in Lime Mortars of Ancient Brickwork and Masonry. *Buildings*. 2021;11(6):240. <https://doi.org/10.3390/buildings11060240>

16. Falkenberg J, Mutterlose J, Kaplan U. Calcareous Nannofossils in Medieval Mortar and Mortar-Based Materials — A Powerful Tool for Provenance Analysis. *Archaeometry*. 2021;63(1):19–39. <https://doi.org/10.1111/arcm.12626>

Об авторе:

Владимир Дмитриевич Котляр, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных материалов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), , [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), diatomit_kvd@mail.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи

About the Author:

Vladimir D. Kotlyar, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Building Materials Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), diatomit_kvd@mail.ru

Conflict of Interest Statement: the author declares no conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript.

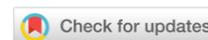
Поступила в редакцию/ Received 12.11.2024

Поступила после рецензирования/ Revised 26.11.2024

Принята к публикации/ Accepted 05.12.2024

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS



УДК 691.328.1

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-66-73>



EDN: UETQYD

Совершенствование теоретических концепций проектирования составов дисперсно-армированных бетонов

Т.К. Сапрыкина , В.И. Жаданов 

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Российская Федерация

 belova_tatyana_90@mail.ru

Аннотация

Введение. В строительном материаловедении важной задачей является получение дисперсно-армированных бетонов с заданными свойствами. На сегодняшний день имеется большой опыт экспериментальных и теоретических исследований в области проектирования составов дисперсно-армированных бетонов. Имеющиеся работы в большей степени решают задачи моделирования структуры дисперсно-армированных систем с позиций механики разрушения. Важной задачей является определение минимального объемного коэффициента армирования строительного композита. Разработанные различными исследователями модели пригодны для воспроизведения только в условиях ограниченных рецептурно-технологических факторов. Целью исследования является совершенствование теоретических подходов и разработка аналитической модели определения объемного содержания волокон в композите. В данной работе предлагается рассмотреть свойства дисперсно-армированных бетонов с позиций теории перколяции и фрактальной геометрии.

Материалы и методы. В настоящей статье проведен литературный анализ значительного количества экспериментальных данных из информационных ресурсов по теме дисперсного армирования бетонов. В работе применялся статистический анализ полученных данных и их аппроксимация. На основании полученных функций построены графики зависимостей фрактальной размерности волокон от анализируемых факторов.

Результаты исследования. В работе приведено теоретическое обоснование определения объемного коэффициента армирования фибробетона с помощью положений теории протекания. Проведен анализ и сравнение экспериментальных значений коэффициента армирования с теоретическими, полученными с помощью решения задачи сфер. Предложена модель для определения фрактальной размерности волокон в дисперсно-армированном бетоне. Проведен анализ имеющихся экспериментальных данных различных исследователей для установления степени влияния удельной поверхности волокон на показатель фрактальной размерности. Приведены зависимости для различных по материалу видов волокон, полученные аппроксимацией данных методом наименьших квадратов.

Обсуждение и заключения. Предложено определять фрактальную размерность композита аналитическим способом. Показано влияние относительной длины волокон и их удельной поверхности на показатель фрактальной размерности. Работа в данном направлении представляет определенный научный интерес, связанный с прогнозированием свойств дисперсно-армированных бетонов и проектированием их составов. Это, безусловно, способствует дальнейшему развитию теоретических концепций получения композитов на основе фибробетонов.

Ключевые слова: дисперсно-армированные бетоны, теоретические концепции, проектирование составов, объемный коэффициент армирования, теория перколяции, протекание, фрактальная размерность.

Для цитирования. Сапрыкина Т.К., Жаданов В.И. Совершенствование теоретических концепций проектирования составов дисперсно-армированных бетонов. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(4):66–73. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-66-73>

Improving Theoretical Concepts of Composition Design of Dispersedly-Reinforced Concretes

Tatyana K. Saprykina , Viktor I. Zhadanov 

Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

 belova_tatyana_90@mail.ru

Abstract

Introduction. Obtaining the dispersedly-reinforced concretes with given properties is an important objective of materials science in civil engineering. Today, a great deal of experimental and theoretical research in the field of designing the compositions of dispersedly-reinforced concretes is being held. The majority of the existing works solve mainly the problems of modeling the structure of dispersedly-reinforced systems from perspective of fracture mechanics. However, an important objective is to determine a minimum reinforcement volume ratio of the composite material. The models developed by different researchers can be reproduced only for the limited recipe and technological factors. The aim of the present research is to improve the theoretical approaches and develop an analytical model for determining the volume of fiber in a composite. The paper proposes to investigate the properties of dispersedly-reinforced concrete from perspective of the percolation theory and fractal geometry.

Materials and Methods. Literature analysis of a significant amount of experimental data from information sources on the topic of dispersed reinforcement of concrete was carried out in the article. The statistical analysis and approximation of the obtained data was made within the research. Based on the obtained functions, the graphs of the dependencies of the fractal dimension of fiber on the analysed factors were plotted.

Results. The paper presents the theoretical grounds for determining the volume ratio of fiber concrete reinforcement using provisions of the percolation theory. The analysis and comparison of the experimental values of the reinforcement ratio with the theoretical values obtained by solving a problem involving spheres was carried out. A model for determining the fractal dimension of fibers in dispersedly-reinforced concrete was proposed. The available experimental data of different researchers was analysed to establish the degree of influence of the specific surface area of fibers on the fractal dimension parameter. Dependencies obtained by approximating the data using the least squares method were presented for the different types of fibers sorted by material.

Discussion and Conclusion. It is proposed to determine the fractal dimension of the composite material by the analytical method. The influence of the relative length of the fibers and their specific surface area on the fractal dimension parameter was shown. The research in this direction may be of certain scientific interest in terms of forecasting the properties of dispersedly-reinforced concretes and design of their compositions. This, undoubtedly, will contribute to further development of the theoretical concepts of creating the fiber reinforced concrete composites.

Keywords: dispersedly-reinforced concrete, theoretical concepts, composition design, reinforcement volume ratio, percolation theory, percolation, fractal dimension

For Citation. Saprykina TK, Zhadanov VI. Improving Theoretical Concepts of Composition Design of Dispersedly-Reinforced Concretes. *Modern trends in construction, urban and territorial planning*. 2024;3(4):66–73. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-66-73>

Введение. В строительном материаловедении направление, связанное с созданием композитов на основе дисперсно-армированных бетонов, зародилось во второй половине XX века и до сих пор не утратило своей актуальности [1, 2]. Дисперсно-армированные бетоны широко используются в различных сферах строительного производства, в том числе в конструкциях общестроительного назначения, инженерных и специальных сооружениях [3].

Важной задачей является получение дисперсно-армированных бетонов с заданными свойствами, что возможно за счет совершенствования теоретических концепций, связанных с проектированием составов фибробетонов и прогнозированием их свойств. На сегодняшний день в данном направлении накоплен большой опыт экспериментальных и теоретических исследований. Методики, применяемые в работах, в основном носят эмпирический характер и пригодны для воспроизведения только в условиях ограниченных рецептурно-технологических факторов [4, 5].

Нельзя не отметить весомый вклад отдельных исследователей в формирование теоретических подходов проектирования составов дисперсно-армированных бетонов и, в частности, определения минимально необходимого объемного коэффициента армирования μ [6–8]. Так, в работах Ю.В. Пухаренко с сотрудниками предложена структурно-технологическая модель фибробетона, отражающая взаимодействие основных структурообразующих элементов композита и их взаимосвязь со свойствами получаемого материала [7, 9]. Также в этих работах предложены формулы для прогнозирования прочности фибробетона и определения оптимального коэффициента армирования μ . Методологической основой исследований послужило видоизмененное «правило смесей».

Несмотря на разработанные аналитические формулы, некоторые параметры определяются эмпирическим путем (например, прочность сцепления волокон с цементным камнем).

Известен также подход, согласно которому оптимальное объемное содержание армирующих волокон в бетоне определяется аналитически по критерию максимального напряжения трещинообразования $\sigma_{\text{крит}}$ (величина, при превышении которой рост трещин в материале становится энергетически возможным процессом). При этом число армирующих элементов на каждом масштабном уровне структуры композита должно соответствовать числу трещин [7]. Несомненным достоинством данного подхода является моделирование структуры дисперсно-армированных бетонов на различных масштабных уровнях с учетом не только силовых факторов, но и объема энергии, которую необходимо затратить при разрушении. Вместе с тем разработанные зависимости можно применять при ограниченной относительной длине армирующих элементов, равной $L/d = 80 \div 120$, что требует дополнительных исследований в случае применения минеральных или органических волокон, относительная длина которых чаще всего варьируется в пределах от $L/d = 300$ до нескольких тысяч.

В данной работе предлагается рассмотреть свойства дисперсно-армированных бетонов с учетом положений теории перколяции (протекания) и фрактальной геометрии. В фибробетонах протекание возникает при определенном количестве армирующих элементов и локализации их в объеме композита, при которых формируемые кластеры оказываются «связанными» друг с другом. Таким образом, в композите образуется бесконечный кластер, геометрия которого определяет физические и физико-химические свойства системы [10, 11]. Целью настоящей работы является изучение фрактальной размерности композитов на основе дисперсно-армированных бетонов. Работа в данном направлении представляет определенный научный интерес, связанный с прогнозированием свойств дисперсно-армированных бетонов и проектированием их составов.

Материалы и методы. В настоящей статье проведен литературный анализ значительного количества экспериментальных данных из информационных ресурсов (монографий, диссертаций, научных статей) по теме дисперсного армирования бетонов. В качестве анализируемых параметров были выбраны:

- вид вяжущего, примененного при изготовлении образцов;
- вид матрицы (крупнозернистый бетон, мелкозернистый бетон, цементный камень);
- вид волокон и соотношение длины к диаметру L/d ;
- объемное содержание волокон μ ;
- прочностные характеристики дисперсно-армированного композита.

Экспериментальные данные были обобщены и сравнивались с теоретическими значениями объемного коэффициента μ , определенного с помощью задачи сфер [12]. Задача сфер играет в теории протекания особую роль — с ее помощью пытаются понять многие физические переходные процессы.

Также в работе применялся статистический анализ экспериментальных данных и их аппроксимация. На основании полученных функций построены графики зависимостей фрактальной размерности от анализируемых факторов.

Результаты исследования. Объемный коэффициент армирования μ , при котором происходит протекание, можно определить с помощью модели задачи сфер [12]. Эта модель играет ключевую роль в теории протекания, помогая понять многие физические процессы перехода. Представим, что волокна в хаотично армированном композите находятся внутри сфер, диаметр которых равен длине волокна L . Сферы считаются связанными, если центр одной из них находится внутри другой. Протекание возникает при достижении определенной концентрации пересекающихся сфер, которая определяется (1):

$$\frac{\pi}{6} D^3 n_V = B_{c,V}, \quad (1)$$

где $B_{c,V}$ — среднее количество пересекающихся сфер ($B_{c,V} = 2,7 \pm 0,1$); D — диаметр сферы (численно совпадает с длиной волокна L); n_V — концентрация сфер в единице объема.

Коэффициент армирования по объему композиционного материала равен:

$$\mu = \frac{V_l}{V_0}, \quad (2)$$

где V_l — объем волокон; V_0 — объем композита.

После преобразования получим:

$$\mu = \frac{3}{2} B_{c,V} \left(\frac{d_l}{L} \right)^2, \quad (3)$$

где d_l — диаметр волокна.

Значения объемного коэффициента армирования μ , рассчитанные по формуле (3) (рис. 1, таблица 1), являются минимальными и достаточными для формирования в дисперсно-армированной матрице бесконечного кластера [13]. Однако применительно к реальным объектам необходимо учитывать механические и физико-механические свойства материала волокон.

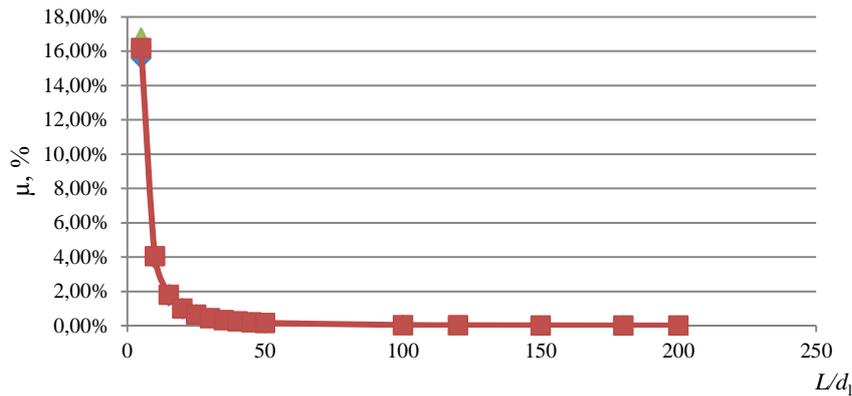


Рис. 1. Зависимость $\mu = (L/d_1)$ [13, с. 62]

Таблица 1

Значения μ (%), рассчитанные по формуле (3)

$B_{c,v}$	L/d_1									
	10	20	30	40	50	100	120	150	200	
2,6	3,90	0,98	0,43	0,24	0,16	0,04	0,027	0,017	0,010	
2,7	4,05	1,01	0,45	0,25	0,16	0,04	0,028	0,018	0,010	
2,8	4,20	1,05	0,47	0,26	0,17	0,04	0,029	0,019	0,011	

На основании литературного анализа монографий, научных статей и диссертационных исследований по теме дисперсного армирования получены данные значений $\mu(R_{max})$ (при которых достигается максимальная прочность композита), используемых на практике. Также проведено их сопоставление с теоретическими значениями (таблица 2).

Анализируя данные таблицы 2, можно сделать вывод о том, что теоретическая формула применима только для небольших значений L/d_1 . Очевидно, длина волокон (особенно минеральных и органических) может изменяться в процессе приготовления фибробетонной смеси в результате дробления или изгиба. Поэтому фактическое L/d_1 будет существенно меньше. Кроме того, неоднородности в виде пор и включений заполнителя изменяют пространственную ориентацию волокон. Совокупность волокон в хаотично армированном бетоне будет иметь фрактальную размерность в диапазоне $1 < D < 3$ [14].

Таблица 2

Значения объемных коэффициентов армирования μ для различных видов армирующих волокон

№ п/п	Вид волокон	Отношение L/d_1	Содержание волокон, % по объему	
			экспериментальное	теоретическое
1	Стальные волокна	12 ÷ 120	6,9	3,45 ÷ 0,010
2	Минеральные волокна	300 ÷ 2000	2,0	$0,35 \times 10^{-2} \div 1,5 \times 10^{-4}$
3	Органические волокна	100 ÷ 1500	0,9	$0,041 \div 0,35 \times 10^{-3}$

Примечание: экспериментальные значения $\mu(R_{max})$ определены по объему цементного камня в 1 м^3 бетона.

Если предположить, что:

$$\mu = \frac{3}{2} B_{c,v} \left(\frac{d_l}{L} \right)^2 = \left(\frac{d_l}{L} \right)^{D_H}, \tag{4}$$

где D_H — размерность Хаусдорфа (фрактальная размерность).

Тогда D_H равна:

$$D_H = 2 + \frac{\ln\left(\frac{3}{2} B_{c,v}\right)}{\ln\left(\frac{d_l}{L}\right)}. \tag{5}$$

Значения фрактальной размерности приведены в таблице 3.

Таблица 3

Значения фрактальной размерности при увеличении L/d_1

$B_{c,v}$	L/d_1										
	стальные волокна									минеральные волокна	
	10	20	30	40	50	100	120	150	200	1000	2000
2,6	1,41	1,55	1,60	1,63	1,65	1,70	1,72	1,73	1,74	1,80	1,82
2,7	1,39	1,53	1,59	1,62	1,64	1,70	1,71	1,72	1,74	1,80	1,82
2,8	1,38	1,52	1,58	1,61	1,63	1,69	1,70	1,71	1,73	1,79	1,81

Как видно из вышеприведенной таблицы, с увеличением соотношения L/d_l фрактальная размерность Хаусдорфа увеличивается, что связано с увеличением дисперсности волокон по мере уменьшения их диаметра и более разнообразной их ориентацией в объеме бетона. Показателем дисперсности волокон является их удельная поверхность $S_{i,u}$, отнесенная к объему волокна, размерность ($\text{м}^2/\text{м}^3$):

$$S_{i,u} = \frac{2}{L} \left(2 \frac{L}{d_l} + 1 \right). \quad (6)$$

Отсюда:

$$d_l/L = \frac{4}{S_{i,u}L - 2}. \quad (7)$$

Фрактальная размерность в этом случае будет равна:

$$D_H = 2 + \frac{\ln\left(\frac{3}{2} B_{c,v}\right)}{\ln\left(\frac{4}{S_{i,u}L - 2}\right)}. \quad (8)$$

Для установления степени влияния удельной поверхности волокон на показатель фрактальной размерности Хаусдорфа проведен анализ имеющихся экспериментальных данных различных исследователей по предложенной выше формуле (таблица 4).

Таблица 4

Исходные данные для установления зависимостей

№ п/п	Объем цементного камня, V_0 , м^3	Длина волокна, L , мм	Диаметр волокна, d_l , мм	Соотношение, L/d_l	Объемный коэффициент армирования, $\mu_v(R_{max})$	Удельная поверхность волокон, $S_{i,u}$, $\text{м}^2/\text{м}^3$	Фрактальная размерность Хаусдорфа, D_H
Стальные волокна							
1	0,16	30	0,3	100	0,05	13400,00	1,70
2	0,21	50	1,0	50	0,024	4040,00	1,64
3	0,26	60	0,8	80	0,1	5366,67	1,68
4	0,26	33	0,9	35	0,1	4303,03	1,61
5	0,34	11	0,2	70	0,12	25636,36	1,67
6	0,32	20	0,2	100	0,06	20100,00	1,70
7	0,15	054	1,0	54	0,13	4037,04	1,65
8	0,44	32	0,3	100	0,07	12562,50	1,70
9	0,42	11	0,2	70	0,23	25636,36	1,67
10	0,14	54	1,0	54	0,14	4037,04	1,65
11	0,25	50	0,4	12,5	0,04	10400,00	1,45
12	0,25	10	0,4	25	0,04	10200,00	1,57
13	0,25	15	0,4	37,5	0,04	10133,33	1,61
14	0,2	40	0,8	50	0,08	5050,00	1,64
15	0,2	30	0,7	46	0,06	6200,00	1,63
16	0,2	55	0,7	75	0,06	5490,91	1,68
17	0,2	25	0,6	40	0,06	6480,00	1,62
18	0,2	45	0,6	75	0,06	6711,11	1,68
19	0,33	50	0,8	63	0,015	5080,00	1,66
20	0,33	30	0,8	37,5	0,015	5066,67	1,61
21	0,33	40	0,8	50	0,015	5050,00	1,64
22	0,33	32	0,9	35	0,015	4437,50	1,61
23	0,3	15	0,3	50	0,067	13466,67	1,64
24	0,23	30	0,8	37,5	0,08	5066,67	1,61
Минеральные волокна							
25	0,15	14	0,015	930	0,0043	266810	1,80
26	0,32	9	0,01	900	0,03	400220	1,79
27	0,24	12	0,013	920	0,033	307860	1,80
28	0,27	15	0,012	1250	0,04	333470	1,80
29	0,25	13	0,01	1300	0,036	400154	1,80
30	0,15	12	0,018	670	0,0008	222390	1,78
31	0,29	12	0,015	800	0,002	266830	1,79
32	0,33	12	0,012	1000	0,007	333500	1,80
22	0,24	12	0,012	1000	0,008	333500	1,80

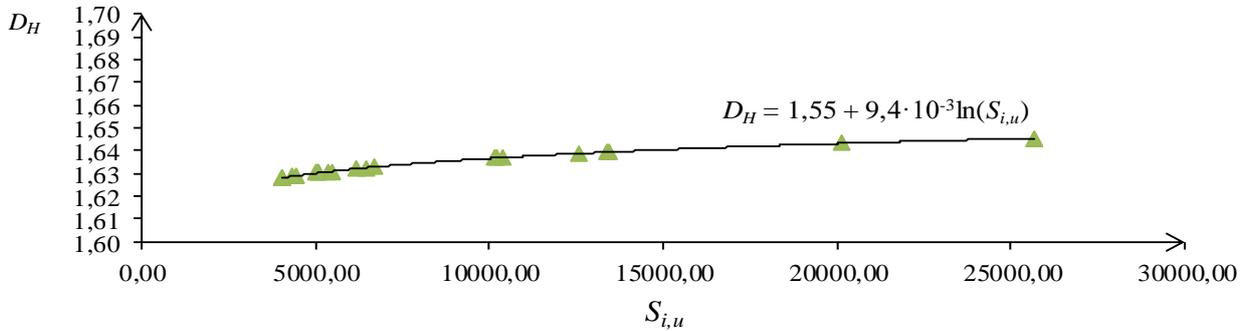
Примечание: анализировались источники, в которых имелись необходимые исходные данные.

Зависимость $D_H = f(S_{i,u})$ описывается логарифмической функцией вида:

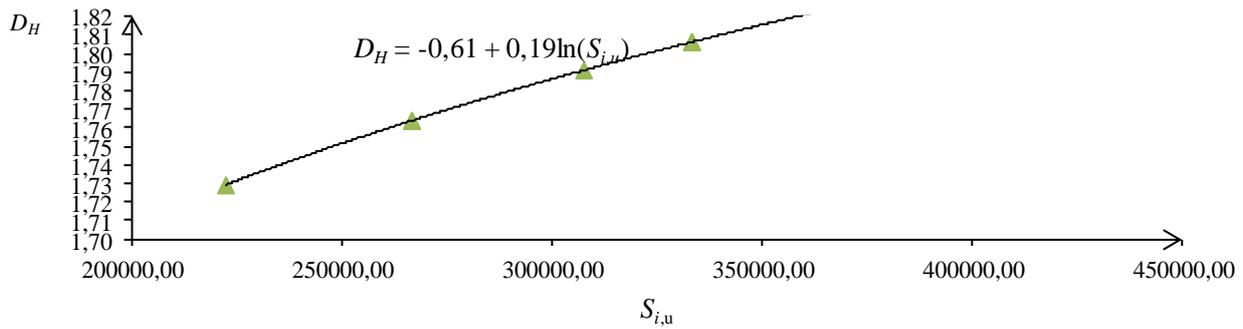
$$D_H = a + b \cdot \ln(S_{i,u}), \tag{9}$$

где a, b — эмпирические коэффициенты, приведенные в таблице 5.

На рис. 2 приведены зависимости $D_H = f(S_{i,u})$ для различных видов волокон, полученные аппроксимацией исходных экспериментальных данных методом наименьших квадратов. В таблице 5 указаны значения эмпирических коэффициентов и статистических показателей функций.



а)



б)

Рис. 2. Зависимость фрактальной размерности от удельной поверхности волокон: а — для стальных волокон; б — для минеральных волокон

Таблица 5

Значения эмпирических коэффициентов и статистических показателей функций

Вид волокон	Коэффициенты		Среднеквадратическое отклонение, σ	Коэффициент вариации, v , %
	a	b		
Стальные	1,55	$9,4 \times 10^{-3}$	0,052	3,0
Минеральные	-0,61	0,19	0,035	1,9

В обоих случаях зависимости имеют восходящий характер, что подтверждает вышеуказанное предположение. Однако при их сопоставлении четко наблюдается, что в случае применения стальных волокон значение удельной поверхности оказывает малое влияние на показатель фрактальной размерности. В области больших значений $S_{i,u}$, характерных для минеральных волокон, степень увеличения D_H выше.

В подтверждение рассчитаем коэффициенты корреляции $\text{cov}(D_H, S_{i,u})$, а также $\text{cov}(D_H, L/d_i)$. Так, для стальных волокон коэффициент корреляции составляет $\text{cov}(D_H, S_{i,u}) = 0,22$, $\text{cov}(D_H, L/d_i) = 0,86$, а для минеральных — $\text{cov}(D_H, S_{i,u}) = 0,73$, $\text{cov}(D_H, L/d_i) = 0,99$.

Обсуждение и заключение. Полученные данные указывают на слабую взаимозависимость удельной поверхности стальных волокон от их фрактальной размерности, в то же время в обоих случаях значимое влияние

оказывает именно относительная длина волокон L/d_f . Возможно, это связано с тем, что волокна изгибаются в композите, и их длина по факту варьируется, а удельная поверхность остается постоянной величиной.

Таким образом, в настоящей работе предложено определять фрактальную размерность композита аналитическим путем, несмотря на то что в настоящее время предложены различные экспериментальные методы определения фрактальной размерности. Статистический анализ обширных экспериментальных данных позволяет предположить, что фрактальная размерность может служить надежным инструментом для оценки оптимальности структуры композитных материалов.

Работа в данном направлении представляет определенный научный интерес, связанный с прогнозированием свойств дисперсно-армированных бетонов и проектированием их составов. Это, безусловно, способствует дальнейшему развитию теоретических концепций получения композитов на основе фибробетонов.

Список литературы / References

1. Rusanov VE, Maslov PS, Alekseev VA. The Effectiveness of Using Fibre-Reinforced Concrete in Underground Construction: Experience and Prospects. *Nanotechnologies in Construction*. 2024;16(3):276–287. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-276-287> (In Russ.)
2. Нажуев М.П., Самофалова М.С., Ельшаева Д.М., Жеребцов Ю.В., Доценко Н.А., Курбанов Н.С. и др. Влияние рецептурных факторов на прочностные характеристики базальтофибробетонов. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2021;(7):24–32. <http://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-7-24-32>
3. Nazhuyev MP, Samofalova MS, Elshaeva DM, Zherebtsov YuV, Dotsenko NA, Kurbanov NS, et al. Influence of Recipe Factors on Strengths Characteristics of Basalt Fiber Concrete. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named after V. G. Shukhov*. 2021;(7):24–32. (In Russ.) <http://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-7-24-32>
4. Ибэ Е.Е., Шибаева Г.Н., Артемьев Н.А., Миколайчик А.А. Дисперсно-армированные бетоны на основе базальтового волокна. *Инженерный вестник Дона*. 2021;(2(74)):245–260. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_45485957_89333321.pdf (дата обращения: 01.11.2024).
5. Ibe EE, Shibaeva GN, Artemiev NA, Mikolaichik AA. Dispersed-Reinforced Concrete Based on Basalt Fiber. *Engineering Journal of Don*. 2021;(2(74)):245–260. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_45485957_89333321.pdf (accessed: 01.11.2024).
6. Park JJ, Yoo DY, Kim S, Kim SW. Benefits of Synthetic Fibers on the Residual Mechanical Performance of UHPFRC after Exposure to ISO Standard Fire. *Cement and Concrete Composites*. 2019;104:103401. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103401>
7. Althoey F, Zaid O, Serbanoiu AA, Gradinaru CM, Sun Y, Arbili MM, et al. Properties of Ultra-Performance Selfcompacting Fiber-Reinforced Concrete Modified with Nanomaterials. *Nanotechnology Reviews*. 2023;12(1):20230118. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2023-0118>
8. Рабинович Ф.Н. *Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкция*. М.: Издательство АСВ; 2011. 642 с.
9. Rabinovich FN. *Composites Based on Disperse-Reinforced Concrete. Theory and Design Issues, Technology, Design*. Moscow: ASV Publ.; 2011. 642 p. (In Russ.)
10. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Оценка эффективности дисперсного армирования бетонов по показателям прочности и трещиностойкости. *Вестник СибАДИ*. 2022;19(5(87)):752–761. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761>
11. Pukharenko YuV, Pantelev DA, Zhavoronkov MI. Evaluation of Dispersion Reinforcement in Concrete in Terms of Strength and Crack Resistance. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(5(87)):752–761. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761>
12. Коротких Д.Н. *Многоуровневое дисперсное армирование структуры мелкозернистого бетона и повышение его трещиностойкости*. Автореф. дис. канд. техн. наук. Воронеж; 2001. 21 с.
13. Korotkikh DN. *Multilevel Dispersed Reinforcement of the Structure of Fine-Grained Concrete and Increasing Its Crack Resistance*. Extended abstract of Cand. Sci. (Eng.) Dissertation. Voronezh; 2001. 21 p. (In Russ.)
14. Пухаренко Ю.В., Инчик В.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Проектирование составов полиармированных фибробетонов. *Вестник гражданских инженеров*. 2018;3(68):118–122. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2018-15-3-118-122>
15. Pukharenko YuV, Inchik VV, Pantelev DA, Zhavoronkov MI. Designing of Poly-Fiber-Reinforced Concrete Compositions. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov (Bulletin of Civil Engineers)*. 2018;3(68):118–122. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2018-15-3-118-122>
16. Федер Е. *Фракталы*. М.: Мир; 1991. 254 с.

Feder E. *Fractals*. Moscow: Mir Publ.; 1991. 254 p. (In Russ.)

11. Терехов С.В. *Фракталы и физика подобия*. Донецк: Цифровая типография; 2011. 255 с.

Terekhov SV. *Fractals and Physics of Similarity*. Donetsk: Digital Printing House; 2011. 255 p. (In Russ.)

12. Эфрос А.Л. *Физика и геометрия беспорядка*. М.: Наука; 1982. 270 с.

Efros AL. *Physics and Geometry of Disorder*. Moscow: Nauka Publ.; 1982. 270 p. (In Russ.)

13. Зыонг Тхань Куй. *Высокопрочные легкие фибробетоны конструкционного назначения*. Дис. канд. техн. наук. Москва; 2020. 201 с.

Duong Thanh Quy. *High-Strength Lightweight Fiber-Reinforced Concrete for Structural Purposes*. Cand. Sci. (Eng.) Dissertation. Moscow; 2020. 201 p. (In Russ.)

14. Омурбекова Г.К., Жапаркулов А.М., Салиева М.Г. Моделирование зависимости прочности бетона от фрактальной размерности кварцевого песка. *Наука. Образование. Техника*. 2024;2(80):29–33. <https://doi.org/10.54834/vi2/370>

Omurbekova GK, Zhaparkulov AM, Salieva MG. Modeling of Concrete Strength Dependence on Fractal Dimension of Silica Sand. *Science. Education. Technology*. 2024;(2(80)):29–33. <https://doi.org/10.54834/vi2/370>

Об авторах:

Татьяна Константиновна Сапрыкина, старший преподаватель кафедры технологии строительного производства Оренбургского государственного университета (460018, Российская Федерация, г. Оренбург, пр. Победы, 13), кандидат технических наук, [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9000-0000), belova_tatyana_90@mail.ru

Жаданов Виктор Иванович, заведующий кафедрой строительных конструкций Оренбургского государственного университета (460018, Российская Федерация, г. Оренбург, пр. Победы, 13), доктор технических наук, профессор, [ResearcherID](https://orcid.org/0009-0001-9000-0000), [ScopusID](https://orcid.org/0009-0001-9000-0000), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9000-0000), organ-2003@bk.ru

Заявленный вклад авторов:

Т.К. Сапрыкина: формирование основной концепции, цели и задач исследования, анализ и статистическая обработка данных литературных источников, формирование выводов;

В.И. Жаданов: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Tatyana K. Saprykina, Cand.Sci. (Engineering), Senior Lecturer of the Construction Production Technology Department, Orenburg State University (13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9000-0000), belova_tatyana_90@mail.ru

Viktor I. Zhadanov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Construction Production Technology Department, Orenburg State University (13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation), [ResearcherID](https://orcid.org/0009-0001-9000-0000), [ScopusID](https://orcid.org/0009-0001-9000-0000), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9000-0000), organ-2003@bk.ru

Claimed Contributions:

TK Saprykina: formulating the main concept, aim and objectives of the study, analysis and statistical processing of data from the literature sources, formulating the conclusions;

VI Zhadanov: scientific supervision, analysis of the research results, refining the text, correcting the conclusions.

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

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

Поступила в редакцию/ Received 18.11.2024

Поступила после рецензирования/ Revised 01.12.2024

Принята к публикации/ Accepted 09.12.2024

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS



УДК 667.6

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-74-81>

Влияние окружающей среды на процесс «слеживания» в многокомпонентных зеленых цементах



EDN: RQRKID

А.К. Халюшев , Е.А. Колесниченко 

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

✉ khaljushev@mail.ru

Аннотация

Введение. Проблемы ресурсо- и энергосбережения при производстве цемента и бетонов на их основе играют в мире большое значение. Важным направлением в решении этих проблем является разработка зеленых цементов, что содержат в своем составе разные минеральные добавки природного и техногенного происхождения. Достоинства зеленых цементов в сравнении с клинкерными цементами раскрываются также с позиций, как экологического фактора — снижение выбросов в атмосферу углекислого газа, применение побочных продуктов промышленности, так и технического — улучшение технологических свойств бетонных смесей, улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств бетонов. В тоже время замена клинкерной составляющей портландцемента минеральными компонентами приводит к изменению физико-механических свойств цемента в том числе при взаимодействии с окружающей средой на процесс «слеживания». Исследования в статье направлены на изучение влияния длительного хранения без добавочных цементов и многокомпонентных зеленых цементов в условиях свободного обмена с окружающей средой на физико-механические свойства цементного камня.

Материалы и методы. При проведении экспериментов применяли различные типы цементов. Многокомпонентные зеленые цементы получали в лаборатории совместным помолом со шлаком и золой-унос соответственно. Для улучшения процесса помола и замедления процесса сорбции в состав многокомпонентных зеленых цементов вводили добавку для интенсификации помола. Влияние окружающей среды на процесс сорбции цементов оценивали с помощью измерения косвенных параметров: удельной поверхности, угла естественного откоса, насыпной плотности и прочности при сжатии цементного камня.

Результаты исследования. Полученные результаты свидетельствуют о том, что удельная поверхность проб цемента, хранившихся на открытом воздухе в течение 30 дней вследствие процесса «слеживания» значительно снижается для цементов первого типа в среднем на 25 %, а для многокомпонентных зеленых цементов этот процесс происходит менее интенсивно и составляет 15 %. Схожая закономерность наблюдается при измерении угла естественного откоса и насыпной плотности. Уменьшение угла естественного откоса и высокие значения насыпной плотности для цемента первого типа связаны с активной сорбцией влаги из окружающей среды, которая приводит к образованию гидратных «мостиков» при взаимном контакте частиц. Снижение предела прочности при сжатии образцов цементного камня, испытанных в возрасте 28 суток твердения по сравнению с контрольными образцами, происходит в среднем на 25–30 % для цементов первого типа, и в меньшей степени на 15–20 % это наблюдается для многокомпонентных зеленых цементов.

Обсуждение и заключение. При хранении цемента разных типов в условиях свободного обмена с окружающей средой происходит сорбция влаги и на поверхности частиц образуются гидратные «мостики». Этот процесс происходит более интенсивно для цементов первого типа, так как поверхность частиц очень активна и соответственно быстрее гидратирует, что и отражается на снижении его активности на 30 %. Вместе с тем значительно меньше теряют активность на 20 % многокомпонентные зеленые цементы. Данная закономерность объясняется менее активной поверхностью частиц минеральных добавок присутствующих в составе, а также введением в состав добавки – интенсификатора помола.

Ключевые слова: аутогезия, угол естественного откоса, многокомпонентные зеленые цементы, удельная поверхность, слеживание, прочность при сжатии

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

Для цитирования. Халюшев А.К., Колесниченко Е.К. Влияние окружающей среды на процесс слеживания в многокомпонентных зеленых цементах. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(4):74–81. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-74-81>

Original Empirical Research

“Caking” Process in Green Cement Composites under the Impact of Environment

Alexander K. Khalyushev , Elena A. Kolesnichenko 

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

✉ khaljushev@mail.ru

Introduction. The problems of resource and energy saving during production of cements and concretes on their basis are of great importance in the world. An important trend in solving these problems is the development of green cements, which contain various mineral additives of natural and anthropogenic origin. The advantages of the green cements compared to the clinker-based cements are revealed from both the environmental point of view — reduction of carbon dioxide emissions into the atmosphere, use of the industrial by-products, and the technical point of view — improvement of the technological properties of concrete mixes, improvement of the physical, mechanical and operational properties of concretes. At the same time, replacement of the clinker component in Portland cement by the mineral components leads to the change of the physical and mechanical properties of cement, including that taking place during the “caking” process in conditions of interaction with the environment. The research presented in the paper aims at studying the effect of long-term storage of plain cements and green cement composites in conditions of free interaction with the environment on the physical and mechanical properties of the cement stone.

Materials and Methods. Various types of cements were used in the experiments. Green cement composites were obtained in the laboratory by intergrinding with the slag and fly-ash respectively. To improve the grinding process and inhibit the sorption process, a grinding intensifying agent was added into the composition of green cement composites. The impact of the environment on the cement sorption process was assessed by measuring indirect parameters: specific surface area, angle of natural repose, bulk density and cement stone compressive strength.

Results. The obtained results indicate that the specific surface area of cement samples stored in the open air for 30 days reduces significantly due to the “caking” process, on average by 25% in type I cements, whereas in green cement composites this process is less intense and amounts to 15%. A similar consistent pattern is observed when measuring the angle of repose and bulk density. The decrease in the angle of repose and high values of bulk density for type I cement are related to the active sorption of moisture from the environment, which leads to the formation of hydrate “bridges” upon interaction of particles. Compared to the control samples, the compressive strength in the cement stone samples tested at the age of 28 days of curing decreases on average by 25–30% in type I cements and by a less extent of 15–20% in green cement composites.

Discussion and Conclusion. When storing different types of cement in conditions of free interaction with the environment, moisture is sorbed and the hydrate “bridges” are formed on the surface of the particles. This process goes more intensely in type I cement due to the highly active surfaces of its particles, which hydrate faster, resulting in a decrease of cement activity by 30%. At the same time, the green cement composites lose their activity less significantly – by 20%. This consistent pattern can be explained by the less active surfaces of the particles of mineral additives included into the composition, as well as by addition of a grinding intensifying agent into a composition.

Keywords: autohesion, angle of natural repose, green cement composites, specific surface area, caking, compressive strength

Acknowledgements. The authors would like to thank the editorial office and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the comments provided, which enhanced the quality of the article.

For Citation. Khalyushev AK, Kolesnichenko EK. “Caking” Process in Green Cement Composites under the Impact of Environment. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(3):74–81. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-74-81>

Введение. Мировая строительная отрасль сталкивается с растущим давлением, направленным на решение проблем воздействия на окружающую среду традиционного производства цемента, которое несет ответственность за значительные выбросы углекислого газа CO_2 [1]. Разработка низкоуглеродных материалов на основе цемента имеет решающее значение для достижения цели устойчивого развития в строительной отрасли. Это можно решить прежде всего за счет сокращения выбросов парниковых газов и потребления энергии [2]. Одно из широко принятых направлений включает частичную замену цемента дополнительными минеральными компонентами, такими как гранулированный доменный шлак, который приобрел известность благодаря своим экологическим и экономическим достоинствам [3].

Применение минеральных добавок в цементе снижает выбросы углерода, минимизирует потребление природных ресурсов и снижает производственные затраты, способствуя более широким целям углеродной нейтральности и устойчивому развитию энергосберегающих зеленых технологий при производстве вяжущих веществ.

Зола-унос одновременно со шлаком широко применяется в качестве одной из универсальных минеральных добавок в мировой бетонной промышленности [5]. Зола-унос исторически обеспечивает широкий спектр достоинств для бетонных смесей и бетона, улучшая удобоукладываемость, замедленное тепло при гидратации, повышение механических свойств, долговечность [6–10]. Основным механизмом, с помощью которого зола-унос улучшает бетон, заключается в пуццолановой реакции между гидроксидом кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) и аморфными алюмосиликатами в золе с образованием гидросиликатов кальция (CSH). Между цементом и водой также образуется гелеобразная фаза, называемая гидросиликатом кальция (CSH), но она имеет пористую структуру, и без введения такой пуццолановой добавки гидросиликат кальция становится уязвим для выщелачивания кальция [11, 12].

Процесс формирования структуры и свойств композиционных строительных материалов на основе портландцемента реализуется через межчастичные взаимодействия с образованием структурных агрегатов. Уровень этих взаимодействий зависит от поверхностной активности индивидуальных частиц, расстояния между ними и соотношения размеров взаимодействующих частиц.

Качественным отличием высокодисперсных порошков от грубодисперсных является способность первых образовывать устойчивые разветвленные структуры и агрегаты, что обусловлено аутогезионным межчастичным взаимодействием.

Аутогезия частиц может быть вызвана различными силами: молекулярными, электрическими, магнитными, капиллярными, силами механического зацепления. Ее величина зависит от природы материала частиц, упруго-пластических свойств, размеров, формы, шероховатости частиц, наличия адсорбционных пленок, температуры, влажности, степени сближения частиц.

В свою очередь поверхностная активность твердой фазы определяется распределением и концентрацией локальных участков с нерегулярной структурой, отличающихся повышенной свободной энергией и реакционной способностью. При этом активные центры поверхности, стремясь скомпенсировать ненасыщенные связи, адсорбируют из внешней среды противоионы или полярные молекулы.

Известно, что даже при благоприятных условиях транспортирования и хранения на цемент воздействует CO_2 и пары воды, содержащиеся в воздухе. При этом в результате адсорбции молекул воды поверхность частиц цемента гидратирует, образуются гидратные соединения и CaCO_3 , обуславливающие снижение предела прочности при сжатии цементного камня. Этот процесс связан с уменьшением удельной поверхности цемента, снижением удельной концентрации и электрического заряда активных центров различной природы, влияющих на процессы структурообразования в цементной системе (рис. 1).

Целью научно-исследовательской работы является установление влияния длительного хранения многокомпонентных зеленых цементов в условиях свободного обмена с окружающей средой на механические свойства цементного камня.

Материалы и методы. При проведении экспериментов применяли различные типы цементов. Был выбран цемент нормированного состава первого типа от производителя ЦЕМ I 42,5 N (ПЦ) и лабораторный ЦЕМ I 42,5 N (ЛЦ). Многокомпонентные зеленые цементы второго типа получали в лаборатории совместным помолом соответственно со шлаком ЦЕМ II/В-III 42,5 (ЛЦДШ) и золой-унос ЦЕМ II/В-З 42,5 (ЛЦДЗ). Для улучшения процесса помола и замедления процесса сорбции в состав многокомпонентных зеленых цементов вводили добавку для интенсификации помола SikaGrind®-200 на основе аминов в количестве 0,03 %. Предварительно перед проведением экспериментов пробы цемента массой 2 кг высушивали при температуре 105–110 °С. Химический состав минеральных добавок представлен следующими основными оксидами: доменный гранулированный шлак (SiO_2 — 38,14 %; CaO — 46,5 %; Al_2O_3 — 6,13 % и др.), зола-унос (SiO_2 — 59,48 %; CaO — 3,0 %; Al_2O_3 — 22,4 % и др.).

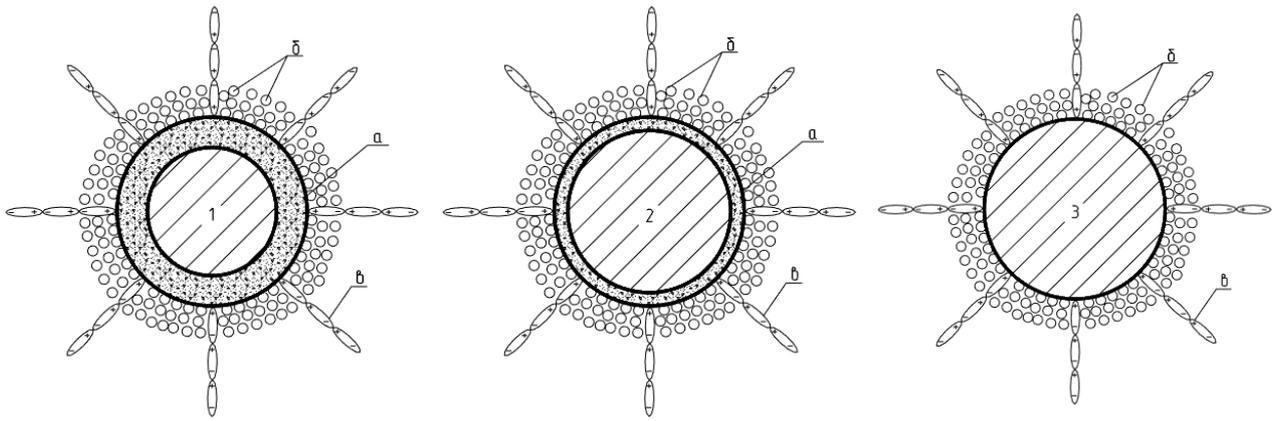


Рис. 1. Влияние окружающей среды на процесс «слеживания» цемента:
1 — ПЦ, ЛЦ; 2 — ЛЦДШ; 3 — ЛЦДЗ; а — CaCO_3 ; б — CO_2 ; в — H_2O

Гранулометрический состав цемента оценивали при помощи лазерного анализатора частиц Microsizer-201С. Удельную поверхность определяли методом воздухопроницаемости, который основан на измерении скорости прохождения воздуха через слой материала стандартного объема при помощи прибора ПСХ-10М. Для оценки аутогезии сыпучих материалов применяли ряд косвенных характеристик, в частности угол естественного откоса, который определяется измерением диаметра и высоты конуса, образованного путем насыпания цемента из воронки с определенной высоты (рис. 2 а) или при извлечении шпателя из слоя сыпучего материала (рис. 2 б).

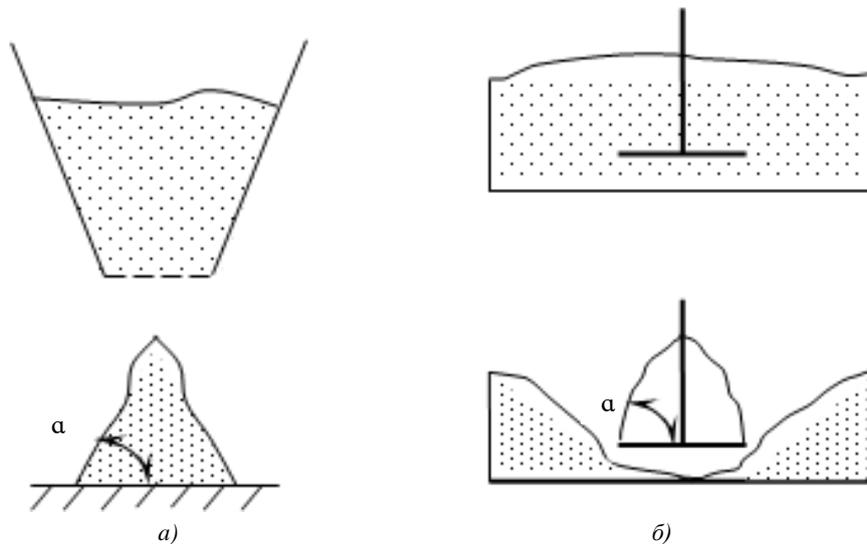


Рис. 2. Косвенные методы определения угла естественного откоса минеральных дисперсных материалов:
а — метод «воронки»; б — метод «шпателя»

Образовавшийся угол естественного откоса отражает суммарное воздействие сил аутогезии и внутреннего трения на цемент.

Величину насыпной плотности для цемента определяли по стандартной методике.

Результаты исследования. Гранулометрический состав цемента, представленный на рис. 3, показывает, что все типы цемента находятся приблизительно в одном диапазоне. Однако у цемента от производителя (ПЦ) наблюдается более тонкий и равномерный гранулометрический состав фракции, изменяющейся в пределах от 10 до 25 мкм, в сравнении с цементами, полученными в лаборатории.

Основная доля частиц для цемента, приготовленного в лаборатории, приходится на частицы со средним размером зерен от 20 до 25 мкм. При этом увеличенное содержание фракции от 0 до 5 мкм соответствует двум типам цемента (ЛЦ, ЛЦДШ). Наличие мелких фракций может привести к более значительному падению прочности из-за их увеличенной сорбции влаги с образованием гидратных «мостиков» на границе раздела фаз.

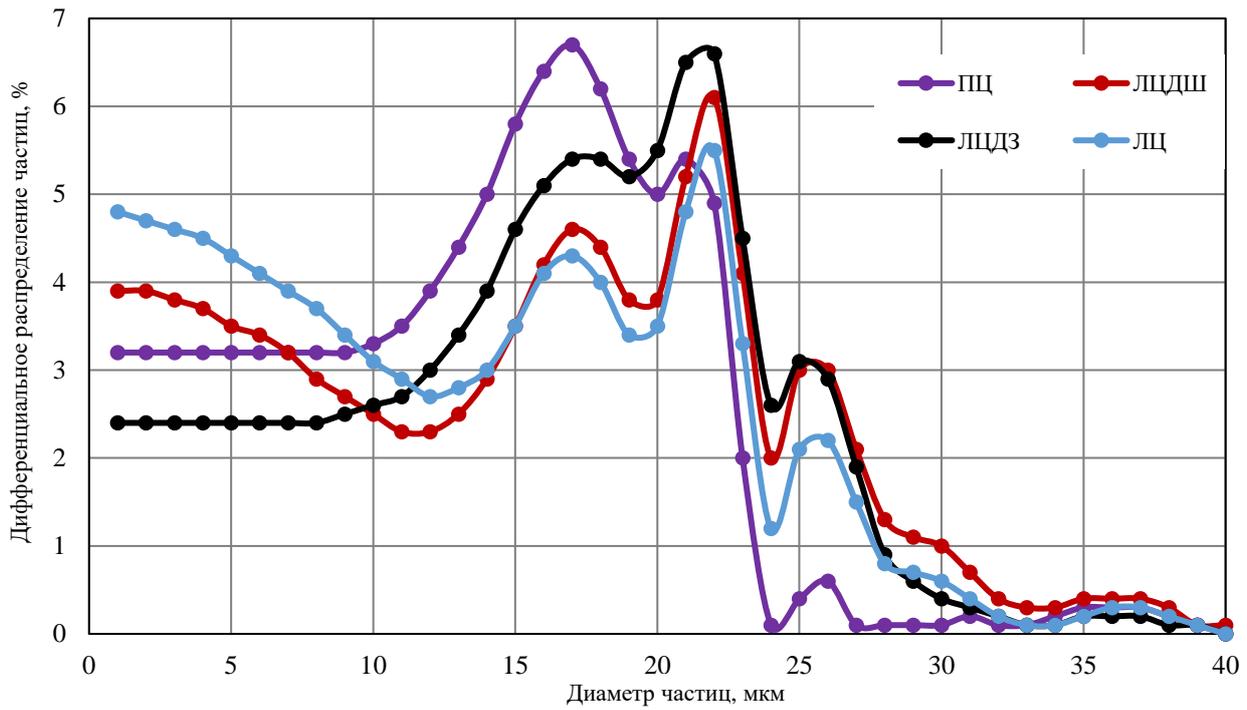


Рис. 3. Гранулометрический состав различных типов цемента

Результаты, представленные на рис. 4, свидетельствуют о том, что при хранении цемента со свободным доступом окружающей среды удельная поверхность вследствие процесса «слеживания» значительно снижается для цемента первого типа (ПЦ, ЛЦ) в среднем на 25 %.

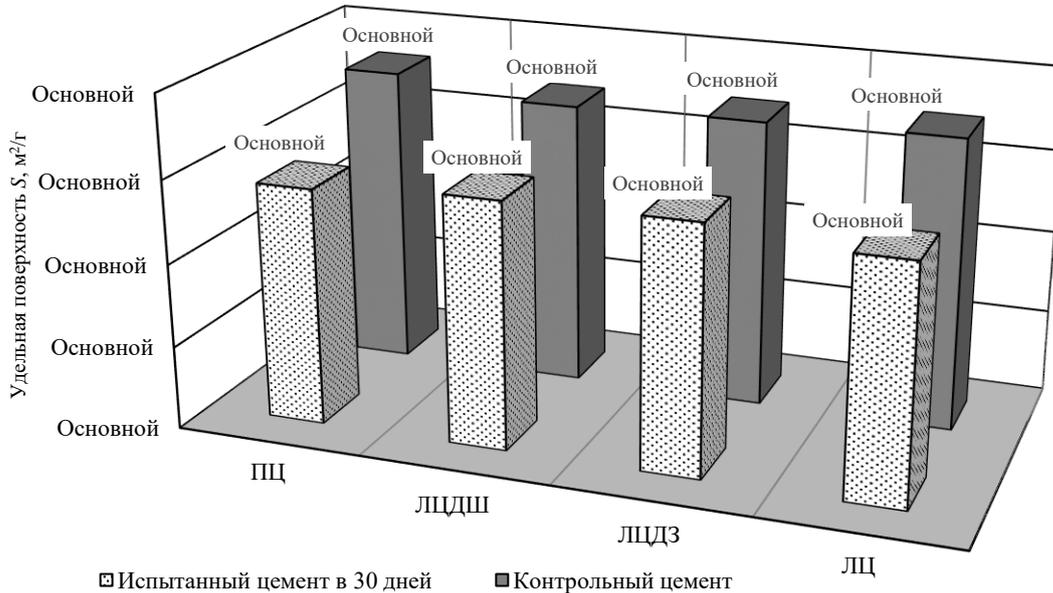


Рис. 4. Результаты определения удельной поверхности цемента

В то же время для многокомпонентных зеленых цемента этот процесс происходит менее интенсивно и составляет 15 %. Вероятно, этот процесс объясняется с позиций перераспределения баланса аутогезионного взаимодействия частиц в результате ослабления капиллярных сил притяжения, а также вследствие экранирования активных центров поверхности зерен многокомпонентных зеленых цемента при их взаимодействии с окружающей средой.

Результаты измерения показателей угла естественного откоса и насыпной плотности для всех типов цемента, хранившихся в течение 30 дней, по сравнению с контрольными образцами представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Результаты измерений величины аутогезии

Вид цемента	Угол естественного откоса α , град			
	Метод			
	«шпателя»		«воронки»	
	Контрольный цемент	Испытываемый цемент в течение 30 дней	Контрольный цемент	Испытываемый цемент в течение 30 дней
ПЦ	48,2	40,2	50,4	40,7
ЛЦДШ	47,5	44,0	51,4	45,9
ЛЦДЗ	46,7	41,8	52,3	45,2
ЛЦ	48,6	41,7	49,9	41,6

Таблица 2

Результаты определения насыпной плотности

Вид цемента	Насыпная плотность, ρ_n , кг/м ³	
	Контрольный цемент	Испытываемый цемент в 30 дней
ПЦ	1340	1365
ЛЦДШ	1350	1360
ЛЦДЗ	1345	1255
ЛЦ	1355	1375

Установлено, что максимальное падение значения угла естественного откоса наблюдается для первого типа цементов (ПЦ, ЛЦ) и составляет от 7 до 9,5°. В то же время для многокомпонентных зеленых цементов (ЛЦДШ, ЛЦДЗ) эта величина значительно ниже и составляет от 3,5 до 7,1°. Относительно небольшие изменения угла естественного откоса объясняются еще и тем, что согласно классификации сыпучих материалов по аутогезии цемент относится к группе сильно слипающихся порошков с величиной разрывной прочности > 600 Па. Уменьшение угла естественного откоса и более высокие значения насыпной плотности связаны с адсорбцией молекул воды из окружающей среды, что приводит к изменению баланса сил, возникающих при взаимном контакте частиц.

Таким образом, отмеченная выше закономерность является следствием того, что поверхность частиц цемента гидратирует, образуются гидратные соединения и CaCO_3 , обуславливающие снижение предела прочности при сжатии цементного камня. Сравнение предела прочности при сжатии цементного камня представлено на рис. 5.

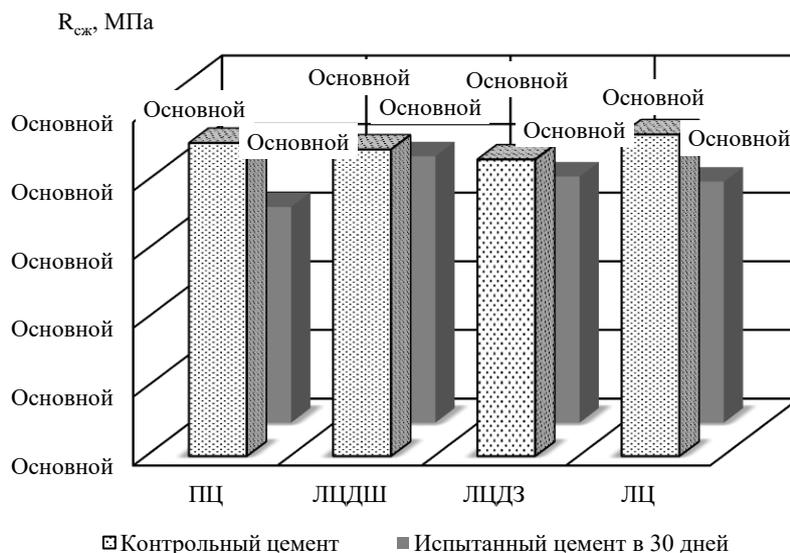


Рис. 5. Результаты определения удельной поверхности цемента

Результатом проявления процесса «слеживания», протекающего при взаимодействии поверхности дисперсных частиц с окружающей средой, стало снижение активности для всех образцов цемента, испытанных в возрасте 28 суток твердения. Установлено, что данный процесс отражается на снижении предела прочности при сжатии

по сравнению с контрольными образцами в среднем на 25–30 % для цементов первого типа, и в меньшей степени на 15–20 % это наблюдается для многокомпонентных зеленых цементов, хранившихся на открытом воздухе в течение 30 дней.

Обсуждение и заключение. Разработка составов многокомпонентных зеленых цементов с добавкой интенсификатора помола, позволяет снизить интенсивность падения активности цемента даже при его хранении в условиях свободного обмена с окружающей средой. Полученные результаты механических испытаний подтверждают выдвинутые предположения, что процесс «слеживания» происходит более интенсивно для цементов первого типа, что в конечном итоге значительно отражается на снижении его активности и приводит к потере его класса по сравнению с многокомпонентными зелеными цементами.

Список литературы / References

1. He Z, Zhu X, Wang J, Mu Mulan, Wang Yuli. Comparison of CO₂ Emissions from OPC and Recycled Cement Production. *Construction and Building Materials*. 2019;211:965–973. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.289>
2. Liu X, Hou P, Chen H. Effects of Nanosilica on the Hydration and Hardening Properties of Slag Cement. *Construction and Building Materials*. 2021;282:122705. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122705>
3. Bougara A, Lynsdale C, Milestone NB. The Influence of Slag Properties, Mix Parameters and Curing Temperature on Hydration and Strength Development of Slag/Cement Blends. *Construction and Building Materials*. 2018;187:339–347. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.166>
4. Zhenhai Xu, Zhaoheng Guo, Yasong Zhao, Shujun Li, Xu Luo, Gaofeng Chen et al. Hydration of Blended Cement with High-Volume Slag and Nano-Silica. *Journal of Building Engineering*. 2023;64:105657. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105657>
5. Juenger MCG, Snellings R, Bernal SA. Supplementary Cementitious Materials: New Sources, Characterization, and Performance Insights. *Cement and Concrete Research*. 2019;122:257–273. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>
6. Kurtis KE. Innovations in Cement-Based Materials: Addressing Sustainability in Structural and Infrastructure Applications. *MRS Bulletin*. 2015;40:1102–1109. <https://doi.org/10.1557/mrs.2015.279>
7. Thomas M. *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete*. 2007. URL: https://www.researchgate.net/publication/236509473_Optimizing_the_use_of_fly_ash_in_concrete (accessed: 10.09.2024).
8. Wang D, Zhou X, Meng Y, Chen Z. Durability of Concrete Containing Fly Ash and Silica Fume Against Combined Freezing-Thawing and Sulfate Attack. *Construction and Building Materials*. 2017;147:398–406. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.04.172>
9. Jin Q, Li VC. Development of Lightweight Engineered Cementitious Composite for Durability Enhancement of Tall Concrete Wind Towers. *Cement and Concrete Composites*. 2019;96:87–94. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.11.016>
10. Jin Q, Li VC. Structural and Durability Assessment of ECC/Concrete Dual-layer System for Tall Wind Turbine Towers. *Engineering Structures*. 2019;196:109338. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109338>
11. Shen X, Feng P, Zhang Qi, Lu J, Liu X, Ma Y, et al. Toward the Formation Mechanism of Synthetic Calcium Silicate Hydrate (CSH)-pH and Kinetic Considerations. *Cement and Concrete Research*. 2023;172:107248. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107248>
12. Yan Y, Bernard E, Miron GD, Rentsch D, Ma B, Scrivener K, et al. Kinetics of Al Uptake in Synthetic Calcium Silicate Hydrate (C-S-H). *Cement and Concrete Research*. 2023;172:107250. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107250>

Об авторах:

Александр Каюмович Халюшев, доцент кафедры технологического инжиниринга и экспертизы в строительной индустрии Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9000-0001), khaljushev@mail.ru

Елена Андреевна Колесниченко, студентка дорожно-транспортного факультета, кафедры экономики природопользования и кадастра Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9000-0001), vaisalena57@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

А.К. Халюшев: научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, анализ результатов исследований формирование выводов;

Е.А. Колесниченко: оформление рисунков, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

Alexander K. Khalyushev, Cand.Sci. (Engineering), 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](#), khaljushev@mail.ru

Elena A. Kolesnichenko, Student of the Road Transport Faculty, the Environmental Economics and Cadastre Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), vaisalena57@gmail.com

Claimed Contributorship:

AK Khalyushev: scientific supervision, formulating the main concept, aim and objectives of the research, making calculations, preparing the text, analysing the research results, formulating the conclusions.

EA Kolesnichenko: design of drawings, refining the text, correcting the conclusions.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию/ Received 22.11.2024

Поступила после рецензирования/ Revised 05.12.2024

Принята к публикации/ Accepted 10.12.2024

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS



УДК 667.6

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-82-86>

Сварочные электроды на основе графитовых материалов

А.С. Турсунов¹ , У.М. Турдалиев² 

¹ Ферганский политехнический институт, г. Фергана, Республика Узбекистан

² Андижанский машиностроительный институт, г. Андижан, Республика Узбекистан

✉ info@andmi.edu.uz



EDN: SJUICI

Аннотация.

Введение. В условиях глобальной конкуренции высококачественная продукция предприятий развитых стран занимает лидирующие позиции на мировых рынках, что обусловлено растущим спросом на графитовую продукцию. Графит, благодаря своим уникальным свойствам, находит применение в различных отраслях, включая производство высокотемпературных печей, электродов для сварки и резки, а также в аккумуляторной технологии. Цель исследования — исследование и анализ свойств графитовых электродов, их применения в сварочных процессах и оценке конкурентных преимуществ по сравнению с другими типами электродов. Работа направлена на выявление особенностей использования графитовых электродов в различных отраслях, таких как сталеплавильное производство, металлургия и химическая промышленность, а также на изучение их физико-химических характеристик, которые делают их эффективными для применения при высоких температурах и в условиях коррозии.

Материалы и методы. Исследование проводилось на основе графитового Тазказганского рудника, расположенного в Центральной Азии. Анализировался химический состав и содержание углерода в графитовой руде, которая была разделена на группы по качеству. Установлено, что руда содержит до 51,8 % графита и другие компоненты, влияющие на её свойства.

Результаты. Полученные данные показывают, что графит из Тазказганского месторождения можно классифицировать по содержанию углерода на низкоуглеродистый, средний и высокий, что позволяет рекомендовать его для производства сварочных электродов. Химический состав руды указывает на её потенциал для использования в различных промышленных процессах.

Обсуждение и заключение. Графитовые материалы, добываемые на Тазказганском руднике, обладают значительными качественными характеристиками, что делает их конкурентоспособными на рынке. Дальнейшие исследования должны сосредоточиться на оптимизации процессов переработки и применения графита в новых технологиях, чтобы максимально использовать его уникальные свойства.

Ключевые слова: электрод, графит, сварочные электроды, печные электроды, гальванические электроды, электрический ток, металлические проволоки

Для цитирования. Турсунов А.С., Турдалиев У.М. Сварочные электроды на основе графитовых материалов. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2024;3(4):82–86. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-82-86>

Welding Electrodes on the Basis of the Graphite Materials

Azamjon S. Tursunov¹  , Umid M. Turdialiev² 

¹ Fergana Polytechnic Institute, Fergana, Republic of Uzbekistan

² Andijan Machine Building Institute, Andijan, Republic of Uzbekistan

 info@andmiedu.uz

Abstract

Introduction. In the context of global competition, the high-quality products of the enterprises from the developed countries occupy the leading positions in the world markets, which causes the growth of demand for graphite products. Graphite, due to its unique properties, is used in various industries, including the production of high-temperature furnaces, electrodes for welding and cutting, as well as in battery production technology. The aim of the study is to investigate and analyse the properties of graphite electrodes, their application in welding processes and to evaluate their competitive advantages compared to other types of electrodes. The work is aimed at identifying the features of using graphite electrodes in various industries, such as steelmaking, metallurgy and chemical industry, as well as studying their physical and chemical properties, which make them efficient for the use at high temperatures and in corrosion conditions.

Materials and Methods. The research was carried out with reference to the Tazkazgan graphite mine located in the Central Asia. The chemical composition and carbon content of the graphite ore were analysed, which made it possible to classify it into groups by quality. It was found that the ore contains up to 51.8% of graphite and other components that affect its properties.

Results. The obtained data show that graphite from the Tazkazgan deposit can be classified by carbon content into low-carbon, medium-carbon and high-carbon, which allows it to be recommended for the production of welding electrodes. The chemical composition of the ore indicates its capacity to be used in various industrial applications.

Discussion and Conclusion. Graphite materials mined at the Tazkazgan mine are attributed with the significant quality characteristics, which make them competitive in the market. Further research should focus on optimising processing and application of graphite in new technologies to make the most of its unique properties.

Keywords: electrode, graphite, welding electrodes, furnace electrodes, plating electrodes, electric current, metal wires.

For Citation. Tursunov AS, Turdialiev UM. Welding Electrodes on the Basis of the Graphite Materials. *Modern Trends in Construction, Urban Development and Territorial Planning*. 2024;3(4):82–86. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-82-86>

Введение. Высококачественная продукция предприятий развитых стран успешно занимает лидирующие позиции на мировых рынках и в торговых сетях благодаря своей конкурентоспособности и ориентации на экспорт.

Одновременно наблюдается рост спроса на графитовую продукцию. Этот материал приобретает все большее значение благодаря своим уникальным свойствам, которые делают его незаменимым в производстве высокотемпературных печей, электродов для резки и соединения металлов, щеток для электродвигателей, а также в процессах электролиза и создании анодов для щелочных литий-ионных аккумуляторов.

Среди углеродистых материалов графит находит широкое применение в различных отраслях. Его используют для изготовления нагревательных элементов электропечей, электродов и электродуговой сварки, тиглей в металлургии, форм для керамики и металлических сплавов, протекторов и теплоизоляторов от высоких температур. Графит незаменим в ракетных двигателях, химических реакторах, электрических контактах, аккумуляторных электродах, а также в производстве антифрикционных материалов для воздухоочистительного оборудования и изделий из графитового волокна. В нашей стране уделяется особое внимание обогащению и переработке графитовых руд Тазказганского месторождения, обладающего значительными запасами [1–3].

Графит представляет собой уникальный материал благодаря своей кристаллической структуре, где связь между слоями обеспечивается силами Ван-дер-Ваальса. Низкое межслоевое усилие позволяет легко разделять слои, что обуславливает его превосходные антифрикционные свойства. В кристаллической структуре графита высокая электропроводность проявляется в направлении кристаллографических плоскостей, параллельных гексагональным слоям.

Ключевые свойства графита включают: высокую химическую стойкость при высоких температурах в инертной среде, высокую теплопроводность, низкий коэффициент теплового расширения, стабильность при температурных изменениях, адсорбционные свойства в отношении различных газов, а также легкость механической обработки [4].

Материалы и методы. Графитовый рудник Тазказга, крупнейший в Центральной Азии, расположен в западной части Кулюктовских гор на территории Навоийской области и Центрального Кызылкума. Он был открыт в 1928–1929 годах и занимает ключевое место в развитии горнодобывающей промышленности региона благодаря своим значительным запасам и стратегическому значению. Установлено, что графитовая руда содержит до 4 % влаги, 51,8 % графита, 19 % органического вещества, 6 % летучих веществ, 4,4 % железа и 38 % остатка после горения.

В таблицах 1 и 2 приведены специфические характеристики и химический состав Тазказганского графита.

Таблица 1

Разделение графитовых руд Тазказганского рудника на группы по содержанию углерода

№	Разновидность графита	Количество углерода в составе, %	Доля от общего количества графитовой руды в руднике, %	Группа
1	Низкоуглеродистый	5–10	30	не богат углеродом
2	Ниже	10–20	40	низкое качество
3	Средний	20–30	20	среднее качество
4	Высокий	30 <	10	высокое качество

Из таблицы 1 следует, что в зависимости от содержания углерода отмечается группа графита по качеству.

Таблица 2

Химический состав графитовой руды, полученной на руднике Тазказган

Химический элемент	C	Co	Cu	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃
Химический состав, %	12–51,8	0,009	0,08	33,6–35,2	5,3–6,1	3,8–8,8	9,15–12,64

Из таблицы 2 видно, что содержание углерода в графите Таказганского месторождения составляет 12–51,8 % [5, 6]. Такой тип графита можно рекомендовать для получения сварочных электродов.

Результаты исследования. Электрод представляет собой сердечник из токопроводящего материала, предназначенный для передачи электрического тока к зоне сварки, плавки или резки.

Электроды в основном делятся на следующие типы:

1. Сварочные электроды.
2. Электроды для печей.
3. Гальванические электроды и электроды, используемые в различных областях.

Сварка — это технологический процесс, обеспечивающий создание неразрывного соединения путем пластической деформации металлов, сплавов или других материалов, либо межатомного соединения с использованием нагрева между соединяемыми деталями.

Сварочные электроды представляют собой металлические проволоки, используемые для проведения электрического тока и формирования дуги между заготовками. В зависимости от их особенностей сварочные электроды можно разделить на два основных типа:

1. плавящиеся электроды — плавятся при сварке и становятся частью сварного шва;
2. неплавящиеся электроды — не плавятся при процессе сварки и требуют использования отдельной присадки для соединения материалов.

При сварке используются как неразжижаемые, так и жидкие материалы. Неразжижаемые материалы, такие как графит, уголь и вольфрам, а также жидкие материалы, включая низкоуглеродистую сталь, чугун, цветные металлы и их сплавы, обычно изготавливают в виде катанки [7].

В зависимости от метода дуговой сварки применяют различные виды электродов, включая стальные, вольфрамовые, чугунные, цветные металлы и сплавы, угольные и графитированные электроды.

Стальные электроды являются наиболее широко используемыми, так как сварные конструкции часто изготавливают именно из стали.

Графитированные электроды обладают рядом важных преимуществ по сравнению с угольными:

- химически чистые, относительно мягкие, имеют темный цвет и блестят, как цветные металлы;
- при использовании на бумаге остаются черные следы, что свидетельствует об их высокой проводимости;
- лучше проводят электрический ток и меньше горят (окисляются) при высоких температурах на открытом воздухе, что позволяет выполнять сварку с высокой плотностью тока [8].

Графитовые электроды — это неплавкие электроды, изготовленные путем дополнительной высокотемпературной обработки угольных электродов, применяемых для дуговой сварки и резки.

Нерастворимые графитовые электроды, специально предназначенные для дуговой резки и сварки, по государственным стандартам не изготавливаются, поэтому в ряде случаев их изготавливают методом резки и точения графитовых электродов.

Графитовые электроды применяются в сталеплавильном производстве, металлургических заводах, судостроении и относятся к неплавкой группе электродов. Их часто используют для предсварочной обработки металла, дуговой резки, кромки металла. Некоторые модели используются в конструкциях из легированных, низколегированных и углеродистых сталей.

Обсуждение и заключение. Электроды на основе графита, в отличие от аналогов из других материалов, хорошо проводят электричество и не плавятся. Они бывают различной длины и формы, со стандартным графитовым и медным покрытием.

Основные преимущества графитовых электродов:

- возможность использования при высокой плотности тока;
- высокая чистота химического состава;
- лучшие результаты сварки по сравнению с угольными электродами;
- хорошая электропроводность и снижение потерь при эксплуатации;
- устойчивость к окислению даже при высоких температурах;
- устойчивость к химическим реагентам.

Физико-химический состав: графитовый электрод представляет собой цилиндр с ниппельными гнездами по краям. Он состоит из двух частей, между которыми находится прокладка с изоляционными свойствами. Прокладка содержит частицы оксида железа, меди, алюминия и магния.

Температура плавления графита составляет около 3500 °С, что делает его идеальным материалом для изготовления негорючих электродов¹².

Графитовые электроды также используются в процессе производства алюминия, поскольку они выдерживают высокие температуры и химические реакции, обладают хорошей проводимостью и тепловым балансом. Графитовые электроды широко используются в химической промышленности, т. к. устойчивы к коррозии. Их также можно использовать в качестве электрода-катализатора в органическом химическом синтезе.

Список литературы / References

1. Турсунов А.С. *Технология обогащения и переработки графитовой руды тасказганского месторождения на смазочные и силикатные материалы*. Диссертация доктора философии. Наманган; 2022. 103 с.

Tursunov AS. *Technology of Enrichment and Processing of Graphite Ore of the Taskazgan Deposit into Lubricants and Silicate Materials*. PhD Dissertation. Namangan; 2022. 103 p. (In Russ.)

2. Турсунов А., Турдалиев У. Тасказган кони графит рудасини флотацион усулда бойитиш жараёнини тадқиқ қилиш. *Talqin va tadqiqotlar*. 2023;1:32. URL: <https://talqinvatadqiqotlar.uz/index.php/tvt/article/view/1334> (дата обращения 13.09.2024).

Tursunov A, Turdialiev U. Taskazgan Horses Graphite Rudasini Flotation Usulda Boyitish Zharayonini Tadqiq Kilish. *Talqin va Tadqiqotlar*. 2023;1:32. URL: <https://talqinvatadqiqotlar.uz/index.php/tvt/article/view/1334> (accessed: 13.09.2024).

3. Abralov M.M. *Payvandlash Materiallari. Darslik*. Toshkent: Fan va Texnologiya; 2017. 244 s. URL: <http://ilmiy.bmti.uz/blib/files/71/Payvandlash%20materiallari.pdf> (дата обращения: 13.09.2024).

4. Ergashev DU, Abduqodirov G, Tursunboyev N. *Materialshunoslik va Konstruktion Materiallar/o'quv Qo'llanma*. Toshkent: INNOVATSIYA-ZIYO; 2019, 204 s. URL: https://namdu.uz/media/Books/pdf/2024/06/07/NamDU-ARM-4765-Materialshunoslik_va_konstruktion_materiallar.pdf (дата обращения: 13.09.2024).

5. Турсунов А.С. Турдалиев У.М., Адылов Д.К., Ахмедов Р.К., Черниченко Н.И., Мирзаев Б.А. Исследования процесса флотационного обогащения графитовой руды месторождения Тасказган Республики Узбекистан. *Universum: технические науки*. 2019;10-2(67):42–47. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/7928> (дата обращения 13.09.2024).

¹ ГОСТ 9467-75. Межгосударственный стандарт. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. Москва, 1975 г.

² ГОСТ Р 57613-2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Электроды графитированные и нипели к ним. Москва, 2017 г.

Tursunov AS, Turdialiev UM, Adylov DK, Akhmedov RK, Chernichenko NI, Mirzaev BA. Research of the Flotation Treatment Process of Graphite Ore of the Taskazgan Deposit of the Republic of Uzbekistan. *Universum: Technical Sciences*. 2019;10-2(67):42–47. (In Russ.) URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/7928> (accessed: 13.09.2024).

6. Tursunov A, Turdaliyev U. The Use of Graphite ore Concentrate from the Taskazgan Deposit as a Lubricant. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Priority Directions of Complex Socio-Economic Development of the Region" (PDSSED 2023). E3S Web Conference. Volume 449*. EDP Sciences; 2023. 06012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344906012>

7. Abralov MA, Duniyashin NS, Ermatov ZD. *Payvandlash Ishlab Chiqarish Texnologiyasi va Jihozlari. O'quv Qo'llanma*. Toshkent: Fan va Texnologiya; 2017. 160 s. URL: <http://ilmiy.bmti.uz/blib/files/69/Payvandlash%20ishlab%20chiqarish%20texnologiyasi%20va%20jihozlari.pdf> (дата обращения: 13.09.2024).

8. Глизманенко Д.Л. *Сварка и резка металлов*. Москва; 1969. 448 с.

Glizmanenko DL. *Welding and Cutting of Metals*. Moscow; 1969. 448 p.

Об авторах:

Азамжон Салимжон угли Турсунов, доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент кафедры химии и химической технологии Ферганского политехнического института (Республика Узбекистан, г. Фергана, ул. Фергана, 86), [ORCID](#), turcunov-farpi@mail.ru

Умид Мухтаралиевич Турдиалиев, профессор кафедры химии и химической технологии Андижанского машиностроительного института, доктор технических наук, старший научный сотрудник (Республика Узбекистан, г. Андижан, пр. Бабура, 56), [ORCID](#), eco-planning@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А.С. Турсунов: проведение расчетов, подготовка текста, анализ результатов исследований формирование выводов;

У.М. Турдиалиев: научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

Tursunov Azamjon Salimjon ugli, Doctor of Philosophy in Technical Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Chemistry and Chemical Technology of the Fergana Polytechnic Institute (Republic of Uzbekistan, Fergana, Fergana Street, 86), [ORCID](#), turcunov-farpi@mail.ru

Turdialiev Umid Mukhtaraliyevich, Professor of the Department of Chemistry and Chemical Technology of the Andijan Machine-Building Institute, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher (Republic of Uzbekistan, Andijan, Babur Avenue, 56), [ORCID](#), eco-planning@mail.ru

Claimed Contributorship:

A.S. Tursunov: calculations, text preparation, analysis of research results, formation of conclusions;

U.M. Turdialiev: scientific supervision, formation of the main concept, goals and objectives of the study, revision of the text, correction of conclusions.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию/ Received 20.11.2024

Поступила после рецензирования/ Revised 28.11.2024

Принята к публикации/ Accepted 10.12.2024

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION



УДК 691.3

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-87-95>

Формирование организационно-технологических решений по выполнению строительства быстросборных зданий



Н.В. Розанцева  , А.С. Дмитриев  

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

EDN: OWQKWJ

 nrozanceva@lan.spbgasu.ru

Аннотация

Введение. Финансовая составляющая результативности проекта во многом влияет на внедрение новых технологий и в том числе является основополагающим фактором оценки эффективности проекта. В большинстве своем при разработке проекта производства работ проектировщики не всегда учитывают особенности конкретных регионов и, в частности при строительстве жилищно-бытовых объектов газодобывающей отрасли, не используют комплексный подход, в результате чего конечные расходы не стыкуются с начально запланированными расходами.

Материалы и методы. В статье рассмотрены основные составляющие, оказывающие влияние на стоимость проекта, влияние логистики в решении сокращения стоимости и наиболее важные решаемые логистические задачи. Рассмотрены типичные риски и ошибки планирования при разработке проекта производства работ.

Результаты исследования. Проведено сравнение основных затрат, необходимых для успешного развития проекта, логистических задач проекта, стандартного и предлагаемого календарных графиков производства работ на основе базовых принятых решений. Выделены основные показатели, максимально влияющие на конечную стоимость строительства объекта. Сформулированы основные этапы расчета, позволяющие оптимизировать учет целевых затрат.

Обсуждение и заключение. Было установлено, что в качестве основного показателя эффективного ведения проекта можно считать чистый доход, то есть получение положительного результата от финансово-строительной деятельности компании. Были сведены все поступления средств и требуемые издержки: расходы и выплаты, в том числе и на реализацию строительства объекта, а также налоги, связанные со строительством объекта на определенный момент времени. Приняв за основу полный жизненный цикл объекта строительства, выдвинуто предположение, что вопросы транспортирования, монтажа, последующей эксплуатации и в конечном счете ликвидации панельных зданий по завершению строительства делают их малоэффективными по сравнению с модульными быстросборными технологиями. Предложены наиболее простые пути решения.

Ключевые слова: эффективность проекта, денежные поступления, планирование, логистика, риски проекта, аквапанель

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

Для цитирования. Розанцева Н.В., Дмитриев А.С. Формирование организационно-технологических решений по выполнению строительства быстросборных зданий. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2024;3(4):87–95. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-87-95>

Organisational and Technological Solutions for Construction of the Quick-Assembly Buildings

Nadezhda V. Rozantseva , Alexander S. Dimitriev 

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

 nrozanceva@lan.spbgasu.ru

Abstract

Introduction. A financial component of the project result affects considerably the implementation of the new technologies and is, among other things, a fundamental factor in assessing project's efficiency. In most cases, when developing a project for the production of works, the project designers do not take into account the specific regional features, for example, when building the housing and welfare facilities for the needs of gas industry, they do not use an integrated approach, therefore, the final costs do not match the initially planned ones.

Materials and Methods. The article studies the main factors affecting the cost of a project, the influence of logistics on the project cost reduction and the most significant logistic problems to be solved. The typical risks and planning mistakes in the development of a project for the production of works have been investigated.

Results. A comparative analysis of the main costs required for the successful development of a project, the project logistical tasks, the standard and proposed calendar plan of the production of works based on the common decision-making was made. The main indicators having the foremost impact on the final cost of construction of a facility were identified. The main steps of calculation fostering the optimisation of target cost accounting were formulated.

Discussion and Conclusion. Net income was determined to be the main indicator of project management efficiency, i.e. obtaining positive result of company's financial and construction activity. The balance of all incoming funds and required expenses was compiled: expenses and payments, including the ones allocated to the construction of a facility, as well as taxes per certain moment of facility construction. In the context of full life cycle of an object of construction, an assumption was made about inefficiency of panel buildings compared to the quick-assembly modular buildings due to the issues of transportation, erecting, subsequent operation and, eventually, after construction dismantling of the former. The most simplified solutions were proposed.

Keywords: project efficiency, incoming funds, planning, logistics, project risks, fiber reinforced cement board

Acknowledgements. The authors are grateful to the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and comments provided, which contributed to enhancing its quality.

For citation. Rozantseva NV, Dimitriev AS. Organisational and Technological Solutions for Construction of the Quick-Assembly Buildings. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(3):87–95. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-87-95>

Введение. Еще в советский период появилось понятие городов плановой постройки. В большинстве своем это были проекты, связанные с развитием промышленности и строительством крупных промышленных комплексов, как, например, образование из села Пермское города Комсомольск-на-Амуре [1], так и изначально процессы временного характера, например, на период переброски заводов в период Великой Отечественной войны вглубь России. Каждое строительство начиналось под конкретные задачи определенного проекта. Но если строители коммунизма считали свои бытовые условия не столь важным элементом и были готовы терпеть трудности и неудобства ради светлой и высокой цели города будущего, то в наше время комфортность бытовых условий строителей и рабочих становится немаловажным фактором даже на период организации возведения промышленных комплексов. Развитие и успешное внедрение любого проекта неразрывно связано с финансовой деятельностью. Вся финансовая деятельность, связанная с проектом, может быть условно разделена на операции, выполняемые на основании собственных средств организации, в том числе и поступающих от дохода, связанного с проектом, и средствами от привлекаемых инвестиций, в том числе средства акционеров. Зависимости денежных инвестиционных поступлений и платежей от реализации проектных решений за определенный расчетный период называют денежными потоками проекта [2].

В большинстве случаев при разработке проекта производства работ проектировщики не всегда учитывают особенности конкретных регионов и, в частности строительство жилищно-бытовых объектов газодобывающей отрасли, не рассматривают как комплексное строительство. Поступления рассчитывают по объему поступлений от реализации проекта за вычетом текущих затрат без учета взаиморасчетов. Необходимо учесть, что на успешную реализацию проекта оказывают непосредственное влияние и такие сторонние, казалось бы, не связанные с

проектом, но приобретающие значительный вес, внешние социально-экономические факторы: закредитованность подрядной организации или организации заказчика; необходимость выплаты процентов по кредитам; уменьшение или увеличение доходов населения; стоимостная и социальная значимость проекта в понимании как отдельного человека, так и народного хозяйства данного региона; важность реализации проекта в понимании не только заказчика и подрядной организации, но и акционеров и структур более высокого уровня (административно-территориального, районного, регионального, государственного). В условиях северного строительства на реализацию проекта оказывает немаловажное влияние разработка логистических решений, наличие или отсутствие местных строительных материалов, возможные их запасы [3].

Цель проекта: выделить и сформулировать основные затратные показатели, влияющие на этапы расчета и позволяющие в дальнейшем оптимизировать учет целевых затрат.

В реализации северных проектов очень важно, чтобы на каждом этапе существовала возможность маневрирования, следовательно, основная задача — разработка примерной блок-схемы расчета, позволяющей поэтапно производить расчет, на каждом шаге проекта сальдо поступлений и затрат сделать положительным и реализовать так называемую подушку из дополнительных фондов и запаса материалов, реализованную не за счет вложения дополнительных средств, а за счет грамотного распоряжения и учета имеющихся финансовых и материальных составляющих проекта. Объектом исследования стало строительство быстроборных зданий и сооружений с применением отечественных конструкций полной заводской готовности типа аквапанель.

Материалы и методы. Основные показатели эффективности внедрения проекта основаны на балансе, полученном от учета стоимости вложенных финансовых ресурсов и выбывающих ресурсов за период реализации и прихода пополнений от реализации с учетом коэффициента дисконтирования и потери финансовых поступлений с учетом инфляции за время реализации [2].

Северные регионы имеют свою характерную особенность, связанную с климатическими и географическими условиями. В условиях короткого северного лета особую значимость приобретает правильность принимаемых логистических решений в сфере материально-технического обеспечения проекта. В соответствии с этим к решению по обеспечению проекта определенными ресурсами с целью получения необходимого количества продукции за определенное время предъявляются в совокупности особые требования: рациональность организации и дальность перевозок, распределение ресурсов, взаимосвязь снабжения и потребности, взаимоинтеграция процессов строительства и всех транспортных, погрузочно-разгрузочных процессов.

Во всем разнообразии строительной отрасли при возведении или реконструкции различных объектов от промышленных зданий и сооружений, в том числе и транспортного хозяйства или объектов магистральных трубопроводов, до жилых и административно-хозяйственных зданий можно условно выделить несколько наиболее характерных процессов: организационный, исследовательски-изыскательный, проектный, строительно-монтажный и многие другие, связанные с созданием или развитием объекта.

Разберем на примере наиболее важные составляющие, необходимые для осуществления строительства любого проекта — это в первую очередь прямые затраты, необходимые непосредственно для осуществления строительства, в том числе необходимость приобретения земельного участка, на котором будет возводиться объект, и косвенные затраты, необходимые для успешной реализации, не относящиеся непосредственно к самому объекту, но влияющие на его конечную успешную реализацию и стоимость. Целесообразность применения быстроборных зданий и сооружений при строительстве в северных регионах выводится сравнением затрат на строительство по стандартной технологии и быстроборных объектов. Необходимо подчеркнуть, что многие затраты будут общими и в том, и в другом случае реализации проектов, и целесообразно произвести расчет два раза для каждого из проектов.

Для упорядочения понимания о необходимых денежных потоках в процессе инвестиционно-строительной деятельности были сформированы условные показатели, представленные в таблице 1.

Каждый показатель, включенный в эту таблицу, характеризуется как возможной прибылью, так и требуемыми вложениями: инвестиционно-финансовыми и непредвиденными, требующими оперативных решений.

На основании вышесказанного необходимо учесть, какие составляющие оказывают наибольшее влияние на стоимость и продолжительность выполнения работ в условиях северного строительства. Логично, что уменьшить стоимость земельного участка мы не можем, снижение нематериальных затрат в наше время чревато отсутствием узнаваемости компании, что скорее снизит стоимость конечного продукта. Остается снижение стоимостных затрат на конструкции, машины и оборудование, которое в том числе может быть достигнуто не только применением новых материалов и отечественного оборудования, но и грамотным планированием работ, сокращением числа перевозок, в том числе и за счет применения быстроборных зданий максимальной заводской готовности.

Таблица 1

Требуемые инвестиции, составляющие основные затраты на проект¹

№	Показатель	Значение показателя по шагам расчета					Непредвиденные затраты
		Шаг (старт проекта) 0	шаг 1	шаг 2	шаг <i>n</i>		
1	Земельный участок	З					
		П					
2	Конструкции, материалы, неучтенные материалы	З					
		П					
3	Машины и оборудование	З					
		П					
4	Затраты на энерго- и водоснабжение, прочие коммунальные платежи	З					
		П					
5	Административно-хозяйственные расходы, затраты на менеджмент, повышение квалификации сотрудников	З					
		П					
6	Повышающие конечную стоимость мероприятия (косвенные затраты) (бренд, реклама, переписки, разработка собственных программ, патенты)	З					
		П					
7	Общая потребность вложений в основной капитал: (1) + (2) + (3) + (4) + (5) + (6)	З					
		П					
8	Требуемый прирост оборотного капитала, для развития компании и успешной реализации проекта	З					
		П					
9	Общая потребность в инвестициях (7) + (8)	З					
		П					

Примечание: З — требуемые затраты денежных средств, обозначаются знаком «минус»; П — прибыль, обозначается знаком «плюс».

Разница в стоимости на сайте и по индивидуальным коммерческим предложениям от заводов-производителей и непосредственных поставщиков по долгосрочным договорам подрядной организации будет, но необходимо учесть и тот факт, что унификация типоразмеров и дальность транспортировки тоже окажут непосредственное влияние на конечную стоимость.

Основные задачи логистики, позволяющие снизить конечную стоимость объекта: четкая диспетчеризация и минимализация всех перевозок, определение минимально необходимой и достаточной потребности в ресурсах, в том числе снижающей и уровень потерь, унификация конструктивных элементов и их упаковки [4] (активно применялась в Советском Союзе еще в период начала панельного домостроения — достаточно неожиданное решение, которое ранее учитывалось скорее в авиации и космической области), снижение веса транспортируемой продукции. Применение отечественных разработок типа аквапанелей позволит выполнить большой объем транспортировки теми же средствами.

Разумеется, не бывает абсолютно одинаковых решений при строительстве, как и не бывает одинаковых затрат на строительство, но каждый процесс, несомненно, требует управленческих решений, в том числе и в вопросах не только транспортировки и материально-технического обеспечения, но и производственных процессах, сборе информации, складировании, комплектации и т.д. Отсюда особые требования к высокой степени комплектации и готовности продукции к монтажу и необходимый учет возможных дополнительных логистических издержек (непогода, распутица, высокие ветровые нагрузки), которые характерны для северного региона. Выполнение таких требований позволяет в конечном счете значительно сократить расходы в случае применения быстросборных зданий и сооружений.

То есть каждое решение требует получения балансового эффекта от его принятия для конечного результата, получения прибыли при подведении итогов строительной деятельности. Требуется произвести дисконтирование полного объема вкладываемых средств в конечный вариант предлагаемого к реализации продукта (объекта строительства). Основная задача — положительное значение конечного сальдо вложений, в том числе собственного капитала заказчика и подрядных организаций, и прибыли при сдаче объекта в эксплуатацию, а также снижение затрат эксплуатационного периода.

Результаты исследования. При изучении проблемы стало понятно, что строительство в Северных регионах стандартным способом является наименее эффективным как с точки зрения получения прибыли строительной организацией, так и с точки зрения последующей эксплуатации объекта. Необходимо принять во внимание и тот факт,

¹ Мазур И.И., Шапиро В.Д. *Инвестиционно-строительный инжиниринг: учеб. пособие.* М.: Экономика; 2009. 763 с.

что, в отличие от большинства строящихся жилых и общественных зданий в средней полосе России, строительство в данном регионе можно условно отнести к разработке проектных городов, которые строятся под конкретные проекты, иногда достаточно ограниченные во времени периодом прокладки трассы или периодом разработки месторождения, и в этом случае утилизация становится необходимым составляющим жизненного цикла объекта. В отличие от зданий из сборного железобетона, здания, построенные из аквапанелей, подлежат разборке и их возможно перенести на новый участок. Выдвинув предположение о необходимости обеспечения комфортабельного проживания не только коренного населения, но и добывающих компаний в лице их сотрудников, обеспечивающих стойкое материальное положение России в современных складывающихся условиях, становится понятно, что наиболее распространенное панельное строительство, обеспечивающее практически безальтернативную ранее возможность быстрого монтажа, постепенно уступает место новым строительным материалам и технологиям. Вспоминая полный цикл объекта строительства, можно предположить, что вопросы транспортирования, монтажа, последующей эксплуатации и в конечном счете ликвидации панельных зданий по завершении разработки или прокладки участка строительства делают их малоэффективными по сравнению с модульными быстросборными технологиями.

Обсуждение и заключение. Было установлено, что в качестве основного показателя эффективного ведения проекта можно считать чистый доход, то есть получение положительного результата от финансово-строительной деятельности компании. На конечный показатель этой цифры влияют как в глобальном понимании показатели финансового состояния и инфляции в государстве в целом, так и необходимость вложения дополнительных финансовых средств, необходимый уровень доходности строительной компании и срок окупаемости проекта. Срок окупаемости — это необходимый период от начального старта проекта до момента получения финансовой прибыли от реализации проекта, в отсутствие прибыли проект будет считаться неэффективным, как уже говорилось ранее. Следует стремиться к получению возможного положительного результата с подключением минимального объема внешнего финансирования.

Любой проект условно может реализовываться в четыре этапа: проект, строительство, эксплуатация, ликвидация. Сведем все наши поступления средств и требуемые издержки, расходы и выплаты, в том числе и на реализацию объекта, а также налоги, связанные со строительством, на определенный момент времени — получение чистой прибыли от реализации проекта — с учетом повышающего стоимость коэффициента инфляции, то есть в прогнозной цене конечной точки строительства объекта. Общая стоимость объекта представлена в таблице 2.

Таблица 2

Расчет чистой стоимости²

№	Показатель	Земля	Материалы	Временные здания (и т. д.)	Машины, оборудование	Всего
1	Рыночная стоимость на момент начала проекта					
2	Сметная стоимость					
3	Стоимость транспортных услуг					
4	Добавочная стоимость на <i>n</i> -шаге с учетом роста стоимости продукции от инфляции (2) – (3)					
5	Дополнительные затраты на рекультивацию, удаление отходов, ремонт бытовых помещений, машин и оборудования					
6	Доход от прироста стоимости капитала (1) – (4)			нет	нет	
7	Операционный доход (убытки) (1) – (4) – (5)	нет				
8	Налоги, проценты по кредитам, различные неустойки, которые организация выплачивает контрагентам					
9	Чистая стоимость (доход предприятия) (2) – (8)					
10	Рыночная стоимость на момент окончания проекта					
11	Экономический эффект (10) – (9) (взаимосвязь между стоимостью и доходом)					

Примечание: основная задача — получение положительного баланса, следовательно, по строке 7 не должны появляться убытки, которые в конечном этапе приведут к минусовому значению в строках налогов, отрицательному показателю в чистой стоимости и будут свидетельствовать о неэффективности проекта.

² Мазур И.И., Шапиро В.Д. *Инвестиционно-строительный инжиниринг: учеб. пособие*. М.: Экономика; 2009. 763 с.

Примерная форма представления информации по денежным потокам от операционной деятельности изображена в таблице 3.

Быстросборные здания современного типа из современных материалов унифицированных заданных размеров в условиях Северных регионов — основной предлагаемый вариант решения [5, 6]. Облегченные, но обладающие значительным теплосоппротивлением, конструкции позволят сократить не только нагрузку на нижележащие конструкции, тем самым уменьшив стоимость строительства, но и обеспечат значительно большую разовую нагрузку транспортных средств, а также сокращение монтажных и трудовых затрат.

Таблица 3

Полный спектр денежного потока в операционной деятельности

№ строк	Показатель	Значение показателей по шагам расчета			
		шаг 0 (старт проекта)	шаг 1	шаг 2	шаг t
1	Объем сдаваемых объектов				
2	Цена 1 м ²				
3	Предполагаемая выручка (1) × (2)				
4	Внерезализационные возможные доходы от повышения стоимости 1 м ²				
5	Постоянные затраты (прямые затраты)				
6	Переменные затраты (топливо, неучтенные материалы, электроэнергия и т. д.)				
7	Амортизация временных бытовых зданий				
8	Амортизация машин и оборудования				
9	Проценты по кредитам, включаемые в себестоимость 1 м ²				
10	Прибыль до вычета налогов: (3) + (4) – (5) – (6) – (7) – (8) – (9)				
11	Налоги и сборы, проценты по кредитам, различные неустойки				
12	Планируемый чистый доход: (10) – (11) + (9)				
13	Необходимая амортизация: (7) + (8)				
14	Чистый приток от операций: (12) + (13)				

Как правило, в реальной жизни все значительно сложнее чем в предлагаемой таблице, необходимо учесть и вероятностные риски перерасхода или дополнительного расхода средств, а затраты на финансовое обеспечение могут существенно возрасти в том числе и на обеспечение обслуживания долгов по кредитам или поставкам в счет будущей продукции, что несомненно скажется на финансовой реализуемости проекта.

Любое отклонение от предполагаемого результата можно условно назвать неопределенностью, в последующем приводящей к риску недополучения части дохода или даже срыву проекта, при возникновении дополнительных значительных расходов [7]. Самый малозатратный риск проекта — это снижение прибыли, ее недополучение или выход на нулевой доход проекта, самый отрицательный — получение значительного ущерба, приводящего к необходимости приостановки проекта и подчас сопровождающегося банкротством компании.

В стоимости проекта затраты на приобретение и доставку материалов, обеспечение механизации работ во многом определяют дальнейшую стратегию реализации проекта и позволяют снизить временные и стоимостные показатели, требуемые для достижения результата. Несомненно, многое зависит от выбранной технологии строительства и используемых материалов, машин и оборудования. Необходима разработка схемы принятия решений, направленных на результат получения прибыли и внедрения проекта. Грамотная разбивка строящегося объекта на захватки, календарное планирование и создание сетевых графиков позволяют осуществлять практически бесперебойное снабжение объекта. Однако транспортные расходы на доставку железобетонных панелей или блоков, а также потребность в крановом оборудовании высокой грузоподъемности, которое тоже необходимо доставить до района строительства, способны существенно увеличить конечную стоимость проекта, несмотря на кажущуюся отработанность и предполагаемую высокую скорость монтажа. Применение конструкций типа аквапанель [8] даже в условиях Крайнего Севера минимизирует транспортные затраты и потребность в кранах высокой грузоподъемности.

Рассмотрим основные условия правильности принятия логистических решений, составляющих проект. Ранее мы озвучили: рациональность организации и дальность перевозок, взаимосвязь снабжения и потребности, сокращение времени хранения и складских территорий, взаимоинтеграция процессов строительства и всех транспортных, погрузочно-разгрузочных процессов. Получаемая цепочка: определение места закупок; применение мест-

ных строительных материалов и закупка у местных поставщиков; долгосрочные договора по поставке материалов, обеспечивающие отгрузку продукции по требованию строительной компании в необходимых объемах без организации дополнительных мест складирования.

Немаловажное значение необходимо уделить контролю качества и количества поступающей продукции, контролю результатов деятельности компании в наименьшем не годовом, а квартальном периоде, что значительно проще освещает вытекающие проблемы и недостатки в разработке решений.

Эффект от принятия или не принятия конкретных решений должен определяться индивидуально на основе значимости их взаимного влияния³. На основе ключевых результатов составляются личный план деятельности и календарный план работы на предстоящий год (годовое распределение времени). Как было сказано, основа успеха — это грамотная организация рабочей деятельности, в основе которой находится точный календарный план с учетом выполнения работ на каждый рабочий день. На рис. 1 представлено сравнение базового и текущего графиков начала строительства объекта.

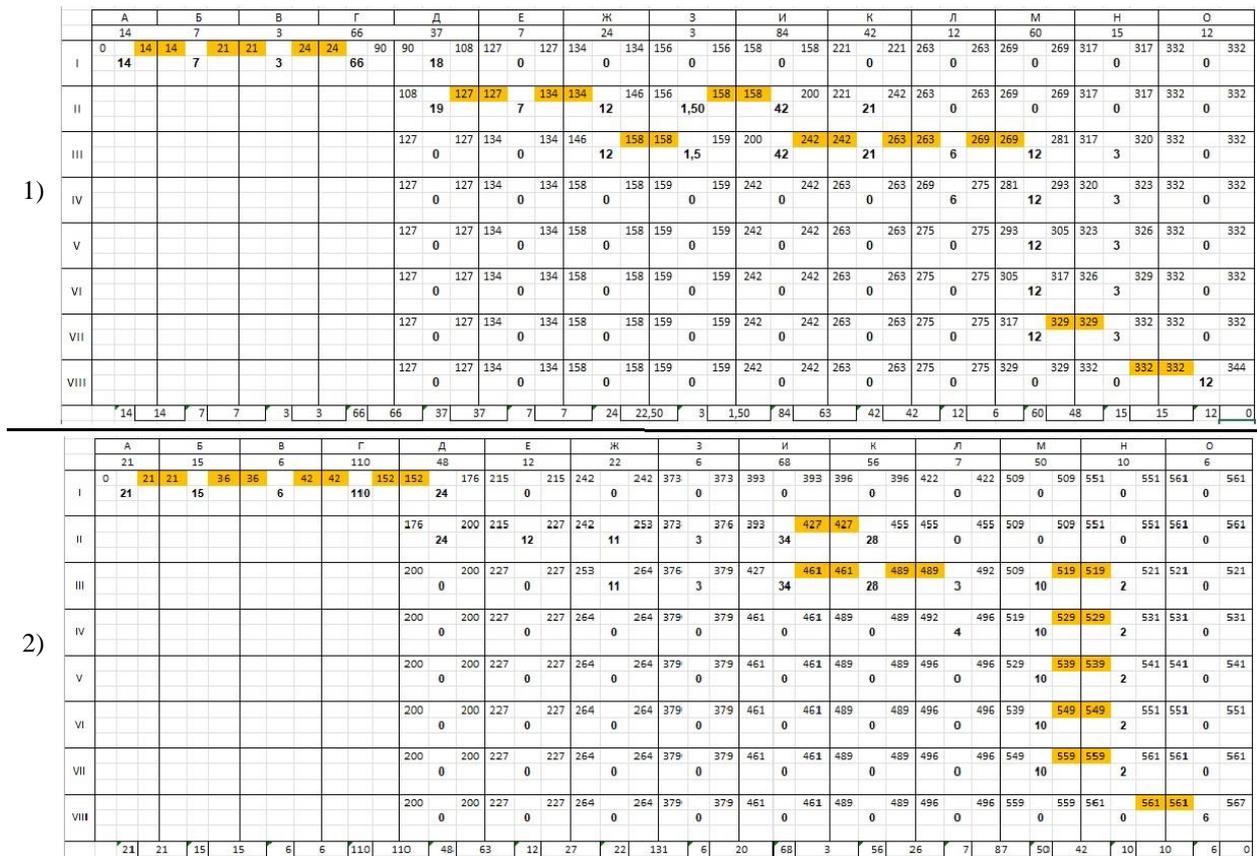


Рис. 1. Сравнение предварительного расчета матричным способом при организации строительства пятиэтажного крупнопанельного дома общей площадью до 2500 м²: 1 — базовый (расчетный) график; 2 — текущий (фактический) график. На представленном выше рис. 1: А — получение технического задания и технических условий; Б — получение градостроительного плана; В — проведение инженерно-геологических изысканий; Г — разработка проекта организации строительства (ПОС); Д — разработка и утверждение графика планово-предупредительного ремонта (ППР); Е — получение разрешения на строительство; Ж — подготовка площадки строительства; З — разработка котлована; И — устройство свайного основания; К — устройство монолитного основания; Л — гидроизоляция и обратная засыпка; М — монтаж стен; Н — установка перекрытий; О — кровельные работы. Цветом выделены критические точки.

На основании табличного расчета календарного плана, представленного на рис. 1, рассмотрим возможные типичные ошибки планирования:

- в первую очередь, как правило, не хватает конкретики и сужения постановки задачи для обеспечения ее решения или удовлетворения определенной потребности (подготовка участка строительства или доставка машин и механизмов — зачастую недостаточно четко формулируется задача при кажущейся простоте);
- отсутствие расстановки в качестве вех проекта точек критического пути, которые оказывают непосредственное влияние на успешное выполнение всего проекта в указанные сроки (с расстановкой вех проекта значительно

³ Цветков А.В., Шапиро В.Д. *Корпоративная стандартизация бизнеса: справочное пособие*. М.: Дело; 2001. 560 с.

легче в случае непредвиденных ситуаций или технической необходимости расставить все текущие даты окончания выполняемых работ);

– отсутствие информации о степени завершенности проекта к текущим датам, по факту не всегда совпадающей со временем окончания выполнения работ, в том числе из-за технических перерывов, например, выдержки бетона;

– отсутствие на графике дополнительных показателей: потребности в машинах и механизмах, движения рабочей силы и финансирования, что необходимо для стоимостной оценки проекта.

Обсуждение и заключение. Анализ изложенного материала показывает, для успешного ведения строительства в Северных регионах России необходима разработка ряда решений, направленных на принятие новых строительных технологий, четкий ориентир на подсчет сроков реализации работ с учетом сложности достижения поставленных целей, необходимость постоянного сопоставления нормативного и непосредственно затраченного времени при выполнении объемов работ с отражением наглядных результатов на календарных графиках в реальном времени. Самый простой вариант решения — это проведение разбивки работ на конкретные наименьшие законченные операции и выставление их вех, тем самым создавая четкую достоверную картину текущих работ в период строительства. Разбивка по вехам не должна быть глобальной, т.к. легче всего отслеживаются и контролируются законченные элементарные операции. Дальнейшие разработки в данной области могут вестись каждой конкретной организацией самостоятельно, исходя как из климатических, геологических, так и конструктивных особенностей проекта строительства.

Список литературы / References

1. Хамзина И.А., Петрунина Ж.В. Жизнь Комсомольска-на-Амуре в 1930-х годах (к вопросу о складывании дальневосточной историографии). *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2020;1(41):88–93. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42826671> (дата обращения: 07.08.2024).

Khamzina IA, Petrunina ZhV. Life of Komsomolsk-on-Amur in the 1930s. (To the Question of Far Eastern Historiography). *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Scientific Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University)*. 2020;1(41):88–93. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42826671> (accessed: 07.08.2024).

2. Хайруллин В.А., Кузнецов Д.В., Гареева З.А. Теоретическое обоснование величины квазимoney потока при оценке социального эффекта. *Науковедение*. 2015;7(4(29)):55. <https://doi.org/10.15862/98EVN415>

Khayrullin VA, Kuznetsov DV, Gareeva ZA. The Theoretical Substantiation Of Quasimoney Flow in the Assessment of Social Effect. *Naukovedenie (Science Studies)*. 2015;7(4(29)):55. (In Russ.) <https://doi.org/10.15862/98EVN415>

3. Бадьин Г.М., Сычёв С.А. Научные и технологические основы высокоскоростных энергоэффективных строительных систем в условиях Крайнего Севера. *Сборник научных трудов РААСН*. 2020;2:20–31.

Badin GM, Sychev SA. Scientific and Technological Basis of High-Speed Energy-Efficient Construction Systems in the Far North. *Collection of Scientific Papers of RAACS*. 2020;2:20–31. (In Russ.)

4. Афанасьев А.В., Афанасьев В.А. *Организация строительства быстровозводимых зданий и сооружений. Быстровозводимые и мобильные здания и сооружения: перспективы использования в современных условиях*. СПб: Стройиздат; 1998. С. 226–230.

Afanasyev AV, Afanasyev VA. *Organisation of Construction of Quick-Assembly Buildings and Structures. Quick-Assembly and Mobile Buildings and Structures: Prospects of Use in Modern Conditions*. Saint Petersburg: Stroiizdat; 1998. P. 226–230. (In Russ.)

5. Соловьева Е.В., Пахомов И.А. Технология строительства каркасно-монолитных энергоэффективных малоэтажных домов с промежуточным утеплителем (пенополистирольным сердечником). *Наука. Техника. Технологии*. 2015;(1):77–82. URL: <https://id-yug.com/index.php/ru/ntt/archiv/2015/1-2015?id=307> (дата обращения 07.08.2024).

Solovieva EV, Pakhomov IA. Technology Frame-Monolithic Construction of Energy-Efficient Low-Rise Buildings with Intermediate Insulation (Polystyrene Foam Core). *Science. Engineering. Technology*. 2015;(1):77–82. (In Russ.) URL: <https://id-yug.com/index.php/ru/ntt/archiv/2015/1-2015?id=307> (accessed: 07.08.2024).

6. Ерофеев П. Ю., Калужник М.М., Секо Е.В. Об исследовании рынка блок-модульного строительства быстровозводимых зданий и поселений. В кн.: *Тематический сб. трудов под ред. д. э. н., проф. В.А. Заренкова*. СПб.: Стройиздат СПб; 2003. С. 105–112.

Erofeev PYu, Kalyuzhnik MM, Seko EV. Study of the Market of Block-Modular Construction of Quick-Assembly Buildings and Settlements. In book: *Thematic Collection of Papers*. V. A. Zarenkov (Ed.), Dr.Sci (Economics), Professor. Saint Petersburg: Stroiizdat SPB; 2003. P. 105–112. (In Russ.)

7. Голикова Ю.А., Ван Ю. Особенности экономического анализа, рисков и оценки эффективности проектов. В: *Сборник материалов IV Международной научной конференции «Актуальные проблемы менеджмента, экономики и экономической безопасности»*. Чебоксары: Челябинский государственный университет; 2022. С. 77–80. <https://elibrary.ru/item.asp?id=49808331> (дата обращения 07.08.2024).

Golikova YuA, Wang Yu. Features of Economic Analysis, Risks and Assessment of Project Efficiency. In: *Proceedings of the IV International Scientific Conference “Topical Problems of Management, Economics and Economic Security”*. Cheboksary: Chelyabinsk State University; 2022. P. 77–80. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49808331> (accessed: 07.11.2024).

8. Косьянов С.О. Инновационные технологии в строительстве. Аквапанель — универсальный и современный отделочный материал. *Комплексные проблемы развития науки, образования и экономики региона*. 2012;2:39–42.

Kosyanov SO. Innovative Technologies in Construction. Fiber Reinforced Cement Board— A Universal and Modern Finishing Material. *Kompleksnye problemy razvitiya nauki, obrazovaniya i ehkonomiki regiona (Complex Problems of Development of Science, Education and Economy of the Region)*. 2012;2:39–42. (In Russ.)

Об авторах:

Надежда Владимировна Розанцева, кандидат технических наук, доцент кафедры организации строительства Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4), [ScopusID](#), [ORCID](#), nrozanceva@lan.spbgasu.ru

Александр Сергеевич Димитриев, магистрант кафедры организации строительства Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4), [ORCID](#), Alexandr.1555@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Н.В. Розанцева: научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, анализ и формирование выводов.

А.С. Димитриев: разработка идеи, подготовка текста, доработка текста.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

Nadezhda V. Rozantseva, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Organisation of Construction Department, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2-nd Krasnoarmeyskaya Str., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), nrozanceva@lan.spbgasu.ru

Alexander S. Dimitriev, Master's Student of the Organisation of Construction Department, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2-nd Krasnoarmeyskaya Str., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation), [ORCID](#), Alexandr.1555@yandex.ru

Claimed Contributorship:

NV Rozantseva: scientific supervision, formulating the main concept, aim, objectives of the research, making calculations, analysing and formulating the conclusions.

Alexander S. Dimitriev: developing the concept, preparing and refining the text.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию/ Received 18.09.2024

Поступила после рецензирования/ Revised 01.10.2024

Принята к публикации/ Accepted 09.10.2024

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES



УДК 721

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-96-106>

Критерий Пирсона для оценки количества информационных параметров в виртуальном паспорте



EDN: OWWGXL

Д.С. Кулаков , Д.В. Карелин 

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, г. Новосибирск,
Российская Федерация

✉ kulakov@reegigroup.com

Аннотация

Введение. Современный строительный рынок в России развивается стремительными темпами, особенно в части технологий, которые применяются для управления жизненным циклом зданий и сооружений. Повсеместно реализуются крупные национальные проекты, в том числе с применением технологии информационного моделирования, тем самым внедряя новые подходы и методы разработки информационных моделей. Информационный рост и темпы развития, несомненно, будут влиять и на качество реализуемых проектов, особенно в части параметризации и классификации исходных данных, что в свою очередь поспособствует появлению новых и пересмотру старых подходов при работе с информационными параметрами.

Использование технологии информационного моделирования в современном проектировании невозможно без пересмотра подходов к анализу первичных данных и результатов работ на протяжении всего жизненного цикла объекта капитального строительства. В связи с этим возникает прямая необходимость в обработке большого количества информации, особенно на начальных этапах разработки проекта.

Цель работы — экспериментальным путем выявить зависимости в информационных параметрах и определить распределение случайной величины с использованием критерия Пирсона. Технологии развиваются повсеместно, и строительная отрасль внедряет в свою структуру новые подходы и методы проектирования, а в связи с тем, что Постановление Правительства Российской Федерации от 15 сентября 2020 г. № 1431 прямо указывает на необходимость использования программных комплексов для трехмерного проектирования, возникает потребность в нормативном регулировании не только трехмерных моделей, но и информационных параметров, содержащихся в данных моделях.

Материалы и методы. В данном исследовании представлены теоретические и практические результаты, применения критерия Пирсона для оценки количества информационных параметров, полученных в ходе выполнения проекта, реализованного по технологии информационного моделирования для объекта «Павильон № 34 «Космос», расположенного в г. Москва на ВДНХ, для последующего использования в виртуальном паспорте.

Результаты исследования. При проведении математических расчетов обобщенных данных, полученных в ходе выполнения исследования, авторы подтверждают гипотезу о равномерном распределении случайной величины, что дает возможность прогнозирования будущих результатов и их интеграции на будущие объекты капитального строительства, выполненные по технологии информационного моделирования, для максимизации эффекта использования данной технологии в будущем.

Обсуждения и заключения. Полученные значения позволяют сделать вывод о том, что функция распределения случайной величины в виде равномерного распределения может быть использована для аппроксимации исследуемого эмпирического распределения. По результатам расчетов авторы выдвигают предположение о том, что для определения оценки количества информационных параметров в виртуальном паспорте в полной мере может подходить равномерный закон распределения.

Ключевые слова: виртуальный паспорт здания, информационное моделирование зданий, паспортизация, среда общих данных, жизненный цикл здания, искусственный интеллект.

Для цитирования. Кулаков Д.С., Карелин Д.В. Критерий Пирсона для оценки количества информационных параметров в виртуальном паспорте. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(4):96–106. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-96-106>

Original Empirical Research

Pearson Criterion for Assessing the Number of Information Parameters for a Digital Passport

Dmitry S. Kulakov , Dmitry V. Karelin 

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russian Federation

 kulakov@reegigroup.com

Abstract

Introduction. The present-day construction market in Russia is rapidly developing, especially the life cycle managing technologies of buildings and structures. Building information modeling technologies are used in the large-scale national projects throughout the country, which fosters implementation of the new approaches and methods to developing the information models. Information growth and development rates undoubtedly affect the quality of the implemented projects, especially in terms of parameterization and classification of the original data, which in turn contributes to the emergence of the new and revision of the old approaches to handling the information parameters. The use of building information modeling in modern design requires revision of the approaches to the analysis of the original data and the results of work throughout a life cycle of a capital construction facility. This directly induces a need to process a large amount of information, especially at the initial stages of project development. The aim of the present research is to identify dependencies among the information parameters, and determine the distribution of a random variable using the Pearson criterion. The technologies are developing worldwide fostering implementation of the new approaches and design methods in the construction industry. Furthermore, due to the Russian Federation Government Regulation No. 1431 of September 15, 2020, which directly binds to use the software packages for three-dimensional design, there arises a need to have the normative regulation not only for the three-dimensional models, but also for the information parameters underlying these models.

Materials and Methods. The research presents the theoretical and practical results obtained during implementation of a BIM-based project of a facility located at VDNKh in Moscow (the Pavilion No. 34 “Kosmos” (Space)) on using the Pearson criterion for assessing the number of information parameters for subsequent use in a digital passport.

Results. The mathematical calculations of the generalised data obtained within the research allow the authors to confirm the hypothesis of the uniform distribution of a random variable, which makes it possible to predict the future results and integrate them into the future objects of capital construction planned to be built with the use of building information modeling for maximizing efficiency of this technology in the future.

Discussion and Conclusion. The obtained values allow us to conclude that the distribution function of a random variable in uniform distribution can be used to approximate the empirical distribution under study. The calculation results allow the authors to make an assumption about full appropriateness of the uniform distribution law application for assessing the number of information parameters required for a digital passport.

Keywords: digital building passport, building information modeling, introducing a passport system, common data environment, building life cycle, artificial intelligence

For Citation. Kulakov DS, Karelin DV. Pearson Criterion for Assessing the Number of Information Parameters for a Digital Passport. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(4):96–106. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-4-96-106>

Введение. В процессе развития технологий и совершенствования подходов и методов проектирования в строительной отрасли наблюдаются перемены, связанные со сдвигом устоявшейся парадигмы. В результате анализа работ [1–4] прослеживается взаимосвязь физических и информационных моделей, которые разрабатываются посредством информационного моделирования для снижения негативных действий в виде передачи проектной ошибки на строительную площадку, минимизации затрат на выполнение работ и, соответственно, снижения проста, который приносит прямые убытки.

Объединяя информационные объекты в группы и укрупненные массивы, возможна ситуация с возникновением геоинформационных систем целых городов [5], что в полной мере позволяет создавать сферу цифровых

городов с интеграцией в нее цифровых двойников объектов капитального строительства, насыщенных параметрическими данными, системами и архивами различной документации, которая нарастает вследствие прохождения объектом его жизненного цикла. Следовательно, исходя из работ [6, 7], может существовать такой объект, как виртуальный паспорт объекта капитального строительства, который смог бы объединить внутри себя все информационные данные, увязать технологию информационного моделирования с координацией проектных решений, а также использовать полученные данные на различных жизненных стадиях. В связи с этим возникает необходимость в нормировании структуры самого виртуального паспорта и данных, входящих в него, так как на данный момент времени отсутствует даже само понятие виртуального паспорта объекта капитального строительства.

Нормирование является одним из важных факторов, влияющих на строительную индустрию в целом, которая представляет собой крупнейшую отрасль народного хозяйства, повседневно решающую множество задач не только социального, но и государственного характера. Процессы строительства, несомненно, связаны с технологиями и являются комплексными и многосоставными по причине большого количества требований и правил, которым должны соответствовать технологическое качество строительных процессов [8].

Материалы и методы. Общеизвестно, что при определении, когда факторы, влияющие на состояние системы, имеют случайную природу и неполную или недостаточную определенность в информационном плане, возможно применение стохастического подхода, что дает возможность использовать аппарат математической статистики. На текущий момент времени на строительном рынке все больше появляется проектов, выполненных по технологии информационного моделирования (ТИМ). И это касается не только нового строительства, но и используется при реконструкции, модернизации и выводе из эксплуатации объектов [9, 10]. В данном исследовании рассматриваются теоретические и практические результаты, полученные в ходе выполнения проекта, реализованного по технологии информационного моделирования для объекта «Павильон № 34 «Космос», расположенного в г. Москва на ВДНХ (рис. 1). Аббревиатура ТИМ — это отечественный аналог BIM—технологии, которая в полной мере используется и применяется на зарубежном рынке в строительной индустрии [11].

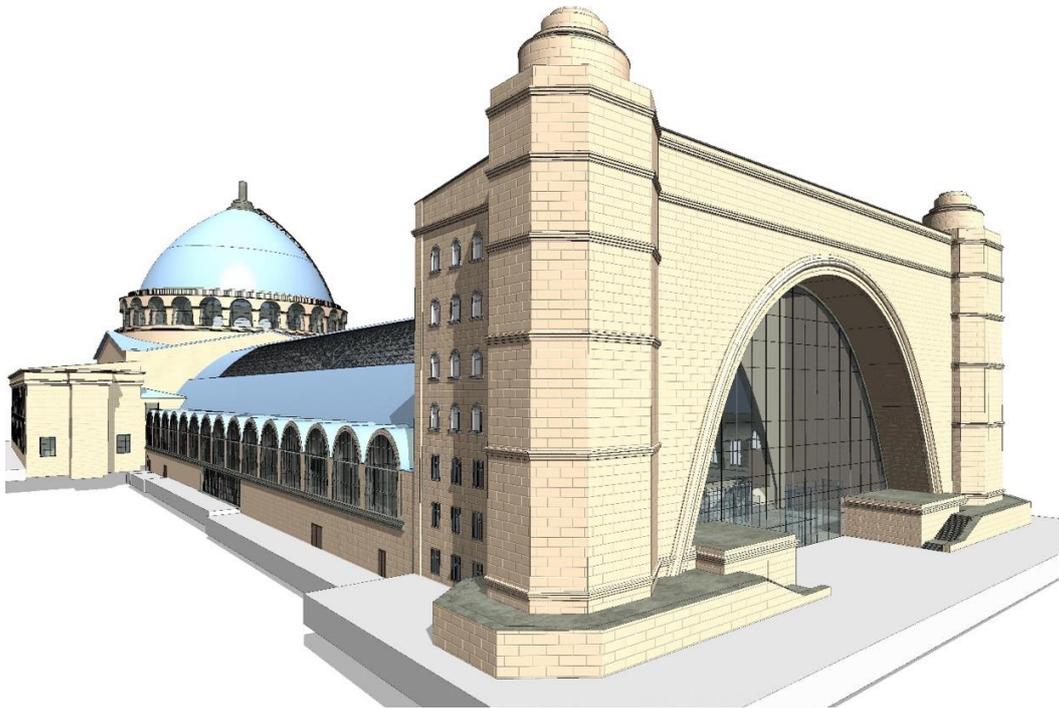


Рис. 1. Информационная модель павильона № 34 «Космос», г. Москва, ВДНХ

Работы по сохранению архитектурного облика здания, обновлению экспонатов выставок и инженерному переоснащению систем рассматриваемого объекта проводились в связи с тем, что информационная трансформация объектов капитального строительства постепенно внедрялась в календарный график планирования работ, выполненных с применением технологии ТИМ [8]. В процессе исследования был получен массив данных, которые в свою очередь были сгруппированы в табличной форме с применением функций описательной статистики (таблица 1). Работа по реконструкции «Павильона № 34 «Космос» представляла собой непрерывный комплекс работ и мероприятий по изменению и обновлению проектных решений с целью улучшения условий работ и качества потребляемых услуг. Особенности свойства: высокая эффективность использования территории, замкнутый периметр, универсальность, система внутренних и внешних связей — дают право рассматривать данный проект в

качестве отдельного объекта реконструкции. Обобщенные параметры реконструкции, собранные в таблице 1, учитывали:

- улучшение состояния здания;
- улучшение эстетических качеств застройки;
- развитие транспортных связей;
- модернизацию систем культурно-бытового обслуживания;
- увеличение плотности застройки;
- решение вопросов энергосбережения.

Для того, чтобы провести анализ применимости закона *хи-квадрат Пирсона*, потребовалось проанализировать вариационный ряд, полученный из исходной выборки данных, полученных в результате выполнения проекта с использованием ТИМ. Анализ был выполнен средствами MS Excel.

Таблица 1

Описательная статистика по выборочной совокупности

<i>N</i>	1000
<i>min</i>	81
<i>max</i>	449
<i>a</i>	270,93
<i>s</i>	106,68

Примечание: *N* — объем выборки; *min* — минимальное значение; *max* — максимальное значение; *a* — среднее арифметическое; *s* — стандартное отклонение.

В продолжении эксперимента необходимо определить частоты и построить гистограмму распределения случайной величины. В связи с тем, что объем выборки *N* содержит в себе большое количество значений, которые были получены в рамках работы по реконструкции [12, 13], для определения количества интервалов используем формулу Стёрджесса:

$$n = 1 + \log_2 N,$$

где *N* — объем выборки.

В результате вычислений *n* = 10.

Определим ширину каждого интервала:

$$\Delta = \frac{x_{max} - x_{min}}{n},$$

где *x_{max}* — максимальное значение; *x_{min}* — минимальное значение; *n* — количество интервалов.

$$\Delta = 36,8$$

Далее необходимо построить интервалы (таблица 2) и гистограмму распределения, на которой будут изображены вероятности распределения параметров с заданной интенсивностью (рис. 2).

Таблица 2

Результаты вычислений интервалов

<i>j</i>	от	до	<i>n_j</i>
1	81,0	117,8	104
2	117,8	154,6	99
3	154,6	191,4	79
4	191,4	228,2	75
5	228,2	265,0	101
6	265,0	301,8	98
7	301,8	338,6	121
8	338,6	375,4	115
9	375,4	412,2	110
10	412,2	449,0	98

0

$$\Sigma \quad \boxed{1000}$$

Примечание: *j* — интервалы; *n_j* — определяющие частоты.

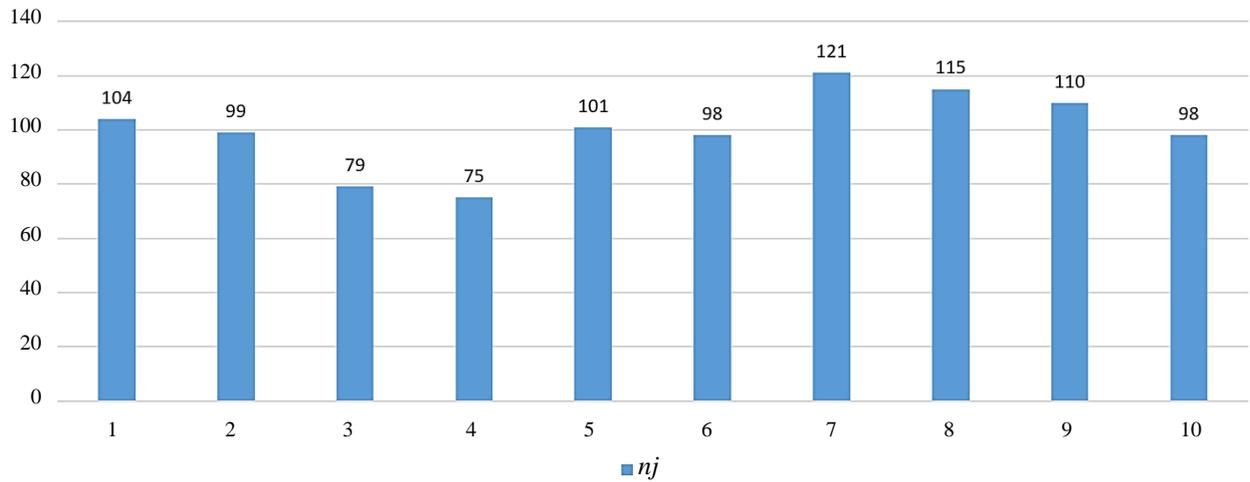


Рис. 2. Экспериментальная вероятность распределения параметров с заданной интенсивностью

Из (рис. 2) делаем описательный вывод о том, что значения сконцентрированы волнообразным типом, и для определения закона о распределении случайной величины необходимо выдвинуть гипотезы:

1. Случайная величина имеет равномерное распределение (рис. 3).

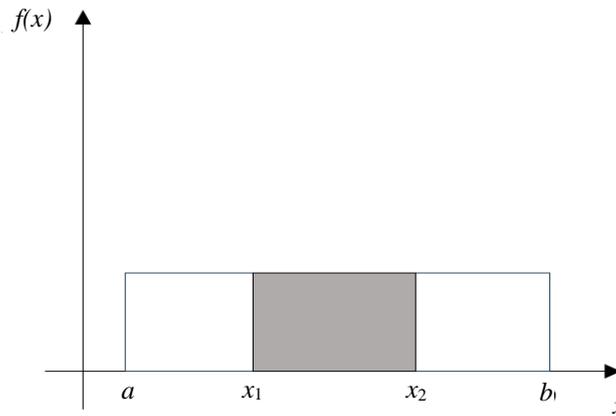


Рис. 3. График равномерного распределения случайной величины

$$f(x) = \frac{1}{b-a}$$

$$P(x_1 \leq x \leq x_2) = \frac{x_2 - x_1}{b - a},$$

где a, b — концы интервалов; x_1, x_2 — диапазон значений вероятности; P — вероятность попадания.

2. Случайная величина имеет нормальное распределение (рис. 4).

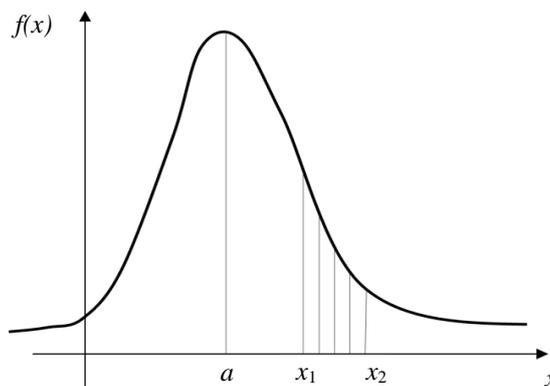


Рис. 4. График нормального распределения случайной величины

$$f(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-(x-a)^2}{2s^2}\right)$$

$$P(x_1 \leq x \leq x_2) = \Phi\left(\frac{x_2 - a}{s}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - a}{s}\right),$$

где a — среднее значение (пик распределения); S — стандартное отклонение; x_1, x_2 — диапазон значений вероятности; Φ — функция Лапласа; P — вероятность попадания.

В этом случае для того, чтобы окончательно выбрать функцию распределения, необходимо ввести нулевую гипотезу, согласно которой статистический ряд, который лежит в основе эмпирического распределения, представляет собой случайную выборку. При этом в качестве исходного материала для создания совокупности данных используется массив вероятностей, который имеет определенный закон распределения. При таких условиях исследование сводится к нахождению уровня допустимости расхождения эмпирического и теоретического распределения (таблица 3), который в свою очередь установит соответствие между распределением и его допустимостью. В данной работе для определения возможной степени расхождения используется критерий Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_j \frac{(n_j - n_{\tau j})^2}{n_{\tau j}},$$

где n_j — частоты; $n_{\tau j}$ — теоретические частоты.

Таблица 3

Результаты вычислений частот

j	от	до	n_j
1	81,0	117,8	104
2	117,8	154,6	99
3	154,6	191,4	79
4	191,4	228,2	75
5	228,2	265,0	101
6	265,0	301,8	98
7	301,8	338,6	121
8	338,6	375,4	115
9	375,4	412,2	110
10	412,2	449,0	98

Примечание: n_j — частоты; $n_{\tau j}$ — теоретические частоты.

Для проверки гипотезы о равномерном распределении случайной величины сведем расчетные данные в таблицу 4.

Таблица 4

Результаты вычислений частот для проверки гипотезы о равномерном распределении

j	от	до	n_j	p_j	$n_{\tau j}$	χ^2
1	81,0	117,8	104	0,100	100	0,16
2	117,8	154,6	99	0,100	100	0,01
3	154,6	191,4	79	0,100	100	4,41
4	191,4	228,2	75	0,100	100	6,25
5	228,2	265,0	101	0,100	100	0,01
6	265,0	301,8	98	0,100	100	0,04
7	301,8	338,6	121	0,100	100	4,41
8	338,6	375,4	115	0,100	100	2,25
9	375,4	412,2	110	0,100	100	1,00
10	412,2	449,0	98	0,100	100	0,04
Σ				1,000	1000	19

Для проверки гипотезы о нормальном распределении случайной величины сведем расчетные данные в таблицу 5.

Таблица 5

Результаты вычислений частот для проверки гипотезы о нормальном распределении

j	от	до	n_j	p_j	n_{tj}	хи2
1	81,0	117,8	104	0,076	75,5814	10,6854
2	117,8	154,6	99	0,062	62,1693	21,8195
3	154,6	191,4	79	0,090	90,2264	1,39684
4	191,4	228,2	75	0,116	116,391	14,7197
5	228,2	265,0	101	0,133	133,456	7,89321
6	265,0	301,8	98	0,136	136,015	10,625
7	301,8	338,6	121	0,123	123,217	0,03987
8	338,6	375,4	115	0,099	99,2159	2,51105
9	375,4	412,2	110	0,071	71,0107	21,4076
10	412,2	449,0	98	0,093	92,7171	0,30101
			Σ	1,000	1000	91

Сведем данные, полученные из таблицы 4 и таблицы 5, в график распределения параметров с интенсивностью (рис. 5).

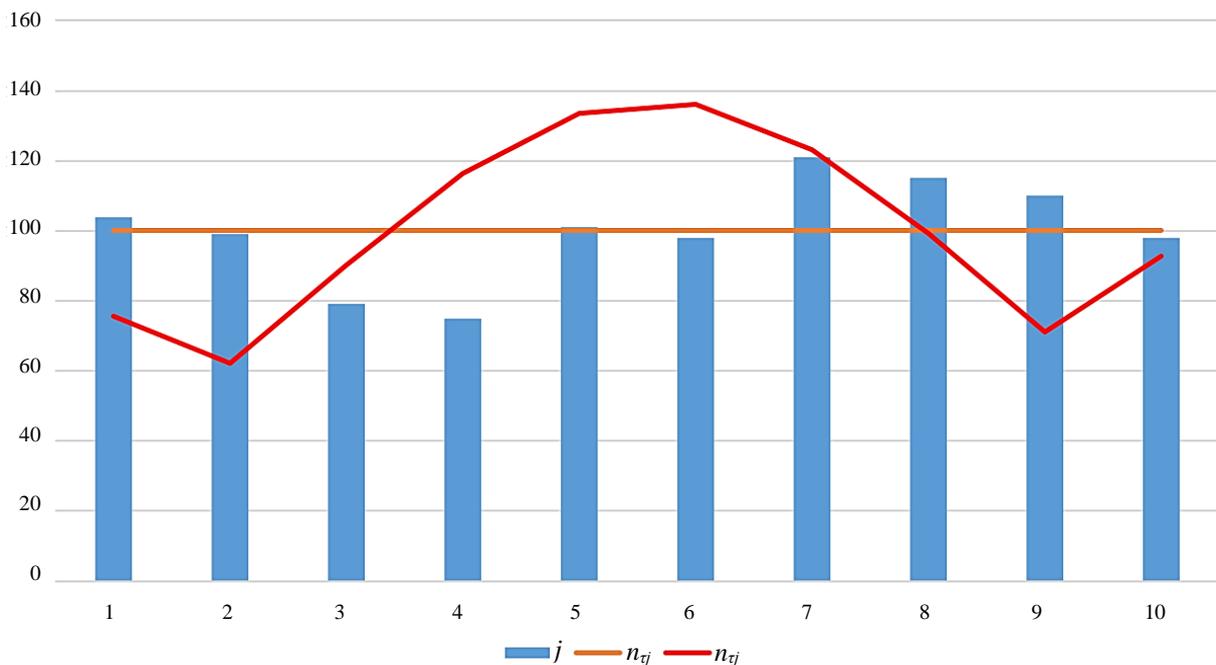


Рис. 5. Экспериментальная вероятность распределения параметров с заданной интенсивностью по результатам расчетов

Для продолжения экспериментальной части и подтверждения экспериментальных выводов необходимо ввести понятие нулевой гипотезы. Нулевая гипотеза — это незначительное различие между теоретическими и наблюдаемыми частотами. Задача сводится к тому, что необходимо либо принять данное суждение, либо его опровергнуть. Для этого потребуется сравнить χ^2 с неким пороговым критическим значением « χ^2 крит».

Для расчета критерия Пирсона сведем общие таблицы средствами MS Excel.

Таблица 6

Проверка гипотезы о равномерном распределении

степ. свобод.	9
хи2 крит.	3,325113
p -value	0,0290106

Проверка гипотезы о нормальном распределении

степ. свобод.	9
хи ² крит.	3,3251128
<i>p-value</i>	8,526E-16

Примечание: *p-value* — вероятность того, что мы примем нулевую гипотезу, а она на самом деле неверна.

Результаты исследования. По результатам сравнения данных из таблицы 4 и таблицы 6 получаем, что $19 > 3,325113$, тем самым можем принять нулевую гипотезу. По результатам сравнения данных из таблицы 5 и таблицы 7 получаем, что $91 > 3,325113$, тем самым также принимаем нулевую гипотезу. Данное сравнение входит в первый вариант численного анализа полученных данных. Второй вариант анализа сводится к нахождению *p-value*, представленного в таблице 6 и таблице 7.

Таким образом (таблица 6), для равномерного распределения делаем вывод о том, что необходимо принять нулевую гипотезу, и при значении *p-value* = 0,0290106 частоты экспериментальные и теоретические лучше между собой согласовываются.

По данным таблицы 7 (о нормальном распределении) делаем вывод о том, что необходимо отвергнуть нулевую гипотезу, и при значении *p-value* = 8,526E-16 частоты экспериментальные и теоретические между собой не согласовываются.

Вывод о том, что функция распределения случайной величины в виде равномерного распределения случайных величин имеет место быть, можно сделать из полученных значений и использовать для проверки эмпирического распределения. Данные, полученные в результате расчетов, позволили авторам сделать предположение о том, что для определения оценки количества информационных параметров в виртуальном паспорте может использоваться равномерный закон распределения, который также подтверждает выводы, которые были сформулированы в [14].

Обсуждение и заключение. На основании проделанных вычислений, связанных со статистическим анализом информационных параметров, авторы исследования могут сделать следующие выводы:

1. В связи с тем, что на данный момент времени актуальность создания параметрических информационных моделей с каждым днем увеличивается, появляется необходимость в том, чтобы разработка и комплектование информационных моделей представляли из себя прозрачные и понятные процессы [15]. Для этого на ранних этапах сбора информации для создания информационного проекта можно вводить равномерный закон распределения для выявления оптимального количества информационных параметров для обособленного этапа жизненного цикла объекта капитального строительства.

2. Доказано, что при применении различных средств автоматизированного проектирования для выполнения работ по новому строительству, а в особенности при реконструкции объектов капитального строительства, существует возможность виртуальной симуляции процессов для определения оптимальных временных промежутков выполнения работ [16]. Для осуществления данного подхода авторы исследования предлагают использовать закон равномерного распределения информационных параметров, который способен оптимизировать расход бюджетных средств и иных ресурсов в информационных моделях в виде математического анализа исходных данных.

3. Актуальность проектных данных на строительной площадке все больше сказывается на конечном результате, информация со временем не оцифровывается и не упорядочивается, что приводит к низкому качеству работ [17], переносу (а иногда и срыву) сроков строительства [18]. Информационная параметризация в виде виртуального паспорта со временем будет содержать в себе огромный массив данных, и для его обработки могут быть использованы данные текущего исследования.

4. Использование закона равномерного распределения напрямую будет влиять на определение количества информационных параметров в виртуальном паспорте, что позволит минимизировать ошибку и сократить время первичного анализа данных [19].

Список литературы / References

- Nagarjuna Y. *Analysis of lean construction by using last planner system*. URL: https://www.academia.edu/8753126/Analysis_of_Lean_Construction_by_Using_Last_Planner_System_AnalysisofLeanConstruction-byUsingLastPlannerSystem_CONTENTS (accessed: 05.08.2024).
- Mowade K, Shelar K. *Lean Construction. International Journal of Scientific Engineering and Science*. 2017;1(11):70–74. URL: https://www.academia.edu/100484952/Lean_Construction (accessed: 05.08.2024).

3. Shirgar NAH, Yadav NB. Overview of Lean Concept in Construction Industry. *GRD Journals*. 2019;11–14. URL: https://www.grdjournals.com/article?paper_id=GRDCF012003 (accessed: 05.08.2024).

4. Грибкова И.С., Попова О.С. Муниципальные геоинформационные системы: проблемы и пути решения. *Научные труды КубГТУ*. 2016;11:143–154. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27677209> (дата обращения: 05.08.2024).

Gribkova IS, Popova OS. Municipal Geographical Information Systems: Problems and Solutions. *Scientific Works of the Kuban State Technological University*. 2016;11:143–154. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27677209> (accessed: 05.08.2024).

5. Смилка В.А. Применение геоинформационных технологий при проведении градостроительного мониторинга. В: *Материалы III Международной научно-технической интернет-конференции «Информационные технологии в образовании, науке и производстве»*. Минск: БНТУ; 2015. 6 с. URL: <http://rep.bntu.by/handle/data/21915> (дата обращения: 05.08.2024).

Smilka VA. Application of Geoinformation Technologies in Urban Planning Monitoring. In: *Proceedings of the III International Scientific and Technical Internet Conference “Information Technologies in Education, Science and Production”*. Minsk: BNTU; 2015. 6 p. (In Russ.) URL: <http://rep.bntu.by/handle/data/21915> (accessed: 05.08.2024).

6. Кулаков Д.С., Карелин Д.В. Нормирование информационных параметров виртуального паспорта для цифровой модели здания. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2024;26(1)41–55. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2024-26-1-41-55>

Kulakov DS, Karelin DV. Normalization of Information Parameters of Digital Passport for Digital Building Model. *Journal of Construction and Architecture*. 2024;26(1)41–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2024-26-1-41-55>

7. Гусакова Е.А., Овчинников А.Н. Перспективы моделирования жизненного цикла объекта капитального строительства информационными потоками. *Вестник МГСУ*. 2020;15(8):1191–1200. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.8.1191-1200>

Gusakova EA, Ovchinnikov AN. Prospects for the Life Cycle Modeling of a Capital Construction Facility Using Information Flows. *Bulletin of MGSU*. 2020;15(8):1191–1200. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.8.1191-1200>

8. Звонов И.А., Нарезная Т.К., Корнилова Д.Л. Принципы применения адаптируемых модульных проектов на базе информационного моделирования в рамках модернизации зданий образовательных учреждений. В: *Материалы II Междунар. науч.-практ. конф. «BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры»*. СПб.: СПбГАСУ; 2019. <https://doi.org/10.23968/BIMAC.2019.013>

Zvonov IA, Narezhnaya TK, Kornilova DL. Principles of Application of Adaptable Modular Projects Based on Information Modeling within the Framework of Modernization of Buildings of Educational Institutions. In: *Proceedings of the II International Scientific and Practical Conferences “BIM-Modeling in Construction and Architecture Problems”*. Saint Petersburg: SPbGASU; 2019. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/BIMAC.2019.013>

9. Шарипов Р.Х. *ТРИЗ нужна России: проблемы технического творчества*. Чебоксары: Новое время; 2018. 412 с. Sharipov RKh. *TIPS is Needed in Russia: Problems of Technical Creativity*. Cheboksary: Novoe vremya; 2018. 412 p. (In Russ.)

10. Григорьев С.Н., Смуров И.Ю. Перспективы развития аддитивного производства в России и за рубежом. *Инновации*. 2013;(10(180)):76–82. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22259181> (дата обращения: 05.08.2024).

Grigoriev SN, Smurov IYu. Prospects for the Development of Innovative Additive Manufacturing in Russia and Abroad. *Innovations*. 2013;(10(180)):76–82. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22259181> (accessed: 05.08.2024).

11. Асланов Н.М., Садиг Р.И. Основные методы оценки эффективности инвестиционных проектов. *Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом*. 2011;3:39–46.

Aslanov NM, Sadig RI. Main Methods of Assessing the Efficiency of Investment Projects. *Problems of Economics and Management of the Oil and Gas Complex*. 2011;3:39–46. (In Russ.)

12. Морозенко А.А. Современные подходы к оценке надежности предприятий, участвующих в реализации инвестиционно-строительных проектов. *Научное обозрение*. 2017;12:123–128.

Morozenko A.A. Modern Approaches to Assessing the Reliability of Enterprises Participating in the Implementation of Investment and Construction Projects. *Scientific Review*. 2017;12:123–128. (In Russ.)

13. Орехова С.В., Мисюра А.В. Трансформация бизнес-модели и возрастающая отдача высокотехнологичного предприятия. *Вестник Челябинского государственного университета*. 2020;(6(440)):75–85. <https://doi.org/10.47475/1994-2796-2020-10609>

Orekhova SV, Misyura AV. Business Model's Transformation And Increasing Results of A High-tech Company. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta (Bulletin of Chelyabinsk State University)*. 2020;(6(440));75–85. <https://doi.org/10.47475/1994-2796-2020-10609>

14. Лемешко Б.Ю., Блинов П.Ю. *Критерии проверки отклонения распределения от равномерного закона*. Новосибирск: НГТУ; 2015. 182 с.

Lemeshko BYu, Blinov PYu. *Criteria for Testing the Deviation of Distribution From the Uniform Law*. Novosibirsk: NSTU; 2015. 182 p. (In Russ.)

15. Грязнова Н.В., Сайтибрагимов А.Э. Цифровая параметрическая градостроительная документация. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2021;11(2(37)):330–341. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-2-330-341>

Griaznova NV, Saytibragimov AE. Digital Parametric Urban Planning Documentation. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost. Bulletin of the Higher Education Institutions. Investments. Construction. Real Estate*. 2021;11(2(37)):330–341. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-2-330-341>

16. Пешков В.В., Алексанин И.А. Разработка организационно-технических решений на этапе капитального ремонта жизненного цикла объекта строительства с использованием возможностей его цифровой модели. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2022;12(2):196–205. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-2-196-205>

Peshkov VV, Aleksanin IA. Management and Engineering Solutions at the Overhaul Stage in the Life Cycle of Constructing Facilities Using Their Digital Models. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost. Bulletin of the Higher Education Institutions. Investments. Construction. Real Estate*. 2022;12(2):196–205. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-2-196-205>

17. Горячев М.Г., Лугов С.В., Калёнова Е.В. Анализ некоторых параметров зависимости для определения требуемой прочности нежестких дорожных одежд при обосновании конструктивного решения по их усилению. *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. 2020;2(24):4. URL: <https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/907/688> (дата обращения: 05.12.2024).

Goryachev MG, Lugov SV., Kalenova EV. Analysis of Some Dependence Parameters for Determining the Required Strength of Flexible Pavements when Justifying the Constructive Decision to Strengthening Them. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura. (Automobile. Road. Infrastructure)*. 2020;2(24). (In Russ.) URL: <https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/907/688> (accessed: 05.12.2024).

18. Страхов А.С., Исупова Д.А., Трегубов А.П. Специфика государственного регулирования внедрения ТИМ-технологий в строительстве. В: *Материалы XXVI региональной конференции молодых ученых и исследователей Волгоградской области*. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет; 2022. С. 305–306. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48331348> (дата обращения: 05.12.2024).

Strakhov AS, Isupova DA, Tregubov AP. Specifics of State Regulation of the Implementation of BIM Technologies in Construction. In: *Proceedings of the XXVI Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd Region*. Volgograd: Volgograd State Technical University; 2022. P. 305–306. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48331348> (accessed: 05.08.2024).

19. Кулаков Д.С., Мордвов А.А., Карелин Д.В. Виртуальный паспорт объектов строительства — предвестник четвертой промышленной революции в строительстве. В: *Сб. трудов 29-й регион. науч. студ. конф. «Интеллектуальный потенциал Сибири»*. Новосибирск: НГТУ; 2021. С. 197–199.

Kulakov DS, Mordvov AA, Karelin DV. Digital Passport of the Construction Objects — A Predecessor of the Fourth Industrial Revolution in Construction. In: *Proceedings of the 29th Regional Scientific Student Conference “Intellectual Potential of Siberia”*. Novosibirsk: NSTU; 2021. P. 197–199. (In Russ.)

Об авторах:

Дмитрий Сергеевич Кулаков, аспирант Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (630008, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9110-1000), kulakov@reegigroup.com

Карелин Дмитрий Викторович, заведующий кафедрой градостроительства и городского хозяйства Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (630008, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113), кандидат архитектуры, [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9110-1000), d.karelin@sibstrin.ru

Заявленный вклад авторов:

Д.В. Карелин: научное руководство, концепция исследования, развитие методологии;

Д.С. Кулаков: автор исследования, написание исходного текста, итоговые выводы.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Dmitry S. Kulakov, Postgraduate Student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (113, Leningradskaya Str., Novosibirsk, 630008, Russian Federation), [ORCID](#), kulakov@reegigroup.com

Dmitry V. Karelin, Cand.Sci. (Architecture), Head of the Urban Planning and Urban Utilities Department, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (113, Leningradskaya Str., Novosibirsk, 630008, Russian Federation), PhD in Architecture, [ORCID](#), d.karelin@sibstrin.ru

Claimed Contributorship:

Dmitry V. Karelin: scientific supervision, research concept, development of methodology.

Dmitry S. Kulakov: authorship of the research, writing the original text, final conclusions.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию/ **Received** 09.09.2024

Поступила после рецензирования/ **Revised** 20.10.2024

Принята к публикации/ **Accepted** 29.10.2024



РЕЦЕНЗИЯ

на монографию «Повышение безопасности металлических конструкций»
(авторы: И.Н. Гарькин, С.В.Клюев, Л.С.Сабитов)

Частыми причинами повреждений различных металлических конструкций, и особенно подкрановых балок на промышленных предприятиях являются возникновение усталостных трещин вследствие циклических воздействий мостовых кранов. В связи с этим разработка новых эффективных технических решений повышения выносливости подкрановых балок чрезвычайно актуальна.

В результате исследований, опубликованных в монографии разработаны: модель оптимизации подкрановых конструкций на основе рационального распределения материала в сечении; методы повышения долговечности подкрановых конструкций; конструкции квадратных и прямоугольных рельсов с увеличенными моментами инерции при кручении. Все вышеуказанные результаты, безусловно, можно отнести к научной новизне.

К практической значимости можно отнести разработку новых конструктивных решений подкрановых балок, обеспечивающих снижение материалоемкости и повышение технологичности изготовления; простоту монтажа и ремонтпригодности

Монография представляет собой законченную научно-техническую работу с полным обоснованием теоретических и экспериментальных исследований, их актуальности, научной новизны, достоверности и практической значимости. Работа будет полезна как специалистам практикам в области строительства, так и студентам профильных направлений подготовки высших и средне специальных учебных заведений.

Считаю, что монография «Повышение безопасности металлических конструкций» авторов И.Н. Гарькина, С.В. Клюева, Л.С. Сабитова может быть рекомендована к опубликованию.

Рецензент:

Доктор технических наук, профессор,
академик РААСН, заслуженный строитель РФ,
профессор кафедры «Строительство уникальных
зданий и сооружений» ФГБОУ ВО Донской
государственный технический университет

Левон Рафазлович Маилян

РЕЦЕНЗИЯ

на монографию «Повышение безопасности металлических конструкций»
(авторы: И.Н. Гарькин, С.В.Клюев, Л.С.Сабитов)

Монография «Повышение безопасности металлических конструкций» авторов И.Н. Гарькина, С.В.Клюева, Л.С.Сабитова написана грамотным, понятным языком и позволяет составить мнение о научной работе как о законченном научно-квалификационном труде, выполненном на современном уровне по актуальности темы, научной новизне и практической значимости.

Актуальность выбранной темы продиктована многими авариями на промышленных предприятиях, частыми причинами которых являлись повреждения металлических конструкций (в особенности подкрановых балок).

Практическая значимость выполненной работы очевидна, поскольку в ней разработаны новые конструктивные решения подкрановых балок, обеспечивающие снижение материалоемкости и повышение технологичности их изготовления.

Научная новизна работы состоит в усовершенствовании методов расчета подкрановых конструкций, предусматривающих рациональное распределение материала по сечению для повышения выносливости подкрановых конструкций; а также в получении новых экспериментальных данных, адекватно отражающих работу подкрановых конструкций под действием циклических нагрузок.

Сформулированные авторами цели и задачи исследования выполнены.

Считаю, что монография «Повышение безопасности металлических конструкций» авторов И.Н. Гарькина, С.В.Клюева, Л.С.Сабитова может быть рекомендована к печати.

Рецензент:

Доктор технических наук, профессор, советник РААСН,
заведующий кафедрой «Математика
и математическое моделирование»
ФГБОУ ВО Пензенский государственный
университет архитектуры и строительства

Александр Максимович Данилов