

# 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, № 1, 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.

**В журнале публикуются научные статьи по следующим специальностям:**

- 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.

---

|                                                           |                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Индексация:                                               | РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef                                                                                                                                                                               |
| Наименование<br>органа,<br>зарегистрировавшего<br>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<br>и издатель                                  | Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)                                                              |
| Периодичность                                             | 4 выпуска в год                                                                                                                                                                                            |
| Адрес учредителя<br>и издателя                            | 344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1                                                                                                                                           |
| E-mail                                                    | <a href="mailto:sovtrendstr@gmail.com">sovtrendstr@gmail.com</a>                                                                                                                                           |
| Телефон                                                   | +7 (863) 2–738–372                                                                                                                                                                                         |
| Сайт                                                      | <a href="http://www.stsg-donstu.ru/">http://www.stsg-donstu.ru/</a>                                                                                                                                        |
| Дата выхода в свет                                        | 28.03.2024                                                                                                                                                                                                 |





# 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. 1, 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 publishes articles covering the results of the cutting-edge research in the following areas:***

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

---

|                                                         |                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Indexing:</i>                                        | RISC, CyberLeninka, CrossRef                                                                                                                                                            |
| <i>Name of the Body that Registered the Publication</i> | Mass media registration certificate ЭЛ № ФС 77 – 83923 dated September 16, 2022, issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media |
| <i>Founder and Publisher</i>                            | Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Technical University (DSTU)                                                                               |
| <i>Periodicity</i>                                      | 4 issues per year                                                                                                                                                                       |
| <i>Address of the Founder and Publisher</i>             | 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation                                                                                                                               |
| <i>E-mail</i>                                           | <a href="mailto:sovtrendstr@gmail.com">sovtrendstr@gmail.com</a>                                                                                                                        |
| <i>Telephone</i>                                        | +7 (863) 2–738–372                                                                                                                                                                      |
| <i>Website</i>                                          | <a href="http://www.stsg-donstu.ru/">http://www.stsg-donstu.ru/</a>                                                                                                                     |
| <i>Date of Publication</i>                              | March, 28, 2024                                                                                                                                                                         |



## Редакционная коллегия

**главный редактор** — **Батаев Дена Карим-Султанович**, доктор технических наук, профессор, директор КНИИ им. Х.И.Ибрагимова РАН, член Президиума Южного научного центра РАН (Грозный, Российская Федерация);

**заместитель главного редактора** — **Маляня Дмитрий Рафаэлович**, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

**выпускающий редактор** — **Студенникова Светлана Геннадьевна**, начальник отдела публикационной активности, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Панасюк Леонид Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

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

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

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

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

## Editorial Board

**Editor-in-chief** — **Dena K.-S. Bataev**, Doctor of Engineering Science, Professor, Director of Kh. Ibragimov Complex Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Grozny, Russian Federation);

**Deputy editor-in-chief** — **Dmitry R. Mailyan**, Doctor of Engineering Science, Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia);

**Executive editor** — **Svetlana S. Studennikova**, Head of Publication Activity Department, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia);

**Executive secretary** — **Nadezhda A. Shevchenko**, Head of the Department of Scientific and Technical Information and Scientific Publications, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia);

**Bekkiev MYu**, Doctor of Engineering Science, Professor, Director of the High-Mountain Geophysical Institute (Nalchik, Russia);

**Khodzhaev AA**, Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Department “Curricula and Educational Literature Control” of the Ministry of Higher and Specialized Secondary Vocational Education of the Republic of Uzbekistan (Tashkent, Uzbekistan);

**Nesvetaev GV**, Doctor of Engineering Science, Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia);

**Prokopov AYu**, Doctor of Engineering Science, Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia);

**Skibin GM**, Doctor of Engineering Science, Professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (Novocherkassk, Russia);

**Pleshko MS**, Doctor of Engineering Science, Professor, National University of Science and Technology MISIS (Moscow, Russia);

**Kotlyar VD**, Doctor of Engineering Science, Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia);

**Zaichenko NM**, Doctor of Engineering Science, Professor, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (Donetsk, Russia);

**Adilkhodjaev AI**, Doctor of Engineering Science, Professor, Tashkent State Transport University (Tashkent, Uzbekistan);

**Grigoryan VI**, Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Association of Industrial Enterprises of Armenia (Yerevan, Republic of Armenia);

**Baiburin AKh**, Doctor of Engineering Science, Professor, South Ural State University (Chelyabinsk, Russia);

**Tolkynbaev TA**, Doctor of Engineering Science, Professor, full (foreign) member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), first Vice-Rector of Taraz University (Taraz, Kazakhstan);

**Yazyev BM**, Doctor of Engineering Science, Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia);

**Akimov PA**, Doctor of Engineering Science, Professor, Rector of National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), academician of the Russian Academy;

**Panasyuk LN**, Doctor of Engineering Science, Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia);

**Bespalov VI**, Doctor of Engineering Science, Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia);

**Danilina NV**, Doctor of Engineering Science, Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU) (Moscow, Russia);

**Sidorenko VF**, Doctor of Engineering Science, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU) (Volgograd, Russia);

**Tovmasyan SA**, Doctor of Architecture, Associate Professor, member of the Chamber of Architects of the Republic of Armenia (Yerevan, Republic of Armenia).

## СОДЕРЖАНИЕ

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

- Георгиев С.В., Маилян Д.Р., Соловьёва А.И.* К определению наиболее эффективного способа усиления железобетонных колонн при разных уровнях нагружения ..... 7
- Ефименко Е.А.* Оптимизация положения опор под железобетонной плитой произвольной конфигурации ... 15

### ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

- Прокопов А.Ю., Адоньев Н.А.* Обзор зарубежного опыта инженерной защиты морских берегов и склонов ..... 27

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

- Парамонова О.Н., Юдина Н.В.* Строительные отходы как вторичные материальные ресурсы с позиции теории устойчивости дисперсных систем ..... 48

### ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

- Крюков К.М., Чжан Ч.* Формирование системы показателей управления стоимостью инвестиционно-строительных проектов зеленых медицинских зданий ..... 57

### СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

- Чепурненко А.С., Кондратьева Т.Н.* Определение реологических параметров полимеров при помощи методов машинного обучения ..... 71

### ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО, ПЛАНИРОВКА СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

- Потапова В.Г., Воробьева А.М.* Этнографические центры в структуре городских образований ..... 84
- Дымченко М.Е., Наумов А.А.* Формообразование в архитектуре и строительстве. Анализ макетирования и 3-D моделирования: грани дискурса ..... 94

### ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

- Манжильевская С.Е.* Моделирование и прогнозирование концентрации PM<sub>2,5</sub> на строительной площадке с использованием искусственного интеллекта ..... 104

## CONTENTS

### BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES

- Georgiev SV, Mailyan DR, Solovyeva AI.** Determining the Most Efficient Method of Strengthening the Reinforced Concrete Columns under Different Loading Levels ..... 7
- Efimenko EA.** Optimisation of Supports' Position for a Reinforced Concrete Slab of Arbitrary Geometry ..... 15

### BASES AND FOUNDATIONS, SUBSURFACE STRUCTURES

- Prokopov AYU, Adoniev NA.** Foreign Experience Review on Engineering Protection of Seashores and Hillslopes ..... 27

### CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

- Paramonova ON, Yydina NV.** Construction Waste from Perspective of the Disperse Systems Stabilisation Theory . 48

### TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

- Kryukov KM, Zhang C.** Formation of a system of indicators for managing the cost of investment and construction projects of green medical buildings ..... 57

### CONSTRUCTION MECHANICS

- Chepurnenko AS, Kondratieva TN.** Determining the Rheological Parameters of Polymers Using Machine Learning Techniques ..... 71

### URBAN PLANNING, RURAL SETTLEMENTS PLANNING

- Potapova VG, Vorobyeva AM.** Urban Planning Principles in Design of the Ethnographic Centres ..... 84

### BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES

- Dymchenko ME, Naumov AA.** Form Making in Architecture and Construction. Analysis of Breadboarding and 3D Modeling: Facets of Discourse ..... 94

### TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

- Manzhilevskaya SE.** Modeling and Predicting PM2.5 Concentration at a Construction Site Using the Artificial Intelligence ..... 104

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 624.012.04-52

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-7-14>

### К определению наиболее эффективного способа усиления железобетонных колонн при разных уровнях нагружения

С.В. Георгиев , Д.Р. Маилян , А.И. Соловьёва 

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

✉ [sergey.georgiev@bk.ru](mailto:sergey.georgiev@bk.ru)



EDN: JBTAD

#### Аннотация

**Введение.** Выбор метода усиления железобетонных конструкций в основном зависит от стоимости и сроков проведения работ. В каждом конкретном случае решение принимается в зависимости от нагрузки, вида дефектов, особенностей эксплуатации и др. Помимо прямых затрат на обследование, выполнение проекта усиления, материалы, подъемно-транспортные услуги и, непосредственно, стоимости работ по усилению существует ряд дополнительных затрат, связанных с особенностями технологии выполнения работ. Из новых методов усиления можно отдельно выделить внешнее композитное армирование, основанное на использовании углеродных материалов. В отличие от ранее разработанных методов усиления, основанных на использовании железобетона и металла, композитные системы отличаются высокой мобильностью и не требуют дополнительных затрат. Целью настоящего исследования является определение наиболее рационального способа усиления для сжатых конструкций.

**Материалы и методы.** Авторами было рассмотрено усиление тремя методами сжатых железобетонных конструкций. В работе был сделан численный эксперимент, в котором выполнялось усиление железобетонной колонны при разных коэффициентах усиления от 1,1 до 2,0, то есть от 10 % до 100 % увеличения прочности. Расчеты стоимости усиления колонны выполнялись для трех способов усиления железобетонной, металлической и композитной обшивкой.

После выполнения 30-ти вариантов расчетов была построена таблица, в которой представлены все характеристики и объемы материалов. В заключительной стадии работы для каждого способа исследования был сделан расчет общей стоимости согласно прайсам фирм реализаторов.

**Результаты исследования.** Анализ железобетонного усиления показал, что при большинстве коэффициентов усиления имеет место минимальное конструктивное армирование. Металлическое усиление при больших уровнях нагрузки экономически нецелесообразно, так как необходимо использовать уголки большого сечения. Композитные системы внешнего армирования при всех коэффициентах повышения нагрузки являются очень материалоемкими. Учитывая высокую стоимость материалов, данный метод, в большинстве случаев, является самым экономически нецелесообразным.

**Обсуждение и заключение.** На основании полученных результатов выполнен анализ эффективности трех наиболее распространенных способов усиления железобетонных сжатых колонн. Разработаны предложения по рациональному проектированию систем усиления внецентренно сжатых железобетонных стоек, работающих с разными эксцентриситетами приложения нагрузки.

**Ключевые слова:** бетон, железобетон, сталь, углеродный пластик, композитная арматура, усиление, деформации, напряжение.

**Для цитирования:** Георгиев С.В., Маилян Д.Р., Соловьёва А.И. К определению наиболее эффективного способа усиления железобетонных колонн при разных уровнях нагружения. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(1):7–14. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-7-14>

## Determining the Most Efficient Method of Strengthening the Reinforced Concrete Columns under Different Loading Levels

Sergey V. Georgiev  , Dmitry R. Mailyan , Anastasia I. Solovyeva 

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

 [sergey.georgiev@bk.ru](mailto:sergey.georgiev@bk.ru)

### Abstract

**Introduction.** The method of strengthening the reinforced concrete structures is chosen depending mainly on the cost and timeframe of the performed work. In each specific case, the decision is made depending on the load, type of defects, operational features, etc. Apart from the direct costs of inspection, strengthening project design, materials, lifting and transport services and the cost of strengthening works proper, there is a number of additional costs related to the technological features of the work performed. Among the new methods of strengthening, the method of external strengthening with the composite carbon materials can be particularly emphasised. Compared to the previously developed methods of strengthening with the reinforced concrete and metal, the composite systems are easily transportable and do not incur additional costs. The aim of this study is to determine the method of strengthening most rational for the compressed structures.

**Materials and methods.** The authors have examined three methods of strengthening the compressed reinforced concrete structures. In the frame of the research a numerical experiment has been carried out, in which a reinforced concrete column was strengthened at different strengthening coefficients from 1.1 to 2.0, i.e., from 10 to 100% of strength increase. The estimations of the cost of strengthening the column by three methods of strengthening have been carried out: jacketing using the reinforced concrete, metal and composite materials. After carrying out thirty variants of calculation, a table presenting all specifications and quantities of the materials has been drawn up. At the final stage of the research, the total cost of each method under investigation has been estimated based on the prices of the selling companies.

**Results.** The analysis of strengthening with the reinforced concrete revealed that at most of the strengthening coefficients the achieved structural reinforcement is minimal. Under the high loading levels strengthening with the metal is not economically expedient, as it implies the use of the large-section angles. The composite material systems of external strengthening are very material-consuming at all load increasing coefficients. Taking into account the high cost of materials, this method is basically the least economically expedient.

**Discussion and conclusion.** Based on the results obtained, the efficiency of three most common methods of strengthening the reinforced concrete compressed columns was analysed. Proposals on the rational design of the strengthening systems for the eccentrically compressed reinforced concrete poles under the different eccentricities of load applied have been developed.

**Key words:** concrete, reinforced concrete, steel, carbon fiber, composite reinforcement, strengthening, deformation, stress

**For citation.** Georgiev SV, Mailyan DR, Solovyeva AI. Determining the Most Efficient Method of Strengthening the Reinforced Concrete Columns under Different Loading Levels. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(1):7–14. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-7-14>

**Введение.** Одной из тенденций развития современного общества является увеличение объемов строительства новых зданий и сооружений. Постоянно растущие потребности в инфраструктуре производственной промышленности требуют развития новых технологий возведения зданий с минимальными трудозатратами и временем производства работ. При необходимости реорганизации существующих объектов возникает выбор: снос объекта и строительство нового или реконструкция существующего. Зачастую работы по реконструкции сопровождаются усилением несущих конструкций зданий и сооружений. Особое внимание уделяется усилению железобетонных сжатых элементов, которые воспринимают все дополнительные нагрузки от вышележащих реконструируемых этажей. Существуют проблемы усиления, связанные со сложностью производства работ традиционными способами, основанными на использовании технологий железобетонных [1, 2] и металлических обойм [3, 4]. Следовательно, все разработки по изобретению новых способов усиления сжатых железобетонных колонн являются работами перспективными и актуальными [5–7]. Как известно, прочность железобетонных сжатых элементов на 80 % зависит от прочности бетона [8], который является материалом неоднородным. В условиях монолитного строительства большое количество факторов влияет на качество бетона [9–11], и допущение ошибок или несоблюдение технологии выполнения работ приводит к занижению класса бетона, что,

в свою очередь, приводит к необходимости выполнения усиления. Необходимость усиления железобетонных конструкций возникает не только при строительстве новых зданий, но и при разрушениях, причинами которых являются внешние факторы, такие как воздействие агрессивных сред, попеременное замораживание и оттаивание бетона, воздействие антропогенных факторов и др. [12, 13].

Еще во времена советского союза были разработаны эффективные методы усиления, такие как железобетонные и металлические обоймы. Эти методы являются актуальными и на сегодняшний день. Высокие прочностные свойства бетона на сжатие в совокупности с совместной работой арматуры, воспринимающей на себя все растягивающие напряжения, позволяют решать практически любую задачу по восстановлению или усилению железобетонных конструкций. Одним из важных факторов является обеспечение совместной работы существующей конструкции с системой усиления. Так как используется один и тот же материал (бетон и металл) системы усиления и существующей конструкции, то и линейное температурное расширение, и модуль упругости являются одинаковыми. При таких условиях усиленные конструкции ничуть не уступают новым по надежности и долговечности.

Однако, несмотря на весь перечень преимуществ железобетонных и металлических систем усиления, имеется ряд отрицательных свойств. В зависимости от условий производства работ, удаленности объектов усиления от инфраструктуры, производства работ на высоких этажах зданий и других условий данные методы усиления превращаются в очень дорогое мероприятие, а стоимость ремонтно-восстановительных работ возрастает настолько, что зачастую заказчики отказываются от усиления конструкций в сторону строительства новых.

В последние годы за рубежом большую популярность в области усиления железобетонных изгибаемых [14–16] и сжатых [17–19] конструкций приобрели композитные материалы. Исследования, проводимые в России, только подтверждают высокую эффективность композитных материалов при усилении центрально и внецентренно сжатых железобетонных стоек [20–22]. Их основное преимущество по сравнению с традиционными заключается в высокой мобильности и простоте выполнения работ по усилению [23–25]. При этом уменьшаются сроки производства работ, отсутствует необходимость останавливать производственные процессы в помещениях объекта усиления, сохраняется полезная площадь помещений и не увеличиваются нагрузки от элементов усиления на нижележащие конструкции и др. Однако высокая стоимость композитных материалов усиления по сравнению с железобетоном и металлом оставляет под вопросом конкурентоспособность композитного усиления.

Целью настоящего исследования является сравнение эффективности и стоимости усиления тремя разными методами при коэффициентах усиления колонны от 1,1 до 2,0. Данная работа является продолжением исследования [26], которая посвящена сравнению 3-х методов усиления железобетонной, металлической и композитной обоймы при одном коэффициенте увеличения нагрузки равном 1,5.

**Материалы и методы.** Для определения реальной стоимости и объемов материалов при усилении сжатых железобетонных колонн было принято решение рассчитать наиболее распространенную конструкцию

при 10 коэффициентах усиления для того, чтобы определить наиболее рациональный и экономически целесообразный способ. В работе [26] также были представлены примеры и методики расчетов трех способов усиления.

Для сравнения трех вариантов усиления железобетонной, металлической и композитной обоймой с точки зрения технико-экономических показателей была рассчитана реальная железобетонная колонна на разные коэффициенты усиления.

Сечение 40×40 см. Длина колонны 3 м. Класс бетона B25 ( $R_b = 14,5$  мПа). Класс продольной арматуры A500 ( $R_{sc} = 400$  мПа),  $a = 3$  см. Стержни продольной арматуры 4Ø28A500 ( $a_{(s, tot)} = 24,63$  см<sup>2</sup>).

Для получения данных по объемам материалов усиления были разработаны расчетные методики в программном комплексе ms excel, результаты расчетов приведены в таблице 1 при 10 коэффициентах. Для каждого усиления были подобраны необходимые по расчету материалы усиления.

Таблица 1

Экономическое сравнение трех способов усиления железобетонной, металлической и композитной облоймой

| №   | Метод усиления, материалы и стоимость | КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ $K_{ус}$   |                                 |                                 |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |  |
|-----|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|
|     |                                       | 1,1                             | 1,2                             | 1,3                             | 1,4                              | 1,5                              | 1,6                              | 1,7                              | 1,8                              | 1,9                              | 2,0                              |  |
| 1   | Железобетонная Обойма                 | 4Ø20A500<br>$d = 6 \text{ CM}$  | 4Ø20A500<br>$d = 6 \text{ CM}$  | 4Ø20A500<br>$d = 6 \text{ CM}$  | 4Ø20A500<br>$d = 6 \text{ CM}$   | 4Ø20A500<br>$d = 6 \text{ CM}$   | 4Ø20A500<br>$d = 6 \text{ CM}$   | 4Ø20A500<br>$d = 7 \text{ CM}$   | 4Ø20A500<br>$d = 8 \text{ CM}$   | 4Ø20A500<br>$d = 9 \text{ CM}$   | 4Ø20A500<br>$d = 9 \text{ CM}$   |  |
| 1.1 | Ø20A500, М. П./КТ                     | 12/30 546P                      | 12/30 546P                      | 12/30 546P                      | 12/30 546P                       | 12/30 546P                       | 12/30 546P                       | 12/30 546P                       | 12/30 546P                       | 12/30 546P                       | 12/30 546P                       |  |
| 1.2 | Ø6A240, М. П./КТ                      | 36/8 145,6P                     | 36/8 145,6P                     | 36/8 145,6P                     | 36/8 145,6P                      | 36/8 145,6P                      | 36/8 145,6P                      | 36/8 145,6P                      | 36/8 145,6P                      | 36/8 145,6P                      | 36/8 145,6P                      |  |
| 1.3 | Бетон, м³                             | 0,33 1386P                      | 0,33 1386P                      | 0,33 1386P                      | 0,33 1386P                       | 0,33 1386P                       | 0,33 1386P                       | 0,4 1680P                        | 0,46 1932P                       | 0,53 2226P                       | 0,53 2226P                       |  |
| 1.4 | Стоимость, руб.                       | 2800                            | 2800                            | 2800                            | 2800                             | 2800                             | 2800                             | 2372                             | 2623                             | 2920                             | 2920                             |  |
| 2   | Металлическая обойма                  | 4,50×4<br>-80×8                 | 4,75×6<br>-80×8                 | 4,90×7<br>-80×8                 | 4,100×7<br>-80×8                 | 4,125×8<br>-80×8                 | 4,140×9<br>-80×8                 | 4,140×10<br>-80×8                | 4,160×10<br>-80×8                | 4,180×10<br>-80×8                | 4,180×11<br>-80×8                |  |
| 2.1 | Уголок, L, М. П.                      | 12 1524                         | 12 4200                         | 12 5460                         | 12 6528                          | 12 8460                          | 12 8724                          | 12 11292                         | 12 12924                         | 12 16488                         | 12 19644                         |  |
| 2.2 | Полоса, – М. П.                       | 11 2838                         | 11 2838                         | 11 2838                         | 11 2838                          | 11 2838                          | 11 2838                          | 11 2838                          | 11 2838                          | 11 2838                          | 11 2838                          |  |
| 2.3 | Стоимость, руб.                       | 4362                            | 7038                            | 8298                            | 9366                             | 11298                            | 11562                            | 14130                            | 15762                            | 19326                            | 22482                            |  |
| 3   | Композитная обойма                    | 2 слоя<br>$T = 0,11 \text{ MM}$ | 2 слоя<br>$T = 0,27 \text{ MM}$ | 3 слоя<br>$T = 0,27 \text{ MM}$ | 5 слоев<br>$T = 0,27 \text{ MM}$ | 6 слоев<br>$T = 0,27 \text{ MM}$ | 5 слоев<br>$T = 0,48 \text{ MM}$ | 6 слоев<br>$T = 0,48 \text{ MM}$ | 7 слоев<br>$T = 0,48 \text{ MM}$ | 8 слоев<br>$T = 0,48 \text{ MM}$ | 9 слоев<br>$T = 0,48 \text{ MM}$ |  |
| 3.1 | Углеткань, м²                         | 10 31200                        | 10 46500                        | 15 69750                        | 15 69750                         | 30 139500                        | 25 210000                        | 30 252000                        | 35 294000                        | 40 336000                        | 45 378000                        |  |
| 3.2 | Клей, кг                              | 11,5 12650                      | 11,5 12650                      | 17,25 18975                     | 28,75 31625                      | 34,6 38060                       | 25 27500                         | 30 33000                         | 35 38500                         | 40 44000                         | 45 49500                         |  |
| 3.3 | Стоимость, руб.                       | 43850                           | 59150                           | 88725                           | 101375                           | 177560                           | 237500                           | 285000                           | 332500                           | 380000                           | 427500                           |  |

Примечания:

- 1. В строке № 1, 2 и 3 приведены результаты расчетов.
- 2. В строке № 1 при всех коэффициентах усиления принималась одинаковая дополнительная арматура, составляющая примерно 1–1,5 % от площади набетонки. Под величиной  $d$  понимается толщина набетонки.
- 3. В строке № 2, в качестве соединительных планок принимались полосы с размерами поперечного сечения 80×8 мм. При всех коэффициентах усиления использовалось по 4 уголка, поперечное сечение которых определялось по расчету.
- 4. В строке № 3 результатом расчета стало количество слоев облоймы и толщина материалов углеткани,  $t$ .
- 5. В строках 1.1–1.3, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2 приведены результаты расчета объема и стоимости материалов, соответствующих методов усиления в рублях рф. Цены принимались согласно прайс-листам фирм, реализующих строительные материалы.

**Результаты исследования.** Для метода усиления железобетонной обоймой при коэффициентах от 1,1 до 1,6 принималась минимальная допустимая набетонка и конструктивное нормирование. При более высоких коэффициентах усиления толщина набетонки увеличилась от 6 до 9 см, что связано с высокой эффективностью бетона, работающего на сжатие. Стоимость материалов на усиление одной колонны была в пределах 2 800–2 920 руб.

При усилении металлической обоймой были подобраны разные варианты для каждого коэффициента усиления. Стоит отметить, что перерасход материала не превышал 10 %. Однако с технической точки зрения при коэффициентах усиления 1,8–2,0 используются уголки с шириной планки 160–180 мм. Учитывая, что каждый уголок имеет длину 3 м, его вес превышает 50 кг. Эти факторы стоит учитывать при определении стоимости работ по усилению, а также доставке материалов на объект. Стоимость материалов для усиления одной колонны, согласно ценам, выставленным на сайте фирмы «металлтранс терминал», составляет от 4 362 до 22 482 руб. Это позволяет сделать вывод, что при малых уровнях нагрузки усиление металлом может быть более эффективно по сравнению с усилением железобетонной обоймой. Вместе с тем при высоких коэффициентах усиления целесообразно использовать железобетонную обойму.

Согласно результатам расчета, при применении метода усиления композитной обоймой стоимость материалов для усиления одной колонны варьируется от 43 850 до 427 500 руб. Стоимость материалов принималась согласно данным, полученным из прайс-листа фирмы «гидрозо». Данный метод усиления является существенно дороже аналогов и при больших коэффициентах усиления колонн является нецелесообразным. Согласно результатам расчетов было установлено, что при высоких коэффициентах усиления требуется использовать большое количество материалов углеткани.

**Обсуждение и заключение.** В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- железобетонную обойму следует применять при больших коэффициентах усиления, если позволяет обстановка и условия проведения ремонтных работ на объекте;
- металлическую обойму рекомендуется применять только при малых коэффициентах усиления;
- композитное усиление следует использовать только при отсутствии альтернативного метода. Учитывая высокую стоимость углеткани и сильное занижение реальной эффективности композитного усиления при условии использования нормативного расчетного аппарата, этот метод в ряде случаев является неконкурентоспособным по сравнению с приведенными выше способами усиления.

#### Список литературы

1. Курбанов З.А., Грушевский К.Е. Усиление сборной железобетонной колоны методом железобетонной обоймы. В: *Труды международной научно-практической конференции «Инновационное развитие: потенциал науки и современного образования»*. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.); 2018. Р. 169–171.
2. Хаютин Ю.Г., Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З. Ремонт и усиление железобетонных конструкций в зданиях из монолитного железобетона. В кн.: *Проектирование и строительство монолитных многоэтажных жилых и общественных зданий, мостов и тоннелей*. 2004. С. 195–197.
3. Данилов С.В., Фомичева Л.М. Усиление железобетонных колонн стальными обоймами. В: *Труды международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии»*. Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет»; 2017. С. 240–241. URL: <http://e.biblio.bru.by/handle/12121212/4836> (дата обращения 30.01.2024).
4. Кучеренко В.И. Проектирование усиления внецентренно-сжатых железобетонных элементов (колонн, опор, стоек). *Аллея науки*. 2021;2(53):141–143. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46112907> (дата обращения 29.01.2024).
5. Жемчуев А.О. Новые технологии применения жидкого стекла при усилении сжатых железобетонных конструкций. *Национальная Ассоциация Ученых*. 2015;2(7):111–112. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novye-tehnologii-primeneniya-zhidkogo-stekla-pri-usilenii-szhatyh-zhelezobetonnyh-konstruktsiy> (дата обращения 30.01.2024).
6. Георгиев С.В., Маилян Д.Р., Соловьева А.И. Способ усиления железобетонной колонны прямоугольного или квадратного сечения композитными материалами. Патент РФ 2775852 С1. 2022.
7. Георгиев С.В., Маилян Д.Р., Соловьева А.И. Способ усиления железобетонной колонны прямоугольного или квадратного сечения. Патент РФ 2773490 С1. 2022.
8. Семенов Д.А. Эволюция нормативного подхода к расчету железобетонных элементов. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2017;5:43–50. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-normativnogo-podhoda-k-raschetu-zhelezobetonnyh-elementov> (дата обращения 30.01.2024).
9. Гарибов Р.Б. *Сопротивление железобетонных несущих конструкций при агрессивных воздействиях окружающей среды*. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Саратов: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства; 2008.
10. Иванов Ю.В. *Реконструкция зданий и сооружений: усиление, восстановление, ремонт*. Ассоциация строительных вузов; 2012. 312 с.

11. Долломанюк Р.Ю. Оценка состояния железобетонных конструкций для регрессивной зависимости коррозионных повреждений стальной арматуры от толщины защитного слоя бетона в условиях открытой атмосферы. В: *Сборник материалов III Национальной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство»*. Омск: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»; 2020. С. 524–528. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43970085> (дата обращения 30.01.2024).
12. Дорофеев И.А., Федотова М.И. История развития методов расчета железобетонных конструкций. В: *Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 4 частях «Наука и образование в XXI веке: теория, практика, инновации»*. Люберцы: ООО АР-Консалт; 2014. С. 93–95.
13. Корсаков Н.В. Анализ повреждений и видов усиления сжатых железобетонных конструкций. В кн.: *Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета. Тезисы докладов*. Волгоград: ВГТУ; 2021. С. 468–469.
14. Hutchinson A.R., Rahimi H. Flexural Strengthening of Concrete Beams with Externally Bonded FRP Reinforcement. In: *Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Advanced Compos. Mat. in Bridges and Struct. (ACMBS)*. Montreal; 1996. P. 519–526.
15. Hussain M., Sharif A., Basunbul I.A., Baluch M.H., AL Sulaimani G.J. Flexural Behavior of Precracked Reinforced Concrete Beams Strengthened Externally by FRP Plates. *ACI Struct J*. 1995;92(1):14–22.
16. Khalifa A., Belarbi A., Nanni A. Shear Performance of RC Members Strengthened with Externally Bonded FRP Wrap. In: *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, New Zealand; 2000. Pp. 305–315.
17. Mander JB, Priestly MJN, Park R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *ASCE Journal of Structural Engineering*. 1988;114(8):1804–1826.
18. Matthys S. *Structural Behavior and Design of Concrete Members Strengthened with Externally Bonded FRP Reinforcement*. Gent University; 2000. 367 p. URL: [https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/000/518/841/RUG01-000518841\\_2010\\_0001\\_AC.pdf](https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/000/518/841/RUG01-000518841_2010_0001_AC.pdf) (дата обращения 30.01.2024).
19. Pan J.L., Xu T., Hu Z.J. Experimental Investigation of Load Carrying Capacity of the Slender Reinforced Concrete Columns Wrapped with FRP. *Construction and Building Materials*. 2007;21(11):1991–1996. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.05>
20. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. Прочность и деформативность гибких усиленных стоек при больших эксцентриситетах. *Научное обозрение*. 2014;12(2):496–499. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prochnost-i-deformativnost-korotkih-usilennyh-stoek-pri-malyh-ekstsentrissetah> (дата обращения 30.01.2024).
21. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. О влиянии гибкости стоек на эффективность композитного усиления. *Инженерный вестник Дона*. 2015;4. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3374> (дата обращения 30.01.2024).
22. Маяцкая И.А., Польской П.П., Георгиев С.В., Федченко А.Е. Применение углепластиковых ламелей при усилении строительных конструкций. *Строительство и техногенная безопасность*. 2018;12(64):33–38.
23. Георгиев С.В., Меретуков З.А., Соловьёва А.И. Исследование сжатых и изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами по новой методике. *Инженерный вестник Дона*. 2022;2. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7469> (дата обращения 30.01.2024).
24. Георгиев С.В., Соловьёва А.И., Меретуков З.А. Сравнение методик усиления внешним армированием композитных материалов. *Инженерный вестник Дона*. 2021;10. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7221> (дата обращения 30.01.2024).
25. Георгиев С.В., Соловьёва А.И., Меретуков З.А. Сравнение методов усиления железобетонных стоек с точки зрения экономической эффективности. *Инженерный вестник Дона*. 2022;2. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7485> (дата обращения 30.01.2024).
26. Георгиев С.В., Меретуков З.А., Соловьёва А.И. К определению прочности бетона, обжатого композитными материалами, расположенными в поперечном направлении. *Инженерный вестник Дона*. 2021;10. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7225> (дата обращения 30.01.2024).

## References

1. Kurbanov ZA, Hrushevsky KE. Strengthening of Precast Reinforced Concrete Columns by the Method of Concrete Collars. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Innovative Development: the Potential of Science and Modern Education”*. Penza: Nauka i Prosveshchenie (Sole Entrepreneur Gulyaev GYu); 2018. P. 169–171. (In Russ.).
2. Khayutin YuG, Chernyavsky VL, Axelrod EZ. Repair and Strengthening the Reinforced Concrete Structures in Buildings Made of Monolithic Reinforced Concrete. In book: *Design and Construction of Monolithic Multi-Storey Residential and Public Buildings, Bridges and Tunnels*. 2004. P. 195–197. (In Russ.).
3. Danilov SV, Fomicheva LM. Strengthening the Reinforced Concrete Columns by Steel Collars. In: *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Materials, Equipment and Resource-Saving Technologies”*. Mogilev: Transnational Educational Institution of Higher Education “Belarus-Russian University”; 2017. P. 240–241. URL: <http://e.biblio.bru.by/handle/12121212/4836> (accessed 30.01.2024). (In Russ.).

4. Kucherenko VI. Design of Strengthening the Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Elements (Columns, Supports, Poles). *Alleya nauki*. 2021;2(53):141–143. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46112907> (accessed 29.01.2024). (In Russ.).
5. Zhemchuev AO. New Technology Application in Water Glass in Strengthening Compression Reinforced Concrete Construction. *National Association of Scientists*. 2015;2(7):111–112. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novye-tehnologii-primeneniya-zhidkogo-stekla-pri-usilenii-szhatyh-zhelezobetonnyh-konstruktsiy> (accessed 30.01.2024). (In Russ.).
6. Georgiev SV, Mailyan DR, Solovyeva AI. A Method of Strengthening a Reinforced Concrete Column of Rectangular or Square Section with Composite Materials. RF Patent 2775852 C1. 2022. (In Russ.).
7. Georgiev SV, Mailyan DR, Solovyeva AI. A Method of Strengthening a Reinforced Concrete Column of Rectangular or Square Section. RF Patent 2773490 C1. 2022. (In Russ.).
8. Semenov DA. Evolution of the Normative Approach to the Calculation of Reinforced Concrete Elements. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2017;5:43–50. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-normativnogo-podhoda-k-raschetu-zhelezobetonnyh-elementov> (accessed 30.01.2024). (In Russ.).
9. Garibov RB. *Resistance of Reinforced Concrete Load-Bearing Structures under Aggressive Environmental Influences*. Dr.Sci. (Engineering) Dissertation. Saratov: Penza State University of Architecture and Construction; 2008.
10. Ivanov YuV. *Reconstruction of Buildings and Structures: Reinforcement, Restoration, Repair*. Assotsiatsiya stroitel'nykh vuzov; 2012. 312 p. (In Russ.).
11. Dolomanyuk RYu. Condition Assessment of Reinforced Concrete Structures for a Regression Based on the Corrosive Damage of Steel Reinforcement from the Thickness of the Protective Concrete Layer in the Open Atmosphere. In: *Proceedings of the III National Scientific and Practical Conference "Education. Transport. Innovation. Construction"*. Omsk: Siberian State Automobile and Road Engineering University (SibADI); 2020. P. 524–528. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43970085> (accessed 30.01.2024). (In Russ.).
12. Dorofeev IA, Fedotova MI. The History of the Development of Methods for Calculating Reinforced Concrete Structures. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: in 4 Parts "Science and Education in the XXI Century: Theory, Practice, Innovation"*. Lyubertsy: AR-Konsalt LLC; 2014. P. 93–95. (In Russ.).
13. Korsakov NV. Analysis of Damage and Types of Strengthening the Compressed Reinforced Concrete Structures. In book: *Competition of Scientific Research Papers of Volgograd State Technical University Students. Abstracts of Papers*. Volgograd: VSTU; 2021. P. 468–469. (In Russ.).
14. Hutchinson AR, Rahimi H. Flexural Strengthening of Concrete Beams with Externally Bonded FRP Reinforcement. In: *Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Advanced Compos. Mat. in Bridges and Struct. (ACMBS)*. Montreal; 1996. P. 519–526.
15. Hussain M, Sharif A, Basunbul IA, Baluch MH, AL Sulaimani GJ. Flexural Behavior of Precracked Reinforced Concrete Beams Strengthened Externally by FRP Plates. *ACI Struct J*. 1995;92(1):14–22.
16. Khalifa A, Belarbi A, Nanni A. Shear Performance of RC Members Strengthened with Externally Bonded FRP Wrap. In: *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, New Zealand; 2000. P. 305–315.
17. Mander JB, Priestly MJN, Park R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *ASCE Journal of Structural Engineering*. 1988;114(8):1804–1826.
18. Matthys S. *Structural Behaviour and Design of Concrete Members Strengthened with Externally Bonded FRP Reinforcement*. Gent University; 2000. 367 p. URL: [https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/000/518/841/RUG01-000518841\\_2010\\_0001\\_AC.pdf](https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/000/518/841/RUG01-000518841_2010_0001_AC.pdf) (accessed: 30.01.2024).
19. Pan JL, Xu T, Hu ZJ. Experimental Investigation of Load Carrying Capacity of the Slender Reinforced Concrete Columns Wrapped with FRP. *Construction and Building Materials*. 2007;21(11):1991–1996. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.050>
20. Polskoy PP, Mailyan DR, Georgiev SV. Durability and Deformability of Flexible Reinforced Stands under Large Eccentricities. *Nauchnoe obozrenie*. 2014;12(2):496–499. (In Russ.).
21. Polskoy PP, Mailyan DR, Georgiev SV. The Impact of Flexibility of Columns on the Effectiveness of Composite Strengthening. *Engineering Journal of Don*. 2015;4:81. URL: <https://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2015/3374> (accessed 30.01.2024). (In Russ.).
22. Mayatskaya IA, Polskoy PP, Georgiev SV, Fedchenko AE. Application of Carbon Plastic Lamellas with the Strengthening of Civil Structures. *Construction and Industrial Safety*. 2018;12(64):33–38. (In Russ.).
23. Georgiev SV, Meretukov ZA, Solovyeva AI. Study of Compressed and Flexural Reinforced Concrete Elements Reinforced with Composite Materials Using a New Method. *Engineering Journal of Don*. 2022;2:320–329. URL: <https://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2022/7469> (accessed 30.01.2024). (In Russ.).
24. Georgiev SV, Solovyeva AI, Meretukov ZA. Comparison of Methods of Reinforcement with External Reinforcement of Composite Materials. *Engineering Journal of Don*. 2021;10. URL: <https://ivdon.ru/magazine/archive/n10y2021/7221> (accessed 30.01.2024). (In Russ.).
25. Georgiev SV, Solovyeva AI, Meretukov ZA. Comparison of Methods for Strengthening Reinforced Concrete Pillars in Terms of Economic Efficiency. *Engineering Journal of Don*. 2022;2. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2022/7485> (accessed 30.01.2024). (In Russ.).
26. Georgiev SV, Meretukov ZA, Solovyeva AI. Determination of the Strength of Concrete Compressed with Composite Materials Located in the Transverse Direction. *Engineering Journal of Don*. 2021;10. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n10y2021/7225> (accessed 30.01.2024). (In Russ.).

*Об авторах:*

**Сергей Валерьевич Георгиев**, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, [ORCID](#), [sergey.georgiev@bk.ru](mailto:sergey.georgiev@bk.ru)

**Дмитрий Рафаэлович Маилян**, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, [ORCID](#), [dmailyan868@mail.ru](mailto:dmailyan868@mail.ru)

**Анастасия Ивановна Соловьёва**, ассистент кафедры железобетонных и каменных конструкций Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), магистр, [ORCID](#), [98rosignol@mail.ru](mailto:98rosignol@mail.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

С.В. Георгиев — анализ результатов исследований, проведение расчетов, формирование выводов.

Д.Р. Маилян — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, корректировка выводов.

А.И. Соловьёва — выполнение расчетов, подготовка текста.

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

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Поступила в редакцию** 26.02.2024

**Поступила после рецензирования** 06.03.2024

**Принята к публикации** 09.03.2024

*About the Authors:*

**Sergey V. Georgiev**, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ORCID](#), [sergey.georgiev@bk.ru](mailto:sergey.georgiev@bk.ru)

**Dmitry R. Mailyan**, Dr.Sci. (Engineering), Professor of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Professor, [ORCID](#), [dmailyan868@mail.ru](mailto:dmailyan868@mail.ru)

**Anastasia I. Solovyeva**, Assistant of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ORCID](#), [98rosignol@mail.ru](mailto:98rosignol@mail.ru)

*Claimed contributorship:*

SV Georgiev: analysis of the research results, calculations, formulating the conclusions.

DR Mailyan: formulating the main concept, aim and objectives of the research, scientific supervision, correcting the conclusions.

AI Solovyeva: calculations, text preparation.

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

*All authors have read and approved the final manuscript.*

**Received** 26.02.2024

**Revised** 06.03.2024

**Accepted** 09.03.2024

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 624.012704-52

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-15-26>

### Оптимизация положения опор под железобетонной плитой произвольной конфигурации

Е.А. Ефименко

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

[ovekaterina90@yandex.ru](mailto:ovekaterina90@yandex.ru)

EDN: XWYIHN

#### Аннотация

**Введение.** Ряд исследований в области рационального проектирования зданий и сооружений различного назначения, выполненных в последние годы, посвящены вопросам рационального расположения вертикальных элементов — колонн или опор. При этом большинство современных исследований и публикаций посвящены именно вопросам рационального расположения опор применительно к повышению эффективности балок. Что же касается исследований поведения железобетонных плит при вариативном расположении опор под ними, то данный вопрос в современных исследованиях освещен весьма скудно. Целью нынешнего исследования является именно выявление поведения плитных железобетонных конструкций здания в условиях вариативного расположения основных опор.

**Материалы и методы.** В данном численном эксперименте исследована железобетонная плита произвольной конфигурации с заданными толщиной  $h$ , классом бетона с его характеристиками, а также классом арматуры и, соответственно, характеристиками арматуры. Помимо этого, решено задаться расстояниями от центров тяжести арматуры верхнего и нижнего ряда до поверхности плиты снизу и сверху  $a_x, a'_x, a_y, a'_y$ . Для плиты задано  $n$  количество колонн. При этом количество колонн считается известным, а вот их положение может меняться. Кроме того, среди общего количества колонн могут быть выделены некоторые, расположение которых может быть определенным (неизменяемым), в то время как остальные опоры могут менять положение в поле плиты. При этом перед исследователями стоит задача определения именно рационального расположения смещаемых колонн.

**Результаты исследования.** В данной работе приведены результаты численного эксперимента по выявлению наиболее оптимального (рационального) расположения железобетонных колонн под плитой произвольной конфигурации. В работе на основе сразу нескольких критериев, таких как прогиб, потенциальная энергия деформации и расход арматурных изделий, сделан анализ рационального расположения опор под плитой и приведены функциональные зависимости изменения приведенных ранее параметров.

**Обсуждение и заключения.** На основе собранных результатов численного эксперимента выполнен анализ поведения железобетонных плит заданной толщины при варьировании расположения опор под данной плитой, а также проанализированы и собраны в функциональные зависимости изменения параметров работы плиты.

**Ключевые слова:** бетон, железобетон, опора, колонна, плита, арматура, прогиб, потенциальная энергия деформации, расход арматуры, рационализация

**Для цитирования.** Ефименко Е.А. Оптимизация положения опор под железобетонной плитой произвольной конфигурации. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(1):15–26. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-15-26>

## Optimisation of Supports' Position for a Reinforced Concrete Slab of Arbitrary Geometry

Ekaterina A. Efimenko  

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

 [ovekaterina90@yandex.ru](mailto:ovekaterina90@yandex.ru)

### Abstract

**Introduction.** A number of research held in recent years on rational design of buildings and structures built for different purposes study the rational position of the vertical members — columns or supports. However, the majority of up-to-date research and publications focus on elucidating the rational position of the supports in the context of improving the efficiency of the beams. Whereas the behaviour of the reinforced concrete slabs affected by changing the position of the supports is not covered well enough in the modern research. The present study is targeted exactly at revealing the behaviour of the reinforced concrete slab structures of a building in case of varying position of the main supports.

**Materials and methods.** During the present numerical experiment, a reinforced concrete slab of arbitrary geometry with the given thickness  $h$ , the concrete grade with the respective properties and the reinforcement possessing the properties according to its class, has been investigated. Additionally, it was decided to set the distance magnitudes from the centers of gravity of the upper and lower row of reinforcement to the bottom and top surface of the slab  $a_x$ ,  $a'_x$ ,  $a_y$ ,  $a'_y$ . The number of columns  $n$  was set for the slab. It was considered that the number of columns was known, but their position could change. Moreover, among the total number of columns, there were distinguished the certain ones having the definite (constant) position, whereas the remaining supports could change their position within the slab area. Bearing in mind the above, the researchers were to solve the problem of rational position of the moveable columns.

**Results.** This paper presents the results of the numerical experiment on identifying the most optimal (rational) position of the reinforced concrete columns supporting a slab of the arbitrary geometry. Based on the several parameters at once, such as deflection, potential strain energy and consumption of the reinforcement products, the analysis of the rational position of the supports under the slab was made and functional dependences on changing the above mentioned parameters have been presented in the work.

**Discussion and conclusion.** Based on the results obtained in the numerical experiment, the analysis of the behaviour of the reinforced concrete slabs of a set thickness upon changing the position of the supports under the slab was made and the changes of the slab operational parameters were analysed and compiled into the functional dependences.

**Keywords:** concrete, reinforced concrete, support, column, slab, reinforcement, deflection, potential strain energy, consumption of the reinforcement, rationalisation

**For citation.** Efimenko EA. Optimisation of Supports' Position for a Reinforced Concrete Slab of Arbitrary Geometry. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(1):15–26. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-15-26>

**Введение.** В своем научном исследовании 2015 года Т.П. Романова [1] взяла за основу рассмотрение овальной пластины, состоящей из трех слоев покрывающего анизотропного материала, на которую действовала равномерно распределенная нагрузка по поверхности. В данном исследовании оптимизацию было предложено выполнить исходя из вариативного расположения опорного контура. Так было выявлено положение опор, при котором максимальная нагрузка достигала своего предельного значения. В ходе исследования выяснилось, что изменение армирования пластины влечет за собой значительные изменения предельной нагрузки на рассматриваемый элемент. Схожие численные эксперименты были проведены этим же автором в работе [2].

Иностранные авторы К.М. Won и Y.S. Park [3, 4, 5], а также D. Wang [6] в ходе своих численных экспериментов решали задачу поиска оптимального расположения опор под балкой, при котором конструкция покрытия имела бы максимальную или минимальную величину собственных колебаний. Частично в работах [7, 8] также рассмотрена задача уменьшения прогиба и изгибающего момента конструкции железобетонной балки покрытия. Научная статья С.М. Wang [9] также частично посвящена ранее поднятым проблемам оптимизации положения точечных опор и зависимости частоты собственных колебаний конструкции покрытия.

Кроме ранее приведенных авторов, много исследований в области оптимизации были проведены J.H. Son и B.M. Kwak [10], B.P. Wang и J.L. Chen [11].

Основной целью данного научного исследования является изучение работы железобетонной конструкции покрытия, в данном случае — многослойной плиты с целью выявления оптимального расположения точечных опор под данной плитой при наличии некоторых неизменяемых показателей.

Для осуществление поставленной цели научного исследования были решены следующие задачи:

- начата разработка методики выявления оптимального места расположения опор под трехслойной железобетонной плитой заданной конфигурации при использовании стохастических методов расчета;
- составлен примерный метод расчета, направленный на выявление оптимального шага колонн под плитой при использовании детерминистических методов расчета;
- проведено исследование влияния толщины конструкции покрытия, класса бетона и арматуры на положение точечных колонн, которое будет оптимальным для работы конструкции.

**Материалы и методы.** При определении оптимального расположения точечных опор под плитой в ходе данного численного эксперимента было решено использовать методы Монте-Карло и конечных элементов (МКЭ). С учетом МКЭ плита заданной конфигурации разбивается на определенное число конечных элементов, выявляется положение стационарных опор, а уже далее варьируемые колонны перемещаются в поисках их оптимального положения.

Помимо ранее сказанного важно проверять нумерацию узлов, в которых установлены стационарные опоры для исключения вероятности установки в данных узлах также варьируемых колонн.

Поскольку расчет выполняется неограниченное количество раз, то количество вариантов расположения варьируемых колонн зависит от расположения элементов конечно-элементной сетки и резко возрастает от уменьшения размеров элементов этой сетки.

При выполнении большого количества расчетов был использован следующий алгоритм, представленный в виде блок-схемы (рис. 1).

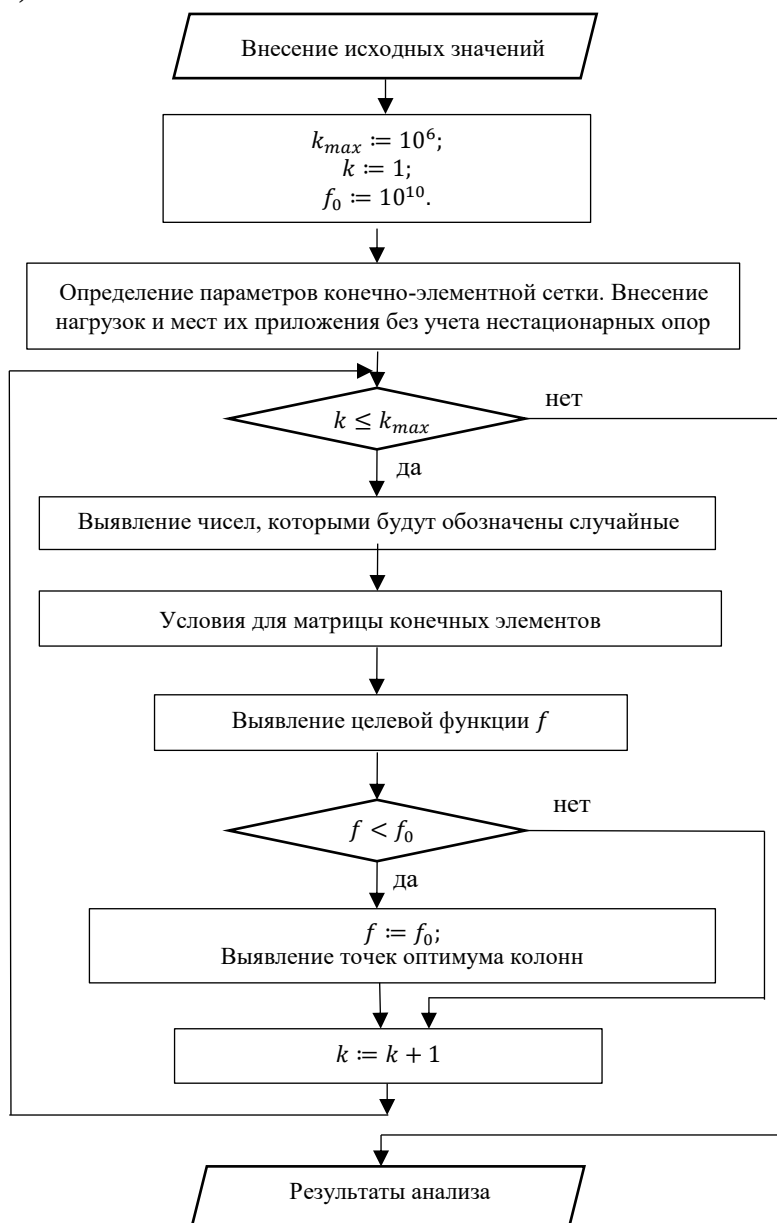


Рис. 1. Блок-схема алгоритма

Согласно СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» расчет на прочность плоских элементов выполняется из условий:

$$\begin{aligned} (M_{x,ult} - M_x)(M_{y,ult} - M_y) - M_{xy}^2 &\geq 0; \\ M_{x,ult} &\geq M_x; \\ M_{y,ult} &\geq M_y; \\ M_{xy,ult} &\geq M_{xy}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $M_x, M_y$  — изгибающие моменты;  $M_{xy} = H$  — крутящий момент;  $M_{x,ult}, M_{y,ult}, M_{xy,ult}$  — предельные моменты.

Крутящие моменты по бетону  $M_{bxy,ult}$  и по растянутой продольной арматуре  $M_{sxy,ult}$  рассчитаны по формулам:

$$\begin{aligned} M_{bxy,ult} &= 0,1R_b b^2 h, \\ M_{sxy,ult} &= 0,5R_s (A_{sx} + A_{sy}) h_0, \end{aligned} \quad (2)$$

Дальнейший расчет рабочей арматуры по осям  $x$  и  $y$  ведется на величины изгибающих моментов  $M_{x,расч}$  и  $M_{y,расч}$  по ранее предложенному алгоритму.

Подобранная таким образом арматура будет удовлетворять условиям:

$$\begin{aligned} M_x + M_{xy} &\leq M_{x,ult}; \\ M_y + M_{xy} &\leq M_{y,ult}. \end{aligned} \quad (3)$$

Расход арматуры в тоннах определяется для плиты по формуле:

$$m_s = \rho \sum_{i=1}^k (A_{sx,i} + A_{sy,i} + A'_{sx,i} + A'_{sy,i}) A_i, \quad (4)$$

где  $\rho = 7,8 \text{ т/м}^3$  — плотность стали;  $A_i$  — площадь  $i$ -го КЭ;  $A_{sx,i}$  и  $A_{sy,i}$  — подобранные площади поперечного сечения растянутой арматуры в ( $\text{м}^2$ ) на 1 п. м.;  $A'_{sx,i}$  и  $A'_{sy,i}$  — то же для сжатой арматуры.

Чтобы адаптировать ранее предложенный алгоритм расчета, были введены задачи по плите квадратной конфигурации с тремя точечными опорами. Плита шириной и высотой 10 метров, толщина 20 см, бетон класса В30 ( $E_b = 3,25 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ ,  $R_b = 17 \text{ МПа}$ ,  $\nu = 0,2$ ), арматура класса А400 ( $R_s = R_{sc} = 350 \text{ МПа}$ ), распределенная сила  $q = 20 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$ , расстояния  $a_x = a'_x = a_y = a'_y = 3 \text{ см}$ . Расчет проводился на программном комплексе ЛИРА-САПР 2013. Расчетная схема показана на рис. 2.

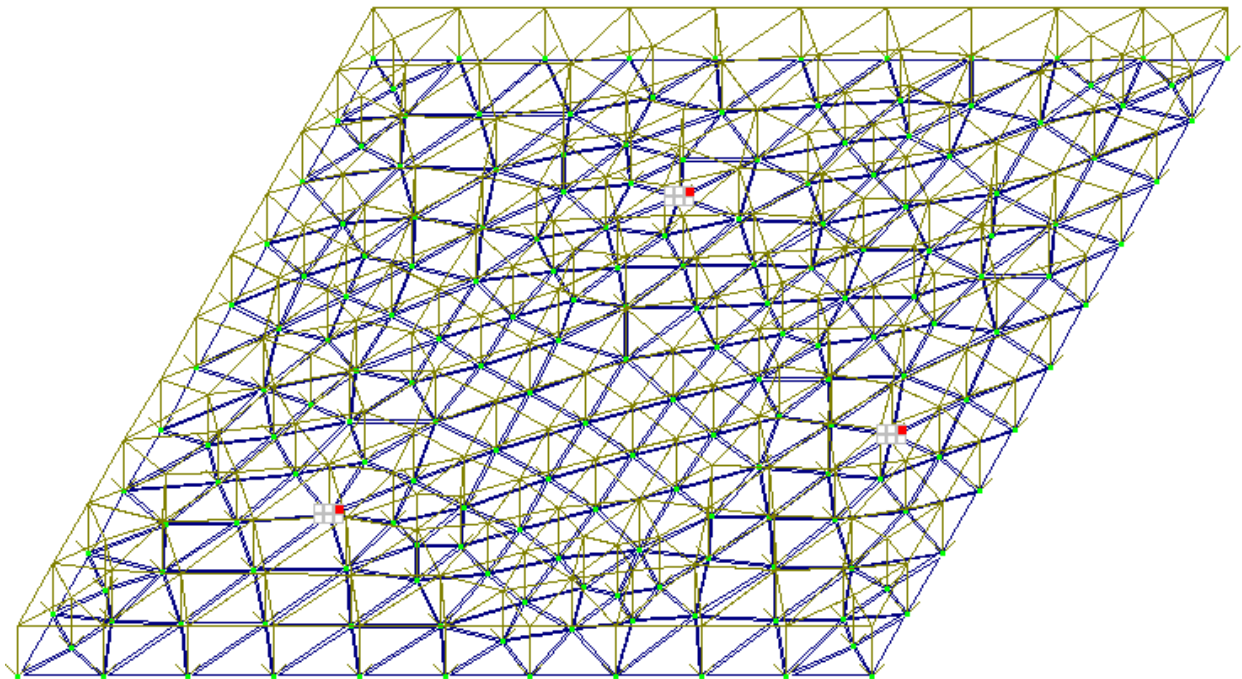


Рис. 2. Расчетная схема в ПК ЛИРА-САПР

На рис. 3 и рис. 4 показаны изополя перемещений, решенные в комплексах пакета Matlab и в ПК ЛИРА.

На рис. 5–10 представлены мозаики внутренних усилий, полученные в Matlab и в ПК ЛИРА.

Значимое отличие в максимальных величинах внутренних усилий можно объяснить тем, что колонны рассмотрены в данном случае как точечные. Одновременно видна разительная схожесть результатов, полученных для элементов, находящихся в середине плиты.

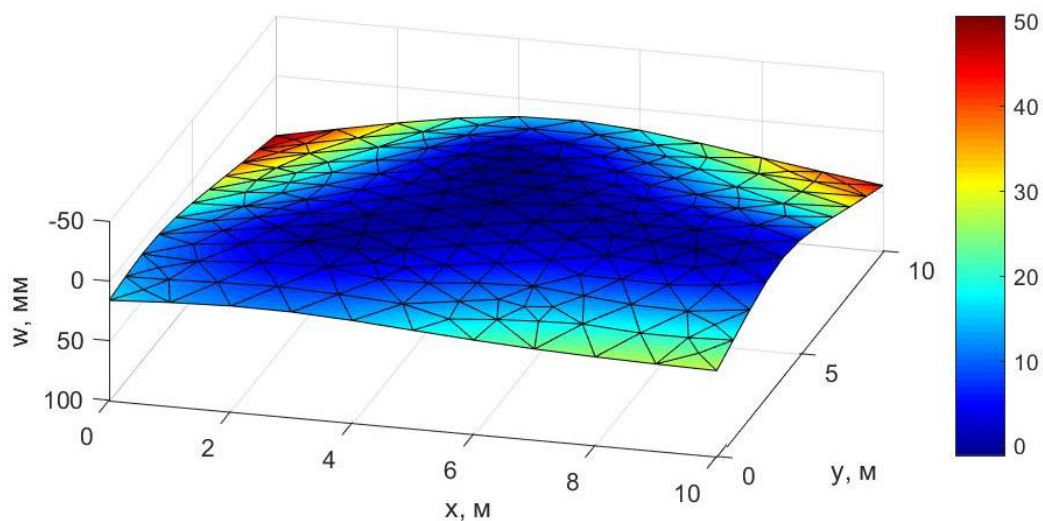


Рис. 3. Изополя вертикальных перемещений, полученные в ПК Matlab

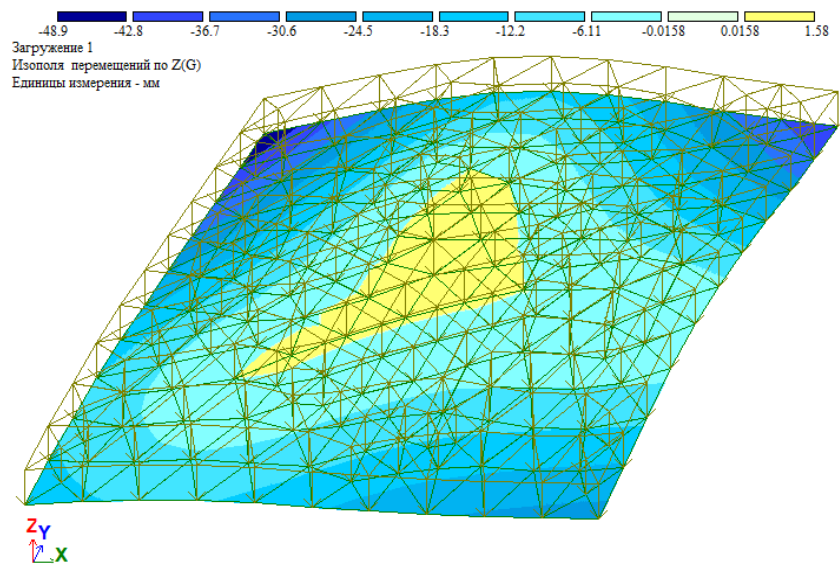


Рис. 4. Изополя вертикальных перемещений, полученные в ПК ЛИРА

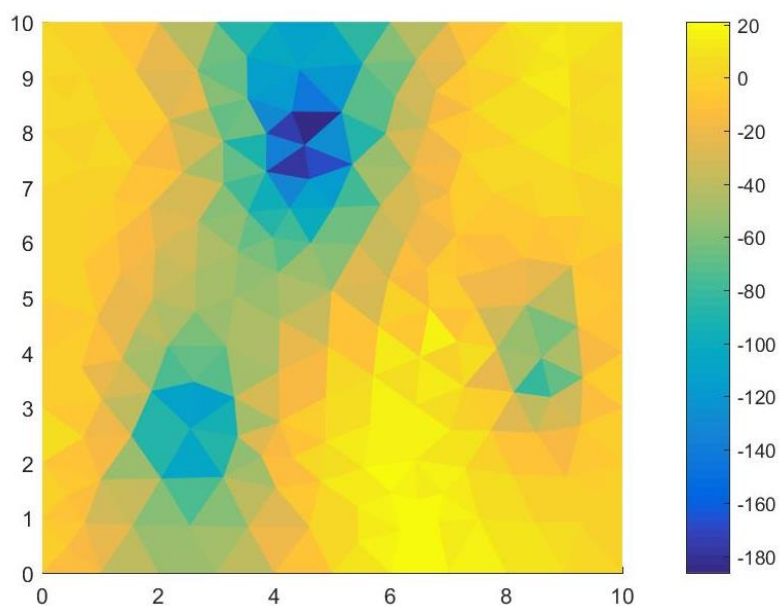


Рис. 5. Мозаика изгибающих моментов  $M_x$  в ПК Matlab

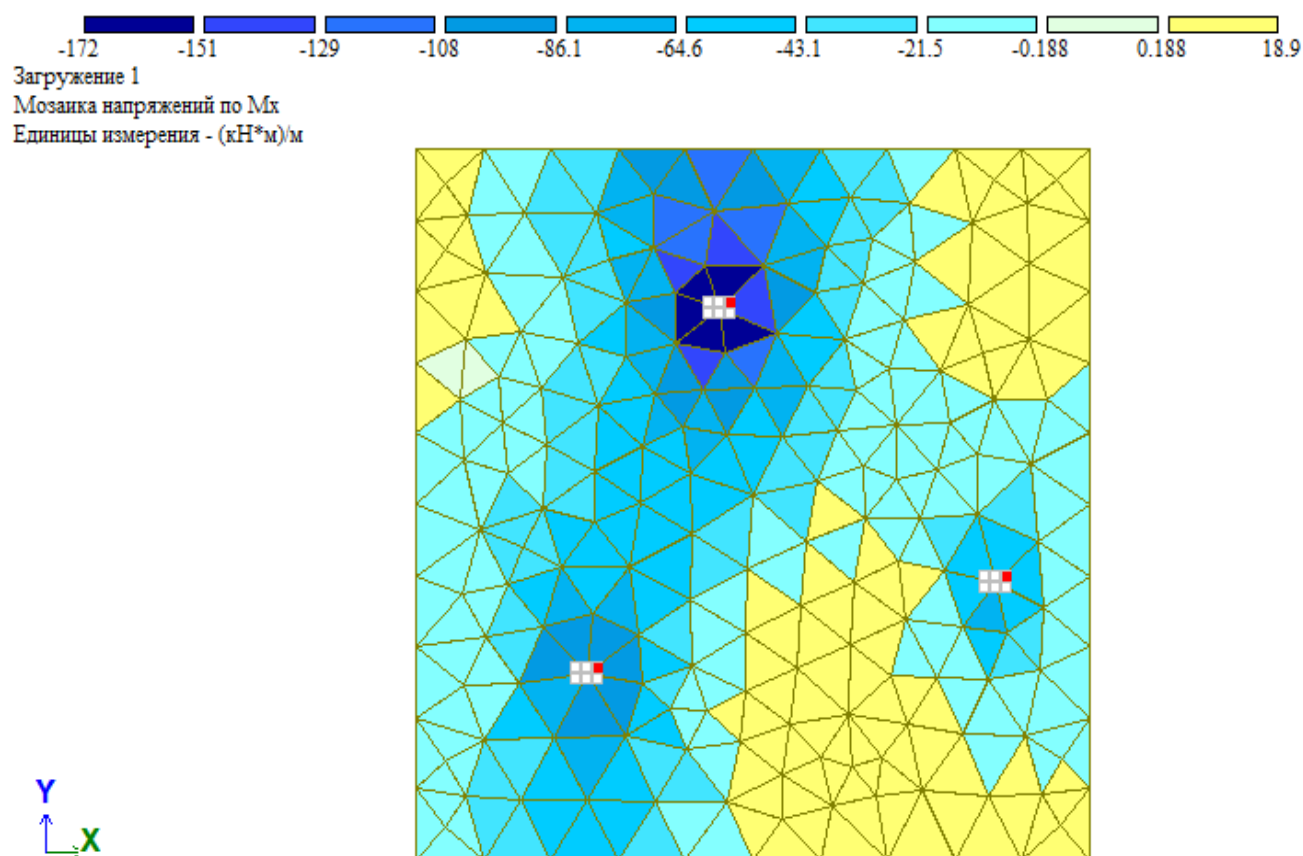


Рис. 6. Мозаика изгибающих моментов  $M_x$  в ПК ЛИРА

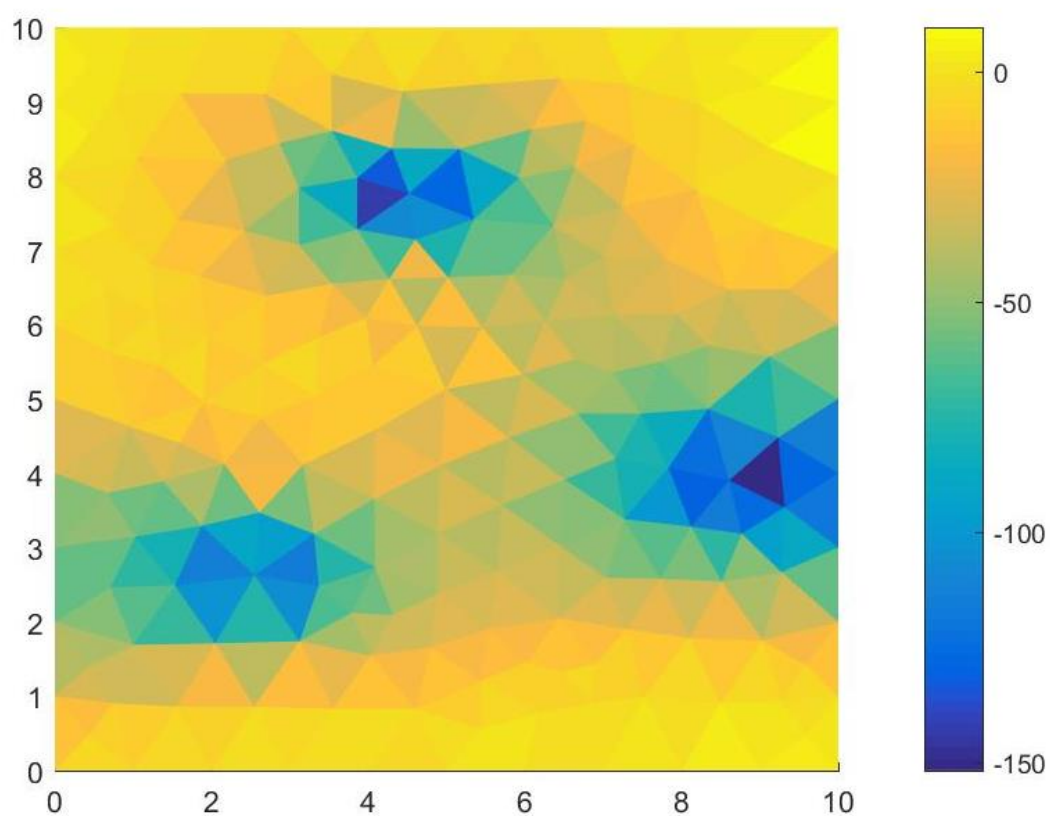


Рис. 7. Мозаика изгибающих моментов  $M_y$  в ПК Matlab

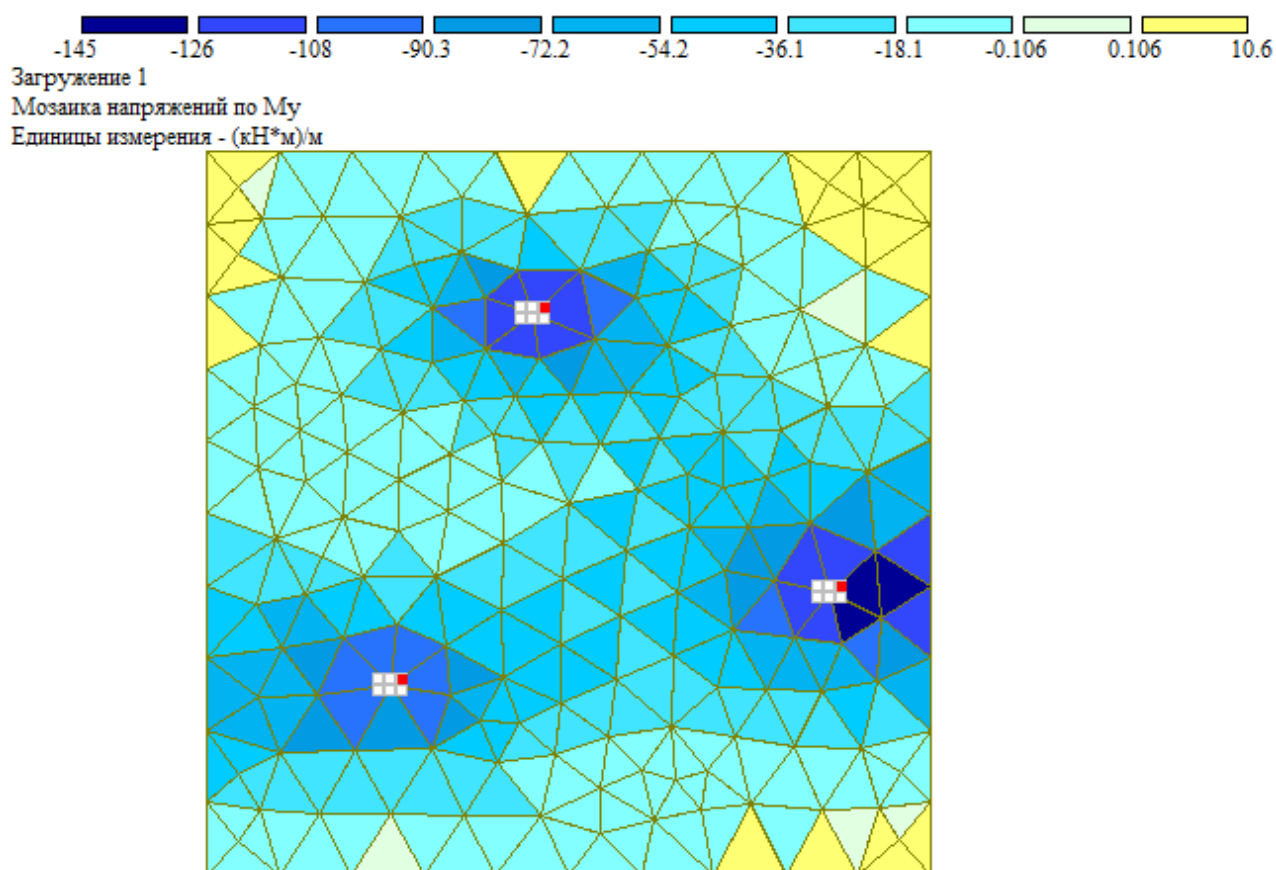


Рис. 8. Мозаика изгибающих моментов  $M_y$  в ПК Лира

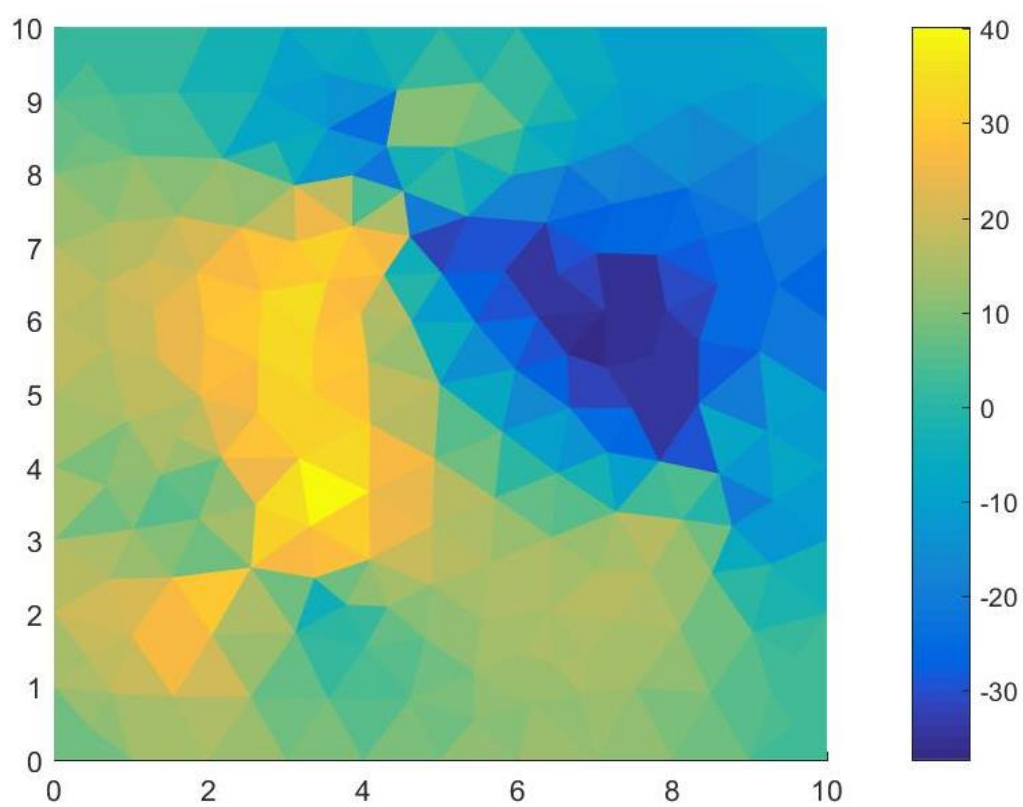


Рис. 9. Мозаика крутящих моментов в ПК Matlab

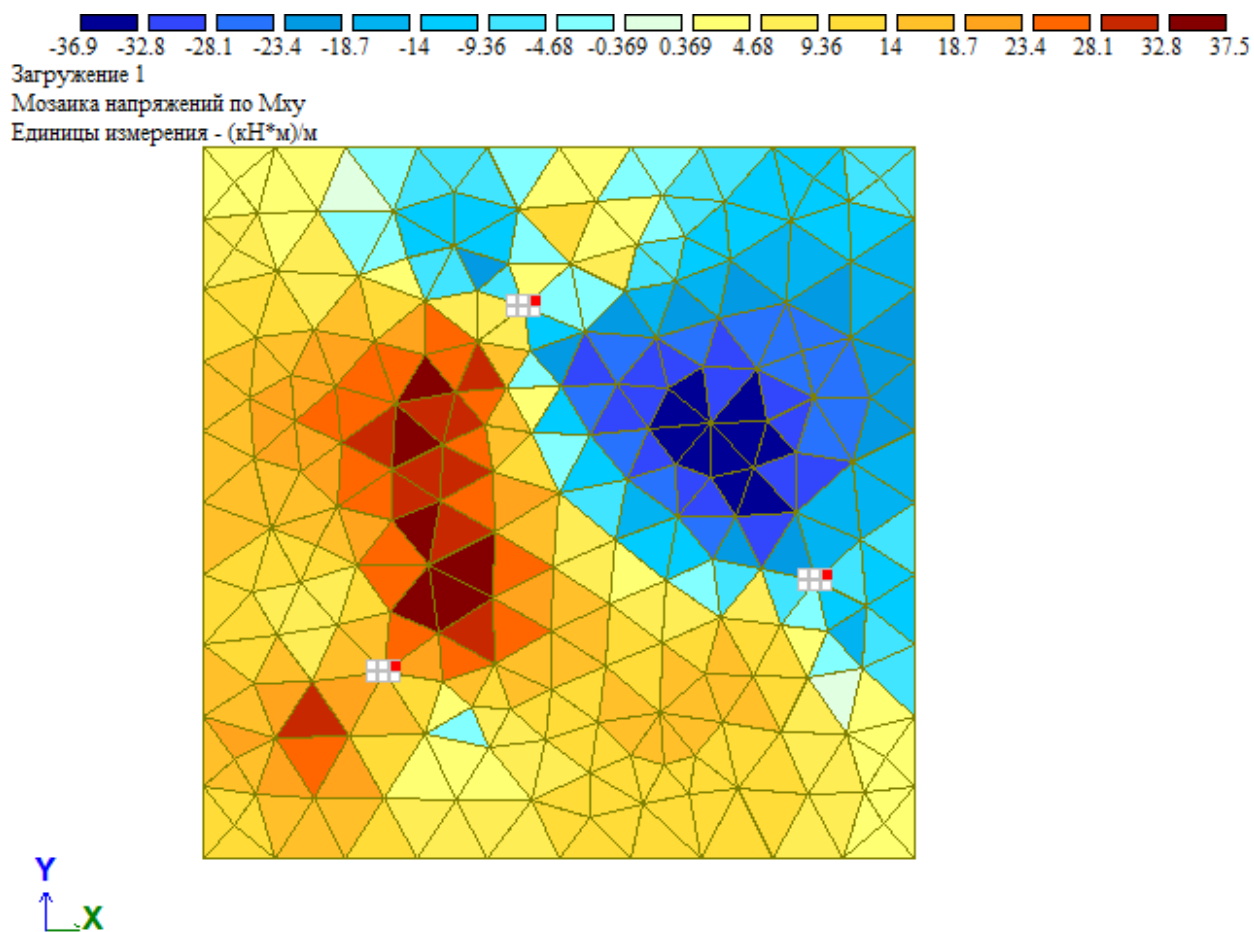


Рис. 10. Мозаика крутящих моментов в ПК Лира

На рис. 11–14 приведены мозаики площадей арматуры, требуемой для восприятия ранее представленных моментов.

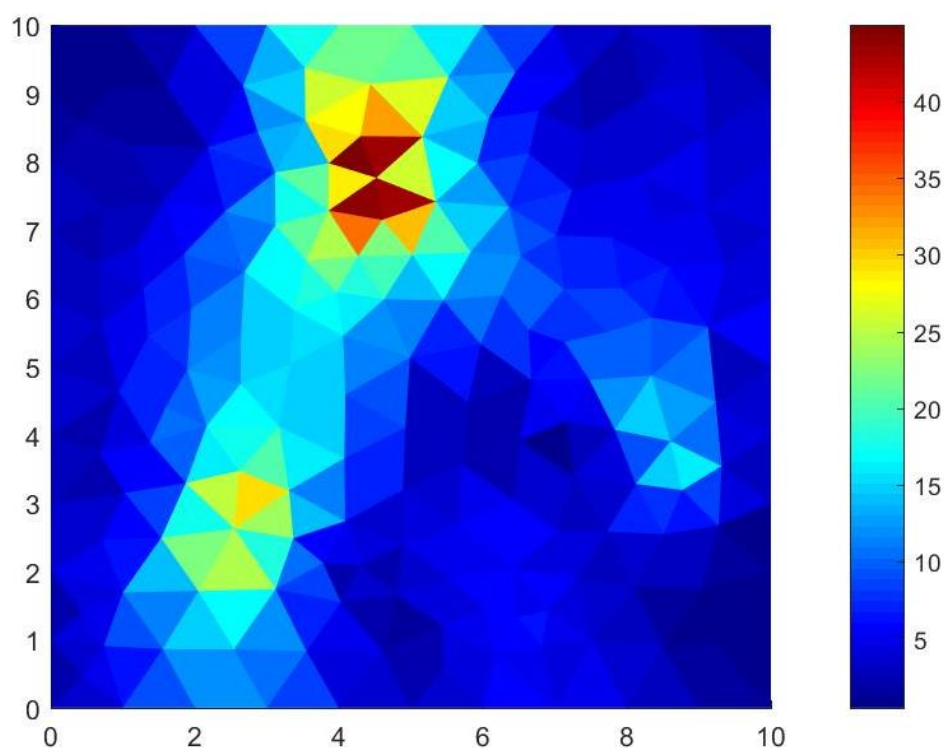


Рис. 11. Мозаика требуемой площади арматуры по  $x$  у верхней поверхности плиты в ПК Matlab

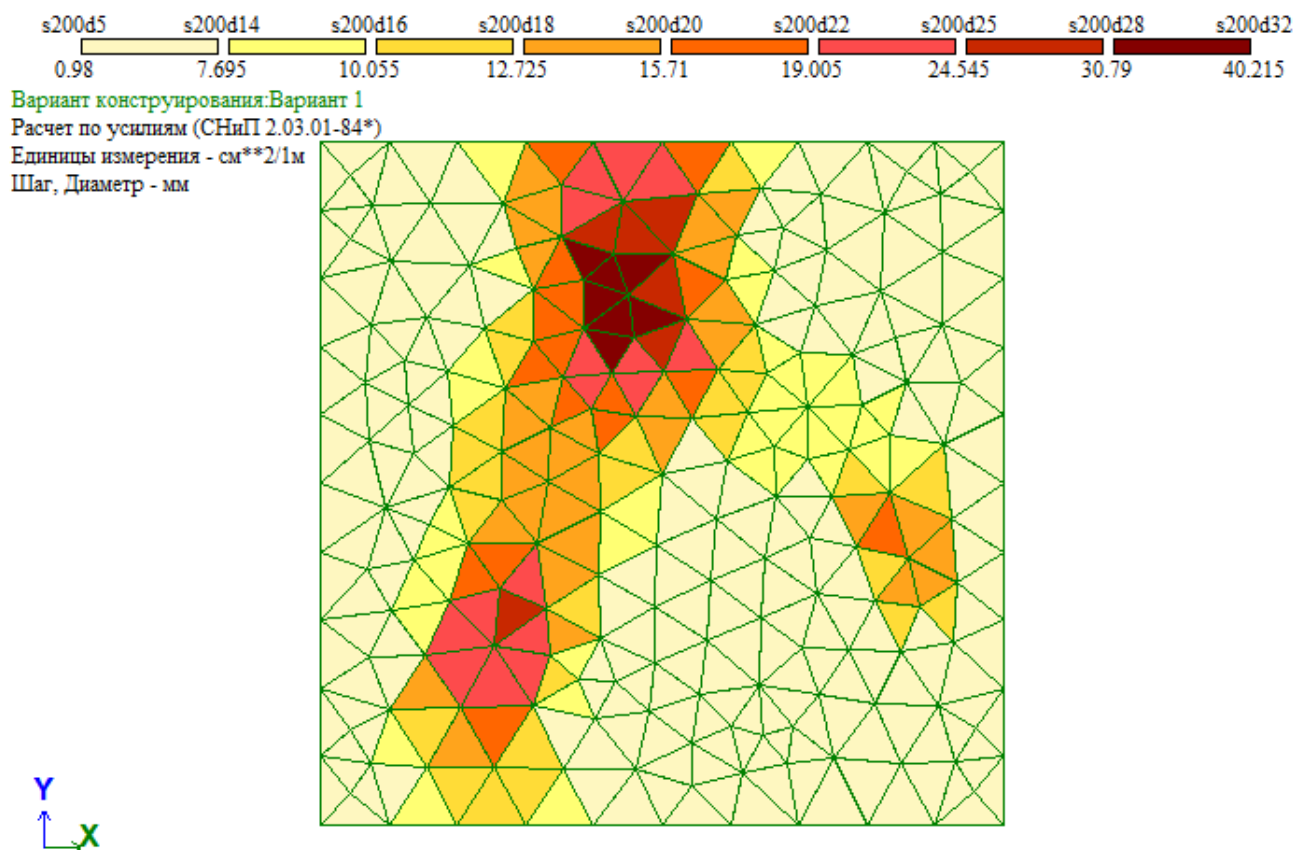


Рис. 12. Мозаика требуемой площади арматуры по  $x$  у верхней поверхности плиты в ПК ЛИРА

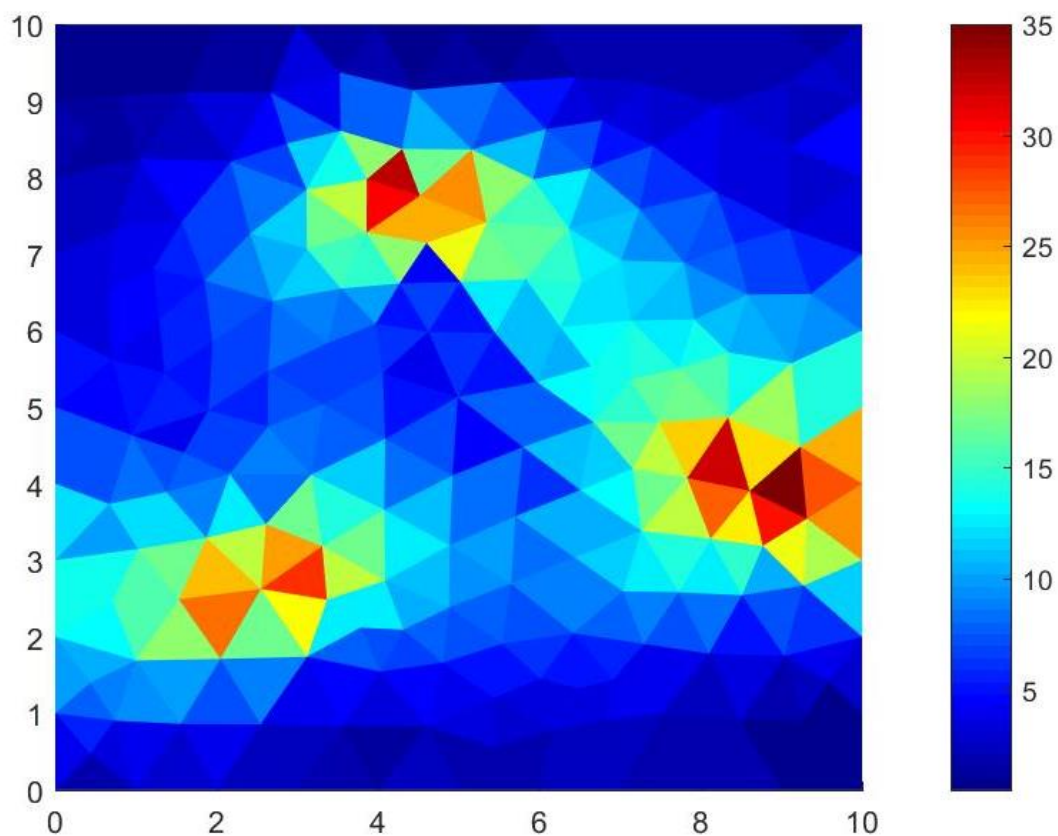


Рис. 13. Мозаика требуемой площади арматуры по  $y$  у верхней поверхности плиты в ПК Matlab

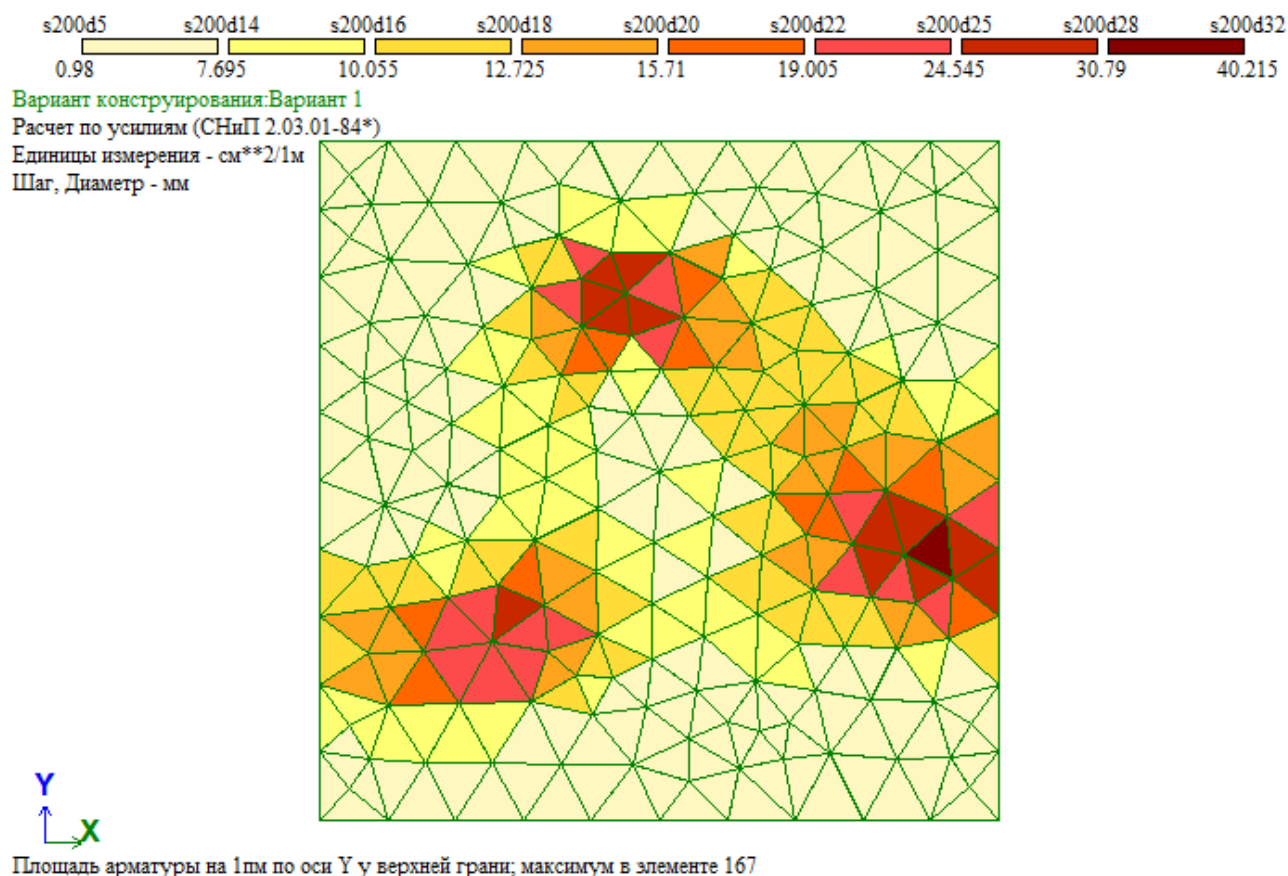


Рис. 14. Мозаика требуемой площади арматуры по у у верхней поверхности плиты в ПК ЛИРА

**Результаты исследования.** Предложен метод выявления оптимального положения колонн под плитой перекрытия железобетонного каркасного здания. Данный расчет выполнен при использовании методов Монте-Карло и МКЭ.

В ходе решения двух задач, выполненных для теста метода расчета, были выявлены некоторые неточности в работе программного комплекса и соответственно произведена верификация программного комплекса и расчетных моделей.

Определены места концентрации моментов, а также места сгущения арматуры, которые наглядно показаны на изополях и мозаиках из программного комплекса ЛИРА-САПР 2013.

Проведено сличение результатов численных расчетов, сделанных вручную, с результатами расчетов в программе ЛИРА-САПР 2013. Приведенная значимая похожесть результатов численного эксперимента по показателям деформаций, внутренних усилий и расхода арматуры открывает возможности для решения задач по оптимизации уже конкретных железобетонных конструкций, зданий и сооружений.

**Обсуждение и заключение.** Проведенный в ходе данной научной работы численный эксперимент позволил автору составить наиболее полное представление о поведении железобетонных плит заданной конфигурации и при заданных нагрузках при разном расположении конечного количества точечных опор под плитой. В ходе численного эксперимента проведен подробный анализ поведения данных конструкций при заданных условиях. Помимо проведения теоретического численного эксперимента также составлены и опробованы функциональные зависимости поведения железобетонных плит с варьируемым расположением точечных опор под ними. В ходе исследования при решении двух задач, выполненных для теста метода расчета, были выявлены некоторые неточности в работе программного комплекса и соответственно произведена верификация программного комплекса и расчетных моделей. Проведено сличение результатов численных расчетов, сделанных вручную с результатами расчетов в программе ЛИРА-САПР 2013. Приведенная значимая похожесть результатов численного эксперимента по показателям деформаций, внутренних усилий и расхода арматуры открывает возможности для решения задач по оптимизации уже конкретных железобетонных конструкций, зданий и сооружений.

### Список литературы

1. Романова Т.П. Несущая способность и оптимизация трехслойных армированных круглых пластин из разносопротивляющихся материалов, опертых по внутреннему контуру. *Проблемы прочности и пластичности*. 2015;3(77):286–300. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2015-77-3-286-300>
2. Романова Т.П. Оптимальное расположение полигональных внутренних опор к круглым жесткопластическим пластинам. *Вестник Самарского государственного технического университета*. 2014;(3):94–105. <https://doi.org/10.14498/vsgtu1312>
3. Won K.M., Park Y.S. Optimal Support Positions for a Structure to Maximize Its Fundamental Natural Frequency. *Journal of Sound and Vibration*. 1998;213(5):801–812. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1493>
4. Park Y.H., Park Y. Optimal Support Positions to Enhance Structure Natural Frequency. B: Proceedings of the KSME Dynamics and Control Division Summer Annual Meeting. *KSME Dynamics and Control Division*. 1999.
5. Wang D., Jiang J.S., Zhang W.H. Optimization of Support Positions to Maximize the Fundamental Frequency of Structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2004;61(10):1584–1602. <https://doi.org/10.1002/nme.1124>
6. Wang D. Optimization of Support Positions to Minimize the Maximal Deflection of Structures. *International Journal of Solids and Structures*. 2004;41(26):7445–7458. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.05.035>
7. Wang D. Optimal Design of Structural Support Positions for Minimizing Maximal Bending Moment. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2006;43(2):95–102. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2006.07.004>
8. Wang C.M., Wang L., Ang K.K., Liew K.M. Optimization of Internal Line Support Positions for Plates Against Vibration. *Mechanics of Structures and Machines*. 1993;21(4):429–454. <https://doi.org/10.1080/08905459308905196>
9. Son J.H., Kwak B.M. Optimization of Boundary Conditions for Maximum Fundamental Frequency of Vibrating Structures. *AIAA journal*. 1993;31(12):2351–2357. <https://doi.org/10.2514/3.11935>
10. Wang B.P., Chen J.L. Application of Genetic Algorithm for the Support Location Optimization of Beams. In: *Proceedings of the ASME 1994 Design Technical Conferences collocated with the ASME 1994 International Computers in Engineering Conference and Exhibition and the ASME 1994 8th Annual Database Symposium. 20th Design Automation Conference. Volume 2*. Minneapolis, Minnesota, USA: ASME; 1994. P. 323–327. <https://doi.org/10.1115/DETC1994-0142>

### References

1. Romanova TP. Carrying Capacity and Optimization of Three-Layer Reinforced Circular Plate of Differently Resistant Materials, Supportrd on the Internal Countour. *Problems of Strength and Plasticity*. 2015;3(77):286–300. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2015-77-3-286-300> (In Russ.).
2. Romanova TP. The Optimal Location of the Polygonal Internal Supports to the Circular Rigid-Plastic Plates. *Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*. 2014;(3(36)):94–105. <https://doi.org/10.14498/vsgtu1312> (In Russ.).
3. Won KM, Park YS. Optimal Support Positions for a Structure to Maximize Its Fundamental Natural Frequency. *Journal of Sound and Vibration*. 1998;213(5):801–812. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1493>
4. Park YH, Park Y. Optimal Support Positions to Enhance Structure Natural Frequency. In: *Proceedings of the KSME Dynamics and Control Division Summer Annual Meeting*. KSME Dynamics and Control Division; 1999.
5. Wang D, Jiang JS, Zhang WH. Optimization of Support Positions to Maximize the Fundamental Frequency of Structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2004;61(10):1584–1602. <https://doi.org/10.1002/nme.1124>
6. Wang D. Optimization of Support Positions to Minimize the Maximal Deflection of Structures. *International Journal of Solids and Structures*. 2004;41(26):7445–7458. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.05.035>
7. Wang D. Optimal Design of Structural Support Positions for Minimizing Maximal Bending Moment. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2006;43(2):95–102. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2006.07.004>
8. Wang CM, Wang L, Ang KK, Liew KM. Optimization of Internal Line Support Positions for Plates Against Vibration. *Mechanics of Structures and Machines*. 1993;21(4):429–454. <https://doi.org/10.1080/08905459308905196>
9. Son JH, Kwak BM. Optimization of Boundary Conditions for Maximum Fundamental Frequency of Vibrating Structures. *AIAA Journal*. 1993;31(12):2351–2357. <https://doi.org/10.2514/3.11935>
10. Wang BP, Chen JL. Application of Genetic Algorithm for the Support Location Optimization of Beams. In: *Proceedings of the ASME 1994 Design Technical Conferences collocated with the ASME 1994 International Computers in Engineering Conference and Exhibition and the ASME 1994 8th Annual Database Symposium. 20th Design Automation Conference. Volume 2*. Minneapolis, Minnesota, USA: ASME; 1994. P. 323–327. <https://doi.org/10.1115/DETC1994-0142>

*Об авторе:*

**Екатерина Андреевна Ефименко**, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, [ORCID](#), [ovekaterina90@yandex.ru](mailto:ovekaterina90@yandex.ru)

*Конфликт интересов:* автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи*

**Поступила в редакцию** 22.01.2024

**Поступила после рецензирования** 18.02.2024

**Принята к публикации** 21.02.2024

*About the Author:*

**Ekaterina A. Efimenko**, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ORCID](#), [ovekaterina90@yandex.ru](mailto:ovekaterina90@yandex.ru)

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

*The author has read and approved the final manuscript.*

**Received** 22.01.2024

**Revised** 18.02.2024

**Accepted** 21.02.2024

## ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

## BASES AND FOUNDATIONS, SUBSURFACE STRUCTURES



УДК 624.138: 624.131.4

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-27-47>

### Обзор зарубежного опыта инженерной защиты морских берегов и склонов

А.Ю. Прокопов , Н.А. Адоньев

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

✉ [prokopov72@rambler.ru](mailto:prokopov72@rambler.ru)



EDN: ZBEPOK

#### Аннотация

**Введение.** При проектировании, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений в прибрежных зонах возникает серьезная проблема инженерной защиты берегов и склонов от опасных геологических процессов, к которым относятся абразия берегов, подтопление территорий, склоновая эрозия, гравитационные (склоновые) процессы, включая активизацию оползней, и др. В результате таких процессов часто возникает значительный экономический ущерб, связанный с безвозвратной потерей ценных прибрежных территорий, деформациями зданий и сооружений, повреждением и разрушением объектов транспортной и инженерной инфраструктуры. В этой связи изучение передового зарубежного опыта инженерной защиты прибрежных территорий и оценка возможности их использования в России является актуальной научно-технической задачей.

**Материалы и методы.** Для подготовки обзора использовались: данные натурных наблюдений с фотофиксацией объектов инженерной защиты морских берегов и склонов, полученные авторами в период командировки в Китайскую Народную Республику (КНР) в октябре–ноябре 2023 г.; изучение и анализ литературных источников по исследуемой тематике, включая методы и технологии, применяемые в Нидерландах, Японии, США, Великобритании, Италии; обобщение и систематизация методов берегозащиты для дальнейшей разработки их классификации и оценки возможности использования в РФ.

**Результаты исследования.** Установлены основные принципы проектирования, современные методы и технологии берегозащиты, применяемые в КНР. К ним относятся: устройство многоуровневых защитных сооружений, включая многорядные волноломы специальной формы в сочетании со ступенчатыми подпорными стенами, вертикальные стены из забивных свай, анкерно-набрызгбетонные покрытия склонов в сочетании с металлическими сетками; террасирование в комбинации с удерживающими перекрестными (горизонтальными и вертикальными) железобетонными балками; пологие железобетонные волногасящие поверхности; защитные сетчатые сооружения и заборы от эоловых процессов и др.

Определены основные методы, применяемые в Нидерландах, Японии, США, Италии для комплексной защиты больших территорий, включая системы дамб, плотин, волнорезов, мощение берегов, регулирование потоков шлюзами и барьерами, создание искусственных защитных островов; искусственное пополнение песком; зеленые насаждения вдоль побережья; создание дюн — естественных или искусственных возвышенностей из песка или гальки, которые располагаются вдоль побережья; создание бетонных структур, каменных молов, плавучих флотсамов и даже искусственных рифов.

Отмечена важность организационных мероприятий, включая системы раннего предупреждения о штормах и цунами, системы мониторинга погоды и морских условий, а также распространение предупреждающих сообщений и эвакуационных планов для населения в зоне потенциальной угрозы.

**Обсуждение и заключение.** Сформулированы основные выводы по результатам обзора. Даны рекомендации о возможных направлениях совершенствования берегозащиты на Черноморском побережье Кавказа и других прибрежных зон в Российской Федерации на основе передового зарубежного опыта.

**Ключевые слова:** абразия берегов, опасные геологические процессы, инженерная защита берегов, склоновые процессы, волноломы, молы, террасирование, искусственные острова, дамбы

Для цитирования: Прокопов А.Ю., Адоньев Н.А. Обзор зарубежного опыта инженерной защиты морских берегов и склонов. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(1):27–47. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-27-47>

Research article

## Foreign Experience Review on Engineering Protection of Seashores and Hillslopes

AYu. Prokopov , NA. Adoniev

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

✉ [prokopov72@rambler.ru](mailto:prokopov72@rambler.ru)

### Abstract

**Introduction.** During design, construction and operation of buildings and structures in the coastal areas there arises a serious problem of engineering protection of coasts and hillslopes from the dangerous geological processes, which include the coastal erosion, underflooding of territories, hillslope erosion, gravitational (slope) processes, such as intensification of landslides, etc. These processes often result in significant economic damage usually related to the non-recoverable loss of valuable coastal territories, deformation of buildings and structures, damage and destruction of the objects of transport and engineering infrastructure. In this regard, the study of the advanced foreign experience in engineering protection of the coastal areas and the evaluation of the possibility of it to be implemented in Russia is a relevant scientific and engineering task.

**Materials and methods.** To prepare the review, the following data was used: field observation data with photographic evidences of the objects of engineering protection of seashores and hillslopes obtained by the authors during a business trip to the People's Republic of China (PRC) in October–November 2023; study and analysis of literature sources in the subject area, including the methods and technologies implemented in the Netherlands, Japan, the USA, Great Britain, Italy; summary and systematisation of the coastal protection methods for further development of their classification and evaluation of the possibility of implementing thereof in the Russian Federation.

**Research results.** The main principles of design, the advanced methods and technologies of coastal protection used in China have been defined. They include: construction of the multi-level protective structures, such as the multiple-row breakwaters of special shape in combination with the stepped retaining walls, the vertical walls consisting of the driven piles, anchoring and spray-concrete covering of the slopes in combination with the metal meshes; terracing in combination with the retaining reinforced concrete (horizontal and vertical) crossbeams; the sloping wave-absorbing reinforced concrete surfaces; the meshy structures and fences combating the Aeolian processes, etc.

The main methods used in the Netherlands, Japan, the USA and Italy for comprehensive protection of the large territories have been defined. Such as: the network of dams, weirs, wave breakers, coast paving, regulation of the flows by water locks and barriers, creation of the artificial protective islands; artificial replenishment with sand; creation of the green spaces along the coast; forming the dunes — natural or artificial hills of sand or pebbles located along the coast; creation of the concrete structures, stone jetties, floating constructions and even artificial reefs.

The importance of management was emphasised, including the early warning systems for storms and tsunamis, weather and marine condition monitoring systems, as well as dissemination of the warning messages and evacuation plans among the population in the areas of potential threat.

**Discussion and conclusion.** Based on the results of the review, the main conclusions were formulated. The recommendations were given on the possible ways of improving the coastal protection of the Caucasian Black Sea Coast and other coastal areas of the Russian Federation based on the advanced foreign experience.

**Keywords:** coastal erosion, hazardous geological processes, engineering protection of coasts, hillslope processes, breakwaters, jetties, terracing, artificial islands, dams

**For citation:** Prokopov AYu, Adoniev NA. Foreign Experience Review on Engineering Protection of Seashores and Hillslopes. *Modern Trends in Construction, Urban Planning and Territorial Planning*. 2024;3(1):27–47. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-27-47>

**Введение.** Проблема берегозащиты актуальна для прибрежных территорий всего мира, особенно в густонаселенных районах, для которых характерны плотная застройка, размещение в прибрежных зонах отелей, парков, рекреационных зон и пр. Строительство жилых комплексов в непосредственной близости от водоемов тоже становится популярным и привлекательным как с точки зрения инвесторов, так и потенциальных покупателей недвижимости.

Развитие транспортной инфраструктуры тоже часто связано с освоением прибрежных территорий, так как вдоль водоемов (рек, озер, морей) чаще наблюдается более пологий рельеф, наиболее благоприятный для строительства автомобильных и железных дорог, магистралей, к трассированию и продольным профилям которых предъявляются повышенные требования.

Однако строительство и эксплуатация зданий, сооружений, объектов транспортной инфраструктуры в непосредственной близости от водоемов связано с комплексом проблем, включающих действие климатических, гидрологических, гидрогеологических, сейсмических, тектонических, геоэкологических и других факторов. Одной из главных проблем является разрушение берегов (береговая эрозия) в результате действия речных и морских течений, волн, приливов и отливов, штормов, ураганов, цунами и других опасных природных процессов. В результате интенсивных осадков, паводков, таяния ледников может происходить переувлажнение склонов и возникать оползневые процессы [1], сдвиги и провалы земной поверхности [2], приводящие к значительному ущербу объектов жилой и транспортной инфраструктуры.

В России применяют самые разнообразные методы берегозащиты, наибольшее распространение из которых получили конструктивные методы, применяемые как на берегах рек [3], так и на морском побережье [4]. Особенное внимание уделяется мониторингу состояния объектов транспортной инфраструктуры (железным, автомобильным дорогам и искусственным сооружениям на них), расположенных в зонах потенциального разрушения берегов, активизации эрозионных и оползневых процессов [5].

Целью настоящей статьи является изучение зарубежного опыта инженерной защиты берегов и склонов, применяемых в ведущих странах мира с протяженной береговой линией — Китае, Нидерландах, Японии, США, Великобритании, Италии, — и оценка возможности использования этого опыта в гидрологических, инженерно-геологических и гидрогеологических условиях прибрежных территорий, прежде всего, Черного моря и других морей России, где требуется инженерная защита берегов.

**Материалы и методы.** Для подготовки обзора применялся метод натурного обследования прибрежных участков и элементов инженерной защиты, расположенных в КНР на побережье Желтого моря, включая города-курорты Шаньдунского полуострова Яньтай, Вэйхай, Жунчэн: автомобильные дороги в непосредственной близости от морского берега; набережные и побережье в черте Циндао — крупнейшего города-порта на Желтом море; заливы Цзяочжоу, Тайпинь, Лаошань и др., а также внутренние озера и водоемы провинции Шаньдун. При изучении объектов инженерной защиты выполнена их фотофиксация, результаты которой приведены в настоящей статье, произведена оценка их технического состояния, и определены конструктивные особенности.

Для обзора передового зарубежного опыта берегоукрепления в других странах использовался анализ общедоступных литературных источников, включая научные статьи, диссертации, обзоры на иностранных языках, результаты инженерных изысканий, географические и геологические карты и другие источники информации.

В результате выполненных натурных обследований и анализа литературных источников установлено следующее.

Инженерная защита берегов — это комплекс мероприятий и технических решений, применяемых для защиты береговой линии от разрушительного воздействия водных потоков, таких как реки, озера или океаны [6]. Она включает в себя различные инженерные конструкции и методы, разработанные для предотвращения эрозии почвы, обеспечения стабильности берегов и защиты соседних объектов от наводнений.

Инженерная защита берегов обычно включает в себя следующие элементы [7]:

1. Ограждения и сооружения: это могут быть насыпные или вкопанные стены, дамбы, причалы, дюкеры, мощение берегов и другие конструкции, созданные для предотвращения проникновения воды на сушу и защиты берегов от волн и течений.

2. Пляжи и наносы: создание или восстановление пляжей и песчаных наносов, которые служат естественным барьером для защиты береговой линии от эрозии.

3. Растительность и растительные насаждения: посадка растений, таких как деревья, кустарники и травянистые растения, способствует укреплению почвы и удержанию береговой линии.

4. Морские и речные стены: создание искусственных барьеров в виде стен или волнорезов для защиты берегов от прямого воздействия волн и приливов.

5. Дренажные системы: установка дренажных систем для отвода излишков воды и предотвращения накопления влаги, что может способствовать эрозии берегов.

Инженерная защита берегов является важной составляющей водоуправления и позволяет предотвращать ущерб от наводнений, сохранять природные и экологические ресурсы и обеспечивать безопасность населения и инфраструктуры, расположенной вблизи водных объектов.

Далее приведем примеры инженерной защиты берегов и склонов, применяемых в разных странах с протяженной береговой линией и имеющих риски возникновения опасных геологических процессов (абразия берегов, подтопление территорий, склоновая эрозия, гравитационные (склоновые) процессы, включая активизацию оползней, и др.).

**1. Китайская Народная Республика.** Китай постоянно сталкивается с проблемами эрозии берегов, особенно на побережье Желтого и Восточно-Китайского морей. В стране используются дюкеры, волнорезы, плотины и другие сооружения для защиты берегов от эрозии и приливов. Китай имеет значительный опыт инженерной защиты берегов из-за своего обширного побережья и проблем, связанных с эрозией, наводнениями и другими природными бедствиями. Страна разработала разнообразные стратегии и проекты, которые включают в себя строительство дамб, волнорезов, островных барьеров и других сооружений для защиты берегов.

В этой связи авторами в период командировки в провинцию Шаньдун (КНР) в октябре–ноябре 2023 г. был изучен опыт применения мер защиты берегов и склонов от эрозионных и оползневых процессов. Концепция берегозащиты в КНР строится на детальном научном изучении комплекса таких факторов, как теплофизические характеристики и термодинамические процессы в морской акватории [8], установленных фронтов и их динамики [9], особенностей приливов и отливов на разных участках морского побережья [10], формирования и развития штормов, тайфунов, цунами [11] и ряда других природных и техногенных факторов.

Представляют интерес конструкции многорядных железобетонных волноломов специальной формы, широко применяющихся для берегозащиты набережных в сочетании со ступенчатыми подпорными стенами и другими сооружениями (рис. 1).

Например, форма и количество рядов волноломов, используемых для защиты набережной в г. Циндао (провинция Шаньдун, КНР), подобраны таким образом, чтобы обеспечивалась их максимальная устойчивость и эффективность в части гашения энергии волн и максимального снижения динамических нагрузок на конструкции набережной. Волноломы имеют сложную форму и укладываются, сцепляясь между собой в ряду и между рядами и образуя разветвленную поверхность, направленную против фронта волн.

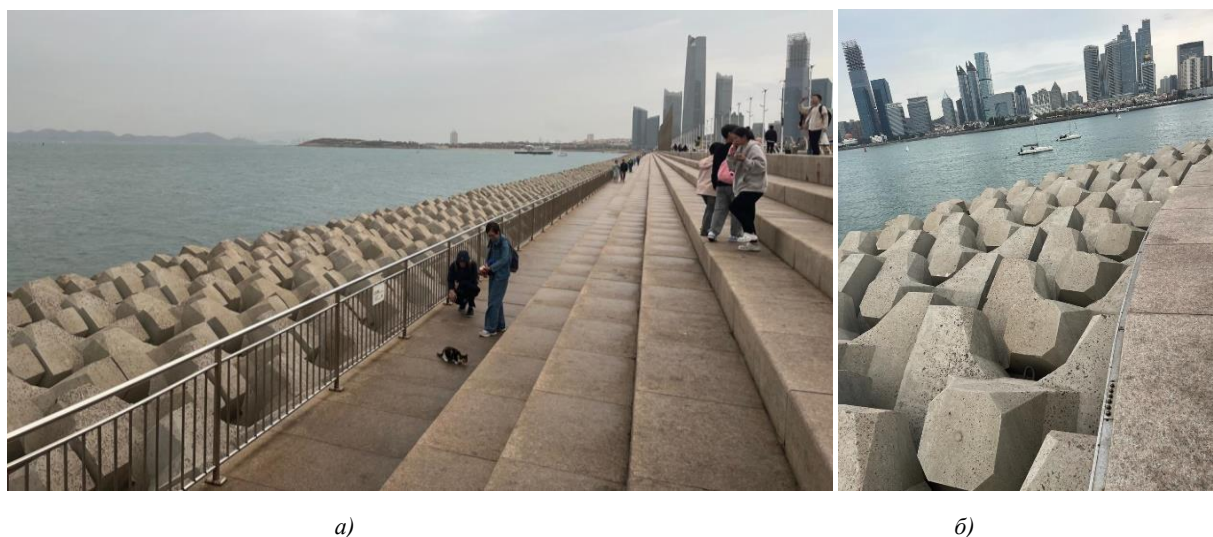


Рис. 1. Система берегозащиты набережной Желтого моря в районе Олимпийского парусного центра г. Циндао (КНР):

- а* — ступенчатая подпорная стена и многорядная защита из волноломов;  
*б* — способ укладки железобетонных волноломов специальной формы

На закрытых участках заливов, для которых не характерно образование высоких волн со значительной энергией и турбулентностью потока, а также при наличии вдали от береговой линии дополнительных волнорезов, искусственных островов и других сооружений, гасящих энергию волн, непосредственно на берегу устраивают протяженные пологие железобетонные конструкции в виде сборных плит или монолитных участков, основной целью которых является плавное регулирование водного потока без образования интенсивного ударного воздействия волн, характерных для вертикальных подпорных стен. Такие сооружения берегозащиты (рис. 2)

позволяют постепенно гасить энергию волны, которая скользит, поднимаясь и опускаясь по поверхности такой конструкции, расположенной под углом  $15\text{--}30^\circ$  к горизонту. Расположение таких конструкций в плане и по высоте проектируется с учетом преобладающего направления волн и вероятного подтопления территории.

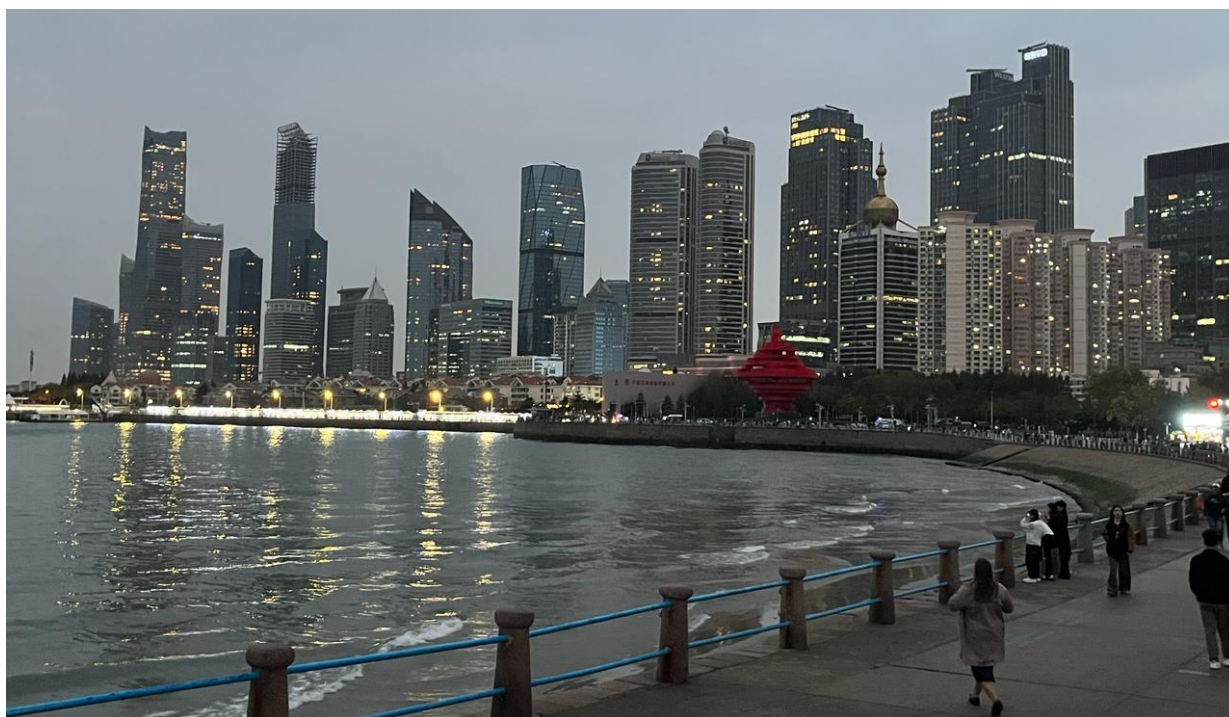


Рис. 2. Инженерная защита набережной г. Циндао (КНР) на закрытом участке залива в виде пологих наклонных железобетонных конструкций

В высокогорных прибрежных районах, для которых характерны крутые склоны, сложенные скальными или полускальными горными породами, также происходит медленная абразия, трещинообразование и разрушение склонов, при этом возникает опасность обрушения, как мелких кусков породы, так и крупных отдельных. Учитывая сверхвысокую плотность населения в восточных и юго-восточных прибрежных районах КНР, продолжается освоение даже сложных в орографическом отношении участков, на которых располагаются рекреационные зоны, национальные природные парки, оборудуются туристические маршруты и др. Поэтому проблема инженерной защиты таких территорий тоже остается весьма актуальной.

Для крутых скальных берегов используется инженерная защита с применением методов искусственного закрепления и усиления природных скальных массивов с целью снижения их трещиноватости и повышения устойчивости. В частности, находит широкое применение анкерование, многослойное набрызгбетонирование и оштукатуривание природных склонов в сочетании с возведением высоких (до  $20\text{--}30$  м) подпорных стен из монолитного бетона, железобетона или кладки из природного камня (рис. 3 а). По берегу моря и склонам таких национальных парков проложены и оборудованы пешеходные маршруты.

Отличительной особенностью ряда берегоукрепительных сооружений является их архитектурная выразительность с использованием китайской национальной символики и знаковости (рис. 3, б). Часть берегоукрепительных сооружений, в т. ч. сохранившихся со времен китайско-японской войны 1894–95 гг., реконструированных и восстановленных в последующие периоды, выполняла роль не только инженерной защиты, но и фортификации.

В прибрежных участках Желтого моря, даже со сложным рельефом, очень развито сельское хозяйство, в особенности чаеводство, для которого здесь сложились весьма благоприятные климатические условия. Для повышения площади чайных плантаций и одновременной защиты береговых склонов от оползневых процессов выполняется террасирование склонов с формированием горизонтальных площадок, разделенных заглубленными железобетонными или каменными подпорными стенками (рис. 4).



а)



б)

Рис. 3. Инженерная защита берегов и склонов в Национальном природном парке Чэншань (Chengshan National Scenic Area), район г. Вэйхай, КНР:

- а — комбинированное берегоукрепление с помощью набрызгбетонирования, оштукатуривания природных скал и устройства высоких подпорных стен из каменной кладки, опирающихся на скальное основание;  
б — массивная каменная подпорная стенка, стилизованная под Великую китайскую стену



Рис. 4. Террасирование прибрежных склонов с устройством заглубленных вертикальных подпорных стен для использования в сельском хозяйстве (чайные плантации), район Лао Шань, провинция Шаньдун, КНР

На берегах прудов, озер и других водоемов, где не возникает значительных волн и динамических воздействий на берег, используют более простые, но тоже многоуровневые системы берегозащиты, состоящие, как правило, из вертикальных подпорных стен, набрызгбетонных покрытий и удерживающих сооружений в виде рядов забивных призматических свай. На рис. 5 показан пример такой системы берегоукрепления, применяющейся в Национальном парке на озере Чаоян Ган вблизи г. Вэйхай в провинции Шаньдун.



Рис. 5. Многоуровневая берегозащита озера Чаоян Ган (Шаньдун, КНР): металлические ограждения, железобетонная подпорная стена, набрызгбетонирование, ряд забивных призматических свай

Кроме абразии берегов и оползневых процессов, на песчаных морских берегах могут возникать эоловые процессы, обусловленные геологической деятельностью ветра, который способен перемещать большие массы песчаного грунта, тем самым нанося значительный ущерб для берегов, используемых для обустройства пляжей и других рекреационных зон. На исследованном побережье Желтого моря существуют участки с особым

ветровым режимом, используемым с одной стороны для получения ветровой энергии на многочисленных ВЭС, построенных в этом районе, но с другой стороны опасных с точки зрения переноса песчаных масс. Для защиты от таких эоловых процессов на многих песчаных пляжах и прибрежных территориях монтируют и закрепляют специальные сетчатые заграждения, препятствующие уносу песка, но не создающих большого аэродинамического сопротивления и не опрокидываемых ветром (рис. 6).

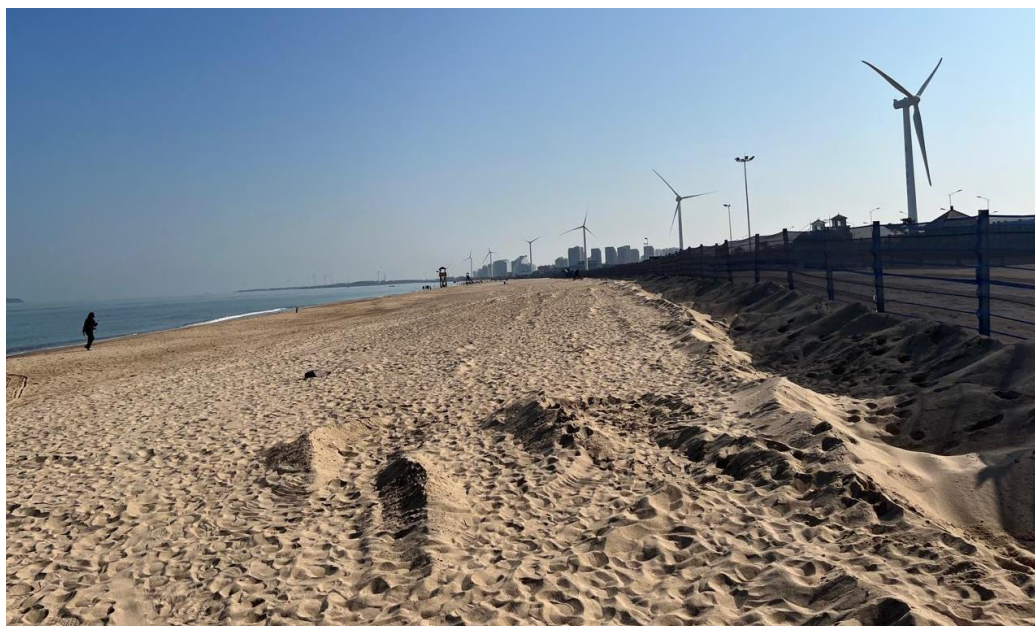


Рис. 6. Сетчатые заграждения для защиты от эоловых процессов в районах с особым ветровым режимом, пляж на побережье Желтого моря на участке Вэйхай — Жунчэн (КНР)

Для стабилизации оползнеопасных склонов в КНР разработаны и широко применяются методы террасирования в комбинации с удерживающими перекрестными железобетонными балками (рис. 7). Такое решение позволяет разбить оползнеопасный склон на небольшие участки как по высоте (террасы — не более 3–4 м), так и в плане, и удерживать каждый участок заглубленными в склон горизонтальными несущими балками, связанными вертикальными элементами.

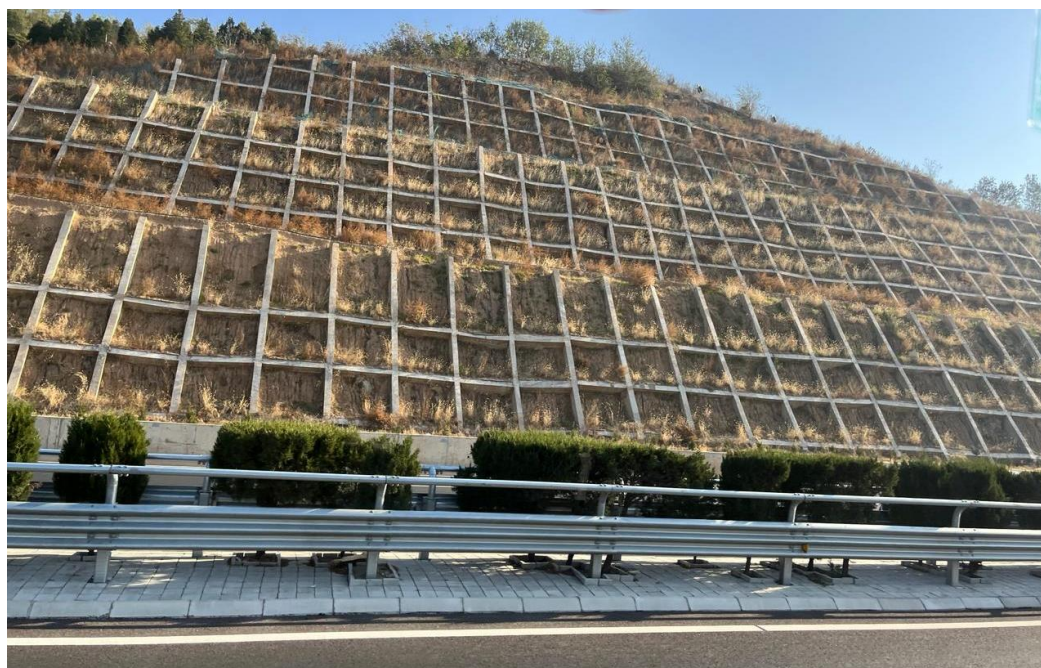


Рис. 7. Система удерживающих перекрестных сооружений в комбинации с террасированием склона вдоль скоростной автодороги G104 на участке г. Цзинань — г. Тайань, провинция Шаньдун, КНР

Одним из наиболее известных примеров инженерной защиты речных берегов в Китае является Гребной Мур, расположенный в устье Желтой реки. Гребной Мур — один из крупнейших инженерных проектов в мире, представляющий собой систему дамб, построенных для защиты берегов от наводнений и эрозии. Он состоит из серии водохранилищ, шлюзов, дамб и насыпей, которые образуют преграду для уменьшения энергии волн и стока реки.

Еще один пример — это Шанхайская набережная, где была создана крупномасштабная система волнорезов для защиты от штормов и наводнений. Волнорезы предотвращают проникновение сильных волн на берег, уменьшая их энергию и защищая население и инфраструктуру.

Китай также применяет методы искусственных островов для защиты берегов. Например, в районе Перловой реки в городе Гуанчжоу были созданы искусственные острова и противоволновые сооружения, чтобы смягчить воздействие прилива и штормов на прибрежные зоны.

В последние годы Китай активно разрабатывает и применяет инновационные технологии в области инженерной защиты берегов. Это включает в себя использование искусственного интеллекта и системы мониторинга для более точного прогнозирования приливов и волн, а также разработку экологически устойчивых решений, таких как использование природных материалов и систем водоотведения.

Опыт инженерной защиты берегов в Китае подчеркивает важность комплексного подхода и учета экологических последствий. Он включает в себя прогнозирование и управление природными явлениями, сотрудничество с научными и исследовательскими учреждениями, а также широкое обсуждение и вовлечение местных сообществ и заинтересованных сторон.

**2. Нидерланды.** Страна известна своими инженерными решениями в области защиты берегов и водопользования. Здесь применяются системы дамб, плотин и волнорезов, а также мощение берегов и регулирование речных потоков. Нидерланды являются одной из стран, которые активно борются с проблемой подтоплений и обеспечивают защиту своих берегов. Рассмотрим основные подходы, применяемые в Нидерландах [12, 13].

*Дамбы и земляные насыпи.* Нидерланды известны своими системами дамб и земляных насыпей, которые предназначены для защиты прибрежных территорий от наводнений. Система дамб называется «Дельта» и включает в себя огромные бетонные дамбы, земляные насыпи, плотины и шлюзы. Эти сооружения защищают прибрежные города и земли от приливов и штормовых нагонов (рис. 8).



Рис. 8. Карта дельты Рейна и проекта «Дельта».

Синими отрезками отмечены защитные сооружения, кружками — города Роттердам и Антверпен [13]

Нидерланды имеют долгую историю борьбы с природными угрозами со стороны воды. Большая часть территории Нидерландов находится ниже уровня моря, и поэтому страна активно занимается строительством дамб и земляных насыпей для обеспечения защиты берегов.

Опыт возведения дамб и земляных насыпей в Нидерландах отражает множество технологических и инженерных достижений. Здесь реализованы инновационные подходы и передовые системы водоправления, которые обеспечивают безопасность и защиту территории страны от наводнений [14].

Одной из наиболее значимых инженерных конструкций в Нидерландах является «Дельта» (Deltawerken) — система дамб, шлюзов, барьеров и искусственных островов, которая предназначена для защиты от наводнений великого масштаба. Она была разработана и построена после наводнения в 1953 году, когда множество областей Нидерландов были серьезно затоплены.

Дельта-работы включают в себя несколько дамб, включая Зюйдерзееверкеринг (Zuiderzee Works) и Оостерсхелдекеринг (Oosterscheldekering), а также многочисленные шлюзы и барьеры. Они предназначены для контроля уровня воды и предотвращения наводнений от Северного моря.

Строительство дамб и земляных насыпей в Нидерландах основывается на современных гидротехнических принципах. Важным элементом является использование инновационных материалов и технологий, таких как специальные геотекстильные материалы, которые укрепляют землю и предотвращают смещение грунта.

Безопасность и стабильность дамб обеспечиваются постоянным контролем и техническим обслуживанием. В Нидерландах также активно исследуются и разрабатываются инновационные методы управления водными ресурсами, такие как использование плавающих фундаментов и искусственных островов.

Опыт Нидерландов в области возведения дамб и земляных насыпей может быть важным уроком для других стран, сталкивающихся с проблемами наводнений и защиты берегов. Эта страна демонстрирует, как инженерные решения и современные технологии могут помочь справиться с угрозами природы и обеспечить безопасность населения и инфраструктуры [15].

*Искусственные острова.* Нидерланды также создают искусственные острова и полуострова вдоль побережья, которые служат естественными барьерами для защиты береговой линии от волн и приливов. Эти острова строятся с использованием подходящих материалов, таких как песок и гравий, и засаживаются растительностью для укрепления почвы.



Рис. 9. Искусственный остров Маркен (Нидерланды) [14]

В Нидерландах опыт строительства искусственных островов для обеспечения защиты берегов является одним из ключевых аспектов их инженерных работ по управлению водными ресурсами. Искусственные острова играют важную роль в защите береговой линии от наводнений и эрозии, а также создают дополнительное пространство для жизни, работы и отдыха.

Один из примеров успешного строительства искусственных островов в Нидерландах — Маркен (Marken). Ранее Маркен был островом, но в результате строительства дамб и насыпей он был присоединен к материковой части Нидерландов. Однако, чтобы обеспечить защиту от наводнений и эрозии, было решено создать искусственный остров Маркен [14].

Остров Маркен был спроектирован с использованием современных технологий и инженерных решений. Была создана система искусственных насыпей и дамб, которые обеспечивают защиту от наводнений и укрепляют береговую линию. Кроме того, остров оснащен специальными системами дренажа и дренажными каналами, которые помогают управлять поверхностными водами и предотвращать их скопление на острове.

Искусственные острова в Нидерландах также имеют множество функций помимо защиты берегов. Некоторые из них используются для размещения промышленных и портовых инфраструктур, а также для жилых и коммерческих целей. Это позволяет оптимизировать использование ограниченной земли и предоставляет дополнительные возможности для развития и роста.

Опыт строительства искусственных островов в Нидерландах подчеркивает важность комплексного подхода к управлению береговыми зонами. Он включает в себя глубокие исследования природных условий, анализ рисков, разработку инновационных технологий и систем, а также активное взаимодействие с местным сообществом и заинтересованными сторонами.

Нидерланды являются примером успешного применения искусственных островов в качестве средства обеспечения защиты берегов и устойчивого развития. Опыт строительства и использования этих островов может быть ценным для других стран, сталкивающихся с аналогичными вызовами, и позволит им разработать и реализовать собственные инженерные решения для защиты береговых территорий [15].

*Планы затопления.* В некоторых районах Нидерландов, где риск наводнений высок, применяется концепция контролируемого затопления. Вместо того, чтобы бороться с природными силами, нидерландские инженеры разрабатывают планы, при которых определенные области могут быть намеренно затоплены, чтобы предотвратить проблемы в других более критических зонах. Это позволяет управлять и распределять наводнения.

Один из примеров планов затопления в Нидерландах — план «Room for the River» (Место для реки) (рис. 10). Он был разработан в ответ на угрозу повышенных уровней рек, особенно в периоды сильных дождей или таяния снега. Целью плана было создание дополнительного пространства для рек, позволяющего им разливаться и увеличивать свою пропускную способность, тем самым снижая вероятность наводнений вниз по течению.



Рис. 10. Плановое затопление «Room for the River» [15]

План «Room for the River» включал несколько мероприятий, таких как расширение речных русел, создание плотин и дамб, а также формирование затопляемых площадей. Затопляемые площади были специально предназначены для контролируемого затопления в периоды повышенного речного стока. Эти площади были выбраны и разработаны с учетом воздействия на окружающую среду и местные сообщества.

Основным преимуществом плана «Room for the River» и других подобных планов затопления является то, что они предотвращают увеличение нагрузки на главные дамбы и способствуют распределению риска наводнений. Затопляемые площади служат как временные резервуары, которые могут принять избыточную воду и затем постепенно выпускать ее в течение более продолжительного периода времени.

Планирование затоплений в Нидерландах включает в себя глубокие исследования гидрологических характеристик, прогнозирование погодных условий и потенциальных наводнений, а также моделирование воздействия затоплений на окружающую среду и население. Оно также учитывает социально-экономические аспекты и взаимодействие с заинтересованными сторонами.

*Поднятие уровня земли.* В некоторых нидерландских городах и регионах, которые подвержены регулярным наводнениям, применяется метод поднятия уровня земли. Это означает, что уровень земли и фундаменты зданий строятся выше уровня моря, чтобы снизить риск наводнений [13].

Одним из примеров поднятия уровня земли в Нидерландах является проект «Полдер». Полдер — это низко расположенная область, огороженная дамбами, в которой уровень земли поднят выше уровня воды. Это достигается путем высушивания местности и удаления излишков воды с помощью систем дренажа и насосов.

Проекты по созданию полдеров в Нидерландах включают в себя использование дренажных систем, которые позволяют удалить излишки воды из полей и территорий, находящихся ниже уровня моря. Затем насыпается слой грунта, песка или глины для повышения уровня земли. В конечном итоге создается плодородный и безопасный участок, который может быть использован для сельского хозяйства, жилых зон, инфраструктуры и других целей.

Поднятие уровня земли в Нидерландах требует совокупности усилий и интегрированного подхода, который включает в себя гидрологические исследования, инженерные работы, мониторинг и управление водными ресурсами. Опыт Нидерландов в этой области является ценным и может служить примером для других стран, сталкивающихся с проблемами подтоплений и защиты береговых территорий.

*Управление водными ресурсами.* Нидерланды имеют сложную систему управления водными ресурсами, включая сеть каналов, шлюзов и насосных станций. Это позволяет контролировать уровень воды в реках и озерах, а также обеспечивает отвод воды в море. Страна разработала инновационные подходы и системы, которые обеспечивают эффективное управление водой, поддерживают безопасность и способствуют устойчивому развитию.

Один из важных элементов управления водными ресурсами в Нидерландах — это сеть дамб, насыпей и искусственных барьеров. Они предназначены для защиты берегов и контроля уровня воды, предотвращая проникновение воды в низко расположенные области. Дамбы и насыпи регулируют водосток и предупреждают наводнения от Северного моря и рек. Для эффективного управления водой Нидерланды также разработали системы дренажа и насосных станций. Они используются для удаления избыточной воды из затопленных областей и контроля уровня подземных вод. Системы дренажа обеспечивают эффективное осушение земель, что позволяет использовать их для сельского хозяйства и других целей [14].

Опыт Нидерландов в управлении водными ресурсами может быть ценным уроком для других стран, сталкивающихся с проблемами защиты берегов и наводнений. Он демонстрирует необходимость интегрированного подхода, применения инновационных технологий и систем, а также активного участия сообщества. Это позволяет строить устойчивые системы управления водными ресурсами, которые обеспечивают безопасность, защиту окружающей среды и благополучие населения.

**3. Япония,** как островная страна, имеет длинное побережье и подвержена угрозе тайфунов и цунами. Инженерная защита берегов в Японии включает строительство волнорезов, дамб, искусственных островов и других сооружений для предотвращения повреждений от стихийных бедствий.

Япония состоит из 4 основных островов — Хоккайдо, Хонсю, Шикоку и Кюшу, которые вместе с многочисленными маленькими островами образуют немного изогнутую дугу на восточном крае Азиатского континента. Доминирующей географией этих островов являются относительно высокие горы, расположенные в центре, и узкие полосы плоской местности вдоль береговых линий. Именно на побережье располагаются основные промышленные и экономические зоны с плотно населенными районами. Весьма важно отметить, что Япония использует побережье наиболее эффективно для своего выживания и процветания, и этот тренд будет поддерживаться и в будущем для развития ее экономики.

Однако Японии характеризуют неблагоприятные природные условия и географическое положение, и она считается одной из самых часто страдающих от бедствий стран в мире. Острова Японии подвергаются тропическим циклонам и тайфунам, которые приносят с собой огромные бедствия. Кроме того, из-за географического положения в зоне землетрясений Япония также подвержена разрушительным последствиям землетрясений и цунами [16]. Многие побережья подвержены сильным ветровым волнам и океаническим волнам, что приводит к частой разрушаемости морских конструкций, эрозии берегов и накоплению отложений в гаванях.

Японские инженеры сталкиваются с рядом сложных проблем и приоритетно занимаются их преодолением и эффективным контролем, чтобы сохранить ценные побережья, которые они не могут себе позволить потерять.

Факторы, которые считаются связанными с проблемами побережья, могут быть классифицированы на четыре основные категории: геоморфологические аспекты, метеорологические и океанографические аспекты, осадки и искусственные вмешательства. Мы рассмотрим эти факторы с особым уклоном на особенности, характерные для Японии [17].

*Геоморфологические аспекты.* Острова Японии расположены вдоль зоны сейсмической активности в Тихоокеанском регионе. Землетрясения на этих островах часто приводят к поднятию и опусканию уровня земли на побережье и на морском дне. Геоморфологические движения являются одним из основных факторов, влияющих на процессы на побережье в Японии.

*Метеорологические и океанографические аспекты.* Япония подвергается воздействию сильных ветров и волн, вызываемых тайфунами и циклонами. Важную роль также играют цунами, порождаемые землетрясениями в морском пространстве. Побережье Японии подвержено длительным волнам, которые имеют значительную высоту.

*Осадки.* Осадки, такие как песок и гравий, являются важными составляющими побережья и могут влиять на его эрозию.

*Искусственные вмешательства.* Искусственные сооружения, такие как дамбы, волнорезы и причалы, а также деятельность человека, такая как добыча песка, также оказывают влияние на побережье.

В Японии существуют уникальные географические и климатические условия, которые сказываются на проблемах побережья. Это включает землетрясения, цунами, сильные ветры, тайфуны и длительные волны. Разработка и применение мер защиты берегов является необходимостью для сохранения ценных прибрежных зон и предотвращения разрушительных последствий.



Рис. 11. Системы берегозащиты от цунами в Японии [18]

Япония применяет различные инженерные решения для обеспечения безопасности своих берегов (рис. 11). Вот некоторые из них [17, 18]:

*Береговые дамбы и морские стены.* Строительство береговых дамб и морских стен является одним из основных способов защиты от штормовых нагонов и цунами. Эти сооружения предназначены для предотвращения проникновения воды во внутренние районы и защиты прибрежных поселений и инфраструктуры от разрушений. Береговые дамбы и морские стены обычно строятся из железобетона или природного камня и могут иметь различные конфигурации в зависимости от местных условий.

*Морские волноотбойные сооружения.* Морские волноотбойные сооружения, такие как перебоины и погружные ломбы, устанавливаются вдоль береговой линии для разрушения и разбиения сильных волн, проникающих на побережье. Эти сооружения помогают снизить силу удара волн и предотвращают эрозию пляжей и разрушение береговых сооружений.

*Искусственное пополнение песком.* Для борьбы с эрозией пляжей Япония применяет метод искусственного пополнения песком. Песок или другие подходящие материалы перевозятся и распределяются на пляжах с целью увеличения их объема и восстановления природной защиты от волн.

**Зеленые насаждения.** Одним из подходов к береговой защите является создание зеленых насаждений вдоль побережья. Растительность, такая как мангровые заросли и прибрежные леса, может служить естественной защитой от штормовых волн и цунами, а также удерживать почву и предотвращать эрозию.

**Системы раннего предупреждения.** Япония также активно развивает системы раннего предупреждения о штормах и цунами. Эти системы включают мониторинг погоды и морских условий, а также распространение предупреждающих сообщений и эвакуационных планов для населения в зоне потенциальной угрозы.

Одна из наиболее популярных форм волнорезов, применяемых в Японии — это тетраподы. Фигурные волнорезы, представляющие собой четырёхпалые блоки из усеченных конусов (рис. 12 а). В Японии первой их стала производить компания «Фудо Тетра» еще в 1961 г., попутно зарегистрировав «тетрапод» как свой товарный знак. Ряды таких фигурных волнорезов установлены у основания скал, вдоль берега или на мелководье от Хоккайдо до Окинавы практически везде, где проходят автодороги, железные дороги или находятся здания вблизи побережья [19].



а)



б)

Рис. 12. пляж в г. Атами, Сидзуока, Япония: а — защита берега тетраподами (фото 2003 г.); б — вид пляжа после реализации программы «Мероприятия по созданию красивой страны» (фото 2015 г.)<sup>1</sup>

Из-за большой распространенности тетраподов слово в японском обиходе стало нарицательным и порой может обозначать любой волнорез. Однако в публичном поле — на телевидении, в печатной продукции — слово «тетрапод» не употребляют из-за наличия товарного знака. Для обозначения всех конструкций подобного типа используется общий термин «сё ха бурокку» — «волнорассеивающий блок», то есть волнорез. Кроме упомянутого тетрапода, в Японии и в других странах используют волнорезы и других форм — плоские, фигурные, ступенчатые, коробчатые (рис. 13). Волнорезы могут быть разного размера, формы и веса — есть небольшие до 80 см и весом в 200 кг, а есть и гиганты весом в несколько десятков тонн.

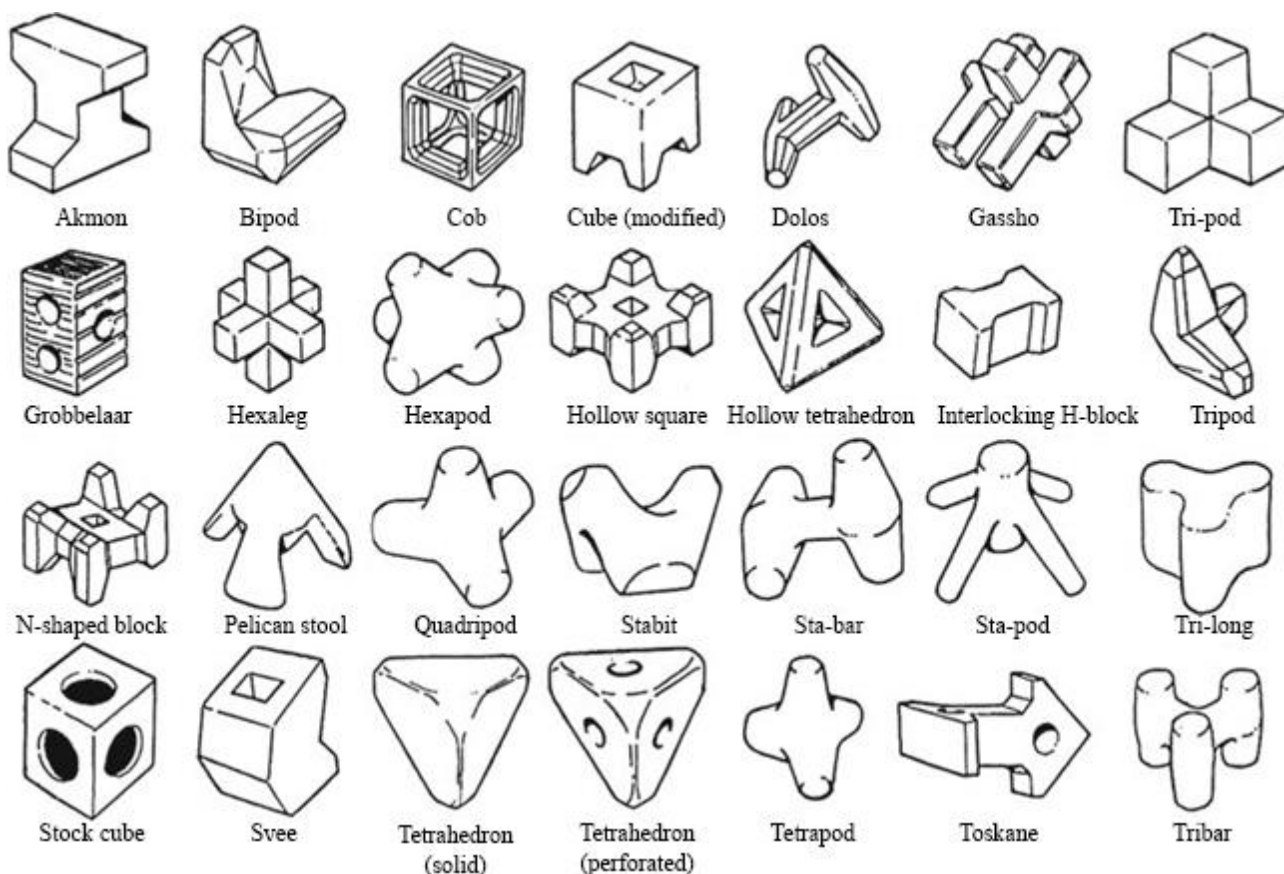
Главным недостатком такого способа берегозащиты являются неудобства, доставляемые отдыхающим в пляжных и других рекреационных зонах, а также не всегда эстетический вид этих сооружений и утрата живописных прибрежных пейзажей, что негативно сказывается и на туризме.

В этой связи в Японии отмечается тенденция к постепенной замене береговых волноотбойных сооружений устройством искусственных рифов в прибрежной акватории. Это высвобождает береговую зону и делает ее более привлекательной для отдыха и туризма.

В 2003 году Министерство земли, инфраструктуры, транспорта и туризма Японии запустило программу по улучшению внешнего вида страны. Один из пунктов этой программы — сокращение количества волнорезов и полное избавление от волнорезов в 9 наиболее живописных районах страны. Вместо волнорезов для защиты этих прибрежных территорий стали создавать искусственные рифы. Удачным примером такого решения можно считать реконструкцию пляжа и прибрежной территории курортного города Атами (рис. 12 б), расположенного на востоке (Тихоокеанском) побережье о. Хонсю в 100 км от г. Токио.

Комбинация вышеперечисленных инженерных решений и систем предупреждения позволяет Японии повысить безопасность своего побережья и снизить риски, связанные с природными бедствиями и эрозией.

<sup>1</sup> Тетраподы и другие бетонные обитатели японских побережий. Культурный центр «Японский дом». Блог. URL: <http://saison-group.ru/blog/733> (дата обращения 06.03.2024)

Рис. 13. Формы волнорезов, применяемых в Японии и других странах<sup>2</sup>

**4. Соединенные Штаты Америки.** В США защита берегов широко используется на побережье Атлантического океана, Тихого океана, Мексиканского залива и Великих озер. Здесь применяются насыпные стены, дюкеры, дамбы и другие конструкции для предотвращения эрозии берегов и защиты от ураганов и штормов.

США имеют богатый опыт инженерной защиты берегов, особенно на побережьях океанов, заливов и озер. Инженерные решения применяются для предотвращения эрозии береговой линии, защиты от ураганов и штормов, а также сохранения прибрежной инфраструктуры и экосистем<sup>3</sup>.

Один из известных примеров инженерной защиты берегов в США — это система дюн. Дюны представляют собой естественные или искусственные возвышенности из песка или гальки, которые располагаются вдоль побережья. Они служат естественным барьером против прилива и волн, предотвращая эрозию берега и защищая прибрежные территории. В США, особенно на побережье Атлантического океана и Мексиканского залива, созданы искусственные дюны, которые являются важным элементом защиты берегов от ураганов и штормов.

Применяются и другие инженерные решения для защиты берегов в США. Одним из них является строительство дамб и насыпей. Наиболее знаменитыми примерами таких инженерных сооружений являются система дамб в Новом Орлеане и система дамб в Долине Сан-Хоакин (рис. 14).

Также в США применяются различные морские инженерные сооружения, такие как штормовые барьеры, защитные фалы и прибрежные стены. Они предназначены для смягчения воздействия сильных волн и штормов, предотвращения эрозии берегов и защиты прибрежных поселений и инфраструктуры [19].

Помимо инженерных сооружений, США также активно используют методы управления побережьем. Это включает в себя управление песчаными пляжами, периодическое пополнение песчаных отложений, регулярную деградацию и переработку материалов на пляжах. Эти методы помогают сохранять и восстанавливать пляжи, обеспечивая естественную защиту береговой линии [20].

<sup>2</sup> Тетраподы и другие бетонные обитатели японских побережий. Культурный центр «Японский дом». Блог. URL: <http://saison-group.ru/blog/733/> (дата обращения 06.03.2024)

<sup>3</sup> Coastal Engineering. Preserve and protect shorelines and coastal resources, assets and communities. URL: <https://www.wsp.com/en-us/services/coastal-engineering> (дата обращения 06.03.2024).



Рис. 14. Система дамб в Сан-Хоакин (США) [19]

Опыт инженерной защиты берегов в США показывает необходимость комбинированного подхода, который включает в себя разнообразные методы и технологии. Это включает в себя строительство инженерных сооружений, управление песчаными пляжами, прогнозирование погодных условий и гидрологических параметров, а также широкое сотрудничество с местными и федеральными органами, научными учреждениями и сообществами.

**5. Великобритания.** В Великобритании инженерная защита берегов широко применяется на побережье Северного моря, Атлантического океана и Канала Ла-Манш. Здесь используются стены, волнорезы, дамбы и другие меры для предотвращения эрозии и защиты от штормов.

Великобритания имеет значительный опыт инженерной защиты берегов из-за своего протяженного побережья и угрозы приливов, штормов и эрозии. Страна разработала разнообразные стратегии и инженерные решения для защиты прибрежных территорий и сохранения береговой линии.

Один из примеров инженерной защиты берегов в Великобритании — это строительство волнорезов. Волнорезы являются структурами, установленными на берегу или в море, чтобы смягчить воздействие сильных волн и предотвратить эрозию берегов. Великобритания имеет разнообразные типы волнорезов, включая бетонные структуры, каменные молы, плавучие флотсамы и даже искусственные рифы. Эти структуры играют важную роль в защите побережья и поддержании его интегритета.

Еще один пример — это строительство морских дамб. Морские дамбы представляют собой искусственные структуры, соединяющие прибрежные точки и создающие барьер против наводнений и штормовых волн. Примером такой инженерной защиты является Темзис-барьер в Лондоне, который предотвращает наводнения от Северного моря и защищает прибрежные районы столицы [21].

Великобритания также активно использует пляжные регенерации, чтобы поддерживать и восстанавливать песчаные пляжи. Пляжные регенерации включают в себя перенос песчаного материала на пляжи, чтобы компенсировать эрозию и обеспечить естественную защиту береговой линии.

Опыт инженерной защиты берегов в Великобритании также подкрепляется широким использованием гидрологических моделей и прогнозных систем, которые помогают прогнозировать приливы, волны и наводнения. Это позволяет принимать своевременные меры по защите берегов и предупреждению потенциальных угроз.

Важным аспектом инженерной защиты берегов в Великобритании является учет экологических аспектов и воздействия на окружающую среду. Проекты строительства и реконструкции проводятся с учетом сохранения природных биотопов, местной фауны и флоры, а также с учетом экологической устойчивости.

Опыт Великобритании в области инженерной защиты берегов может быть ценным для других стран, сталкивающихся с аналогичными проблемами. Он демонстрирует важность разнообразных подходов, включающих в себя строительство инженерных сооружений, использование природных процессов, применение прогнозных систем и учет экологических последствий.

**6. Италия** имеет значительный опыт инженерной защиты берегов, особенно в связи с проблемами эрозии, наводнений и устойчивого развития побережий. Страна разработала различные стратегии и инженерные решения для защиты берегов и сохранения прибрежных территорий [22].

Один из наиболее известных примеров инженерной защиты берегов в Италии — это система молов (molo). Молы представляют собой искусственные структуры, которые простираются в море параллельно берегу и служат для смягчения воздействия волн, предотвращения эрозии и сохранения песчаных пляжей. Молы могут быть выполнены из бетона, камня, дерева или комбинации различных материалов.

В Италии также широко используются дамбы и волнорезы для защиты береговых зон от штормовых волн и приливов. Некоторые из наиболее известных примеров включают Гребной Мур в Венеции, который предотвращает наводнения в городе, и систему волнорезов в Сицилии для защиты от волн в Средиземном море.

Кроме того, Италия активно использует прибрежные регенерации для поддержания и восстановления пляжей и прибрежной экосистемы. Прибрежные регенерации включают в себя перенос песчаного материала на пляжи для компенсации эрозии и обеспечения естественной защиты береговой линии.

Италия также разрабатывает и применяет инновационные подходы к инженерной защите берегов. Например, экологические решения, такие как создание искусственных островов и восстановление морских прибрежных зон, предлагаются в качестве устойчивых альтернатив для защиты берегов и развития прибрежных территорий.

Важным аспектом инженерной защиты берегов в Италии является сотрудничество с учеными, научными учреждениями и сообществами. Италия активно проводит исследования в области гидрологии, гидрографии и морской экологии для разработки наиболее эффективных и устойчивых решений [23].

Опыт инженерной защиты берегов в Италии может служить важным уроком для других стран, сталкивающихся с аналогичными проблемами. Это подчеркивает необходимость комплексного подхода, включающего разнообразные инженерные решения, экологические аспекты, учет местных условий и активное взаимодействие с заинтересованными сторонами.

Это только несколько примеров стран, где активно применяется инженерная защита берегов. Однако по мере необходимости подобные меры могут применяться практически во всех странах с прибрежными зонами.

**Результаты исследования.** Обзор зарубежного опыта инженерной защиты берегов показывает, что различные страны разработали разнообразные стратегии и инженерные решения для защиты берегов от эрозии, наводнений и других природных угроз. Важными аспектами этого опыта являются [24]:

Разнообразие инженерных сооружений: разные страны используют различные типы инженерных сооружений для защиты берегов. Примерами являются дюны, дамбы, волнорезы, молы, искусственные острова и другие структуры. Каждый тип сооружения имеет свои преимущества и применяется в зависимости от особенностей местных условий и угроз.

Учет экологических аспектов: многие страны придают большое значение сохранению экосистем и устойчивому развитию при разработке инженерных решений для защиты берегов. Включение природных процессов, использование природных материалов, создание искусственных рифов и восстановление прибрежных зон — все это направлено на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду.

Интегрированный подход: успешные стратегии инженерной защиты берегов обычно включают интегрированный подход, который объединяет инженерные сооружения, гидрологические исследования, прогнозные системы, учет экологических последствий и широкое вовлечение сообществ и заинтересованных сторон. Сотрудничество между государственными органами, научными учреждениями, местными сообществами и экспертами играет важную роль в разработке эффективных и устойчивых решений.

Непрерывное исследование и инновации: страны постоянно исследуют новые технологии и инновационные подходы для улучшения инженерной защиты берегов. Это включает в себя использование новых материалов, применение искусственного интеллекта и развитие прогнозных систем для более точного прогнозирования и управления угрозами.

**Обсуждение и заключение.** Обзор зарубежного опыта инженерной защиты берегов показывает важность комплексного подхода, учета экологических аспектов и непрерывного исследования. На основе этого опыта можно выделить лучшие практики, которые могут быть адаптированы и применены в других странах, с учетом их конкретных потребностей и местных условий.

Положительный опыт защиты берегов и склонов от опасных геологических процессов может использоваться для решения аналогичных задач на Черноморском побережье Кавказа и других регионов России.

## Список литературы

1. Прокопов А.Ю., Акопян В.Ф., Ким Р.В. О причинах и последствиях оползневых процессов в районе ул. Медовой Адлерского района г. Сочи. *Известия РГСУ*. 2015;20:48–57.
2. Хамидуллина Н.В., Прокопова М.В., Прокопов А.Ю. Физическое моделирование провалов земной поверхности. *Вестник РГУПС*. 2019;2(74):124–131.
3. Прокопов А.Ю., Лебидко В.А. Выбор и обоснование методов берегоукрепления (на примере р. Кубань в г. Краснодаре). *Известия РГСУ*. 2015;20:41–48.
4. Прокопов А.Ю., Адоньев Н.А. Анализ существующих методов берегозащиты, применяемых на Черноморском побережье Кавказа. В: *Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники. 2023»*. Ростов-на-Дону: ДГТУ; 2023. С. 287–289.
5. Куштин В.И., Турчик С.Е., Глинская О.С. Анализ современных методов получения геопространственной информации при мониторинге объектов железнодорожной инфраструктуры. *Инженерный вестник Дона*. 2022;11(95):18–25. <http://ivdon.ru/magazine/archive/n11y2022/8004> (дата обращения 09.03.2024).
6. Звезгинцева А.А., Василенко М.И. Некоторые аспекты благоустройства прибрежных зон населенных пунктов. В: *Сборник докладов Всероссийской научной конференции «Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования»*. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова; 2020. С. 289–293.
7. Ефремова Т.В., Долотов В.В. Последствия техногенного воздействия на южные и западные берега Черного моря. В: *Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана»*. Москва: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН; 2021. С. 449–450.
8. Sun J., Zhu Z., Song J., Guo J., Cai Y., Fu Y. et al. Research on multivariate Yellow sea SST week prediction method based on Encoder-Decoder LSTM. *Системы контроля окружающей среды*. 2022;1(47):5–14. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2022-1-5-14>
9. Kazmin A.S. Fronts in the Yellow and East China Seas: the Case Study. *Journal of Oceanological Research*. 2018;46(3):20–34. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46\(3\).2](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(3).2)
10. Мороз В.В., Богданов К.Т., Ростов В.И., Ростов И.Д. *Атлас приливов Берингова, Охотского, Японского и Восточно-Китайского морей. Том 10*. Владивосток: Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 2007.
11. Долгих Г.И., Будрин С.С., Швеиц В.А., Яковенко С.В. Определение областей формирования волн «предвестников» тайфунов, проходящих над Восточно-Китайским и Японским морями. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2023;513(2):245–249.
12. Турлов А.Г. Математическая модель системы инженерной защиты берегов водохранилища с использованием дренажных вод на орошение. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии»*. 2021;3(19):64–76.
13. Dörrie R., Laghi V., Arrè L., Kienbaum G., Babovic N., Hack N. et al. Combined Additive Manufacturing Techniques for Adaptive Coastline Protection Structures. *Buildings*. 2022;12(11):1806. <https://doi.org/10.3390/buildings12111806>
14. Kok S., Bisaro A., de Bel M., Hinkel J., Bouwer L.M. The Potential of Nature-Based Flood Defences to Leverage Public Investment in Coastal Adaptation: Cases from the Netherlands, Indonesia and Georgia *Ecological Economics*. 2021;179:106828. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106828>
15. Singhvi A., Luijendijk A.P., van Oudenhoven A.P.E. The Grey–Green Spectrum: A Review of Coastal Protection Interventions. *Journal of Environmental Management*, 2022;311:114824. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114824>
16. Huang Z., Zhao D., Wang L. Seismic heterogeneity and anisotropy of the Honshu arc from the Japan Trench to the Japan Sea. *Geophysical Journal International*. 2011;184(3):1428–1444. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.04934.x>
17. Shimozone T., Tajima Y., Kumagai K., Arikawa T., Oda Y., Shigihara Y. et al. Coastal Impacts of Super Typhoon Hagibis on Greater Tokyo and Shizuoka Areas, Japan. *Coastal Engineering Journal*. 2020;62(2):129–145. <https://doi.org/10.1080/21664250.2020.1744212>
18. Udo K., Ranasinghe R., Takeda Y. An Assessment of Measured and Computed Depth of Closure Around Japan. *Scientific Reports*. 2020;10(1):2987. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59718-5>

19. Luan Y-n, Li D, Chen H-b, Geng B-l, Liu H-y. Review of Ecological Coast Construction Technology. In: *Proceedings of the International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*. Vientiane. Laos; 2020. P. 181-186. <https://doi.org/10.1109/ICITBS49701.2020.00045>
20. Ysebaert T., Walles B., Haner J., Hancock B. Habitat Modification and Coastal Protection by Ecosystem-Engineering Reef-Building Bivalves. In book: *Goods and Services of Marine Bivalves*. Cham: Springer; 2019. P. 253–273. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-96776-9\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96776-9_13)
21. Staudt F., Gijsman R., Ganai C., Mielek F., Wolbring J., H. Hass C. et al. The Sustainability of Beach Nourishments: a Review of Nourishment and Environmental Monitoring Practice. *Journal of Coastal Conservation*. 2021;25(34):1–24. <https://doi.org/10.1007/s11852-021-00801-y>
22. Bruno M.F., Saponieri A., Molfetta M.G., Damiani L. The DPSIR Approach for Coastal Risk Assessment Under Climate Change at Regional Scale: The Case of Apulian Coast (Italy). *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020;8(7):531. <https://doi.org/10.3390/jmse8070531>
23. Davoli L., Raffi R., Baldassarre M.A., Bellotti P., Di Bella L. New Maps Relative to the Special Protection Area of the Palude Di Torre Flavia (Central Tyrrhenian Sea-Italy) Prone to Severe Coastal Erosion. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*. 2019;2:5–12. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2019-02.O-01>
24. Morris R.L., Bilkovic D.M., Boswell M.K., Bushek D., Cebrian J., Goff J. et al. The Application of Oyster Reefs in Shoreline Protection: Are We Over-Engineering for an Ecosystem Engineer? *Journal of Applied Ecology*. 2019;56(7):1703–1711. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13390>

## References

1. Prokopov AYu, Akopyan VF, Kim RV. On The Causes and Consequences of Landslide Processes in the Area of Medovaya Street, Adler District, Sochi. *Izvestiya RGSU*. 2015;20:48–57. (In Russ.).
2. Hamidullina NV, Prokopova MV, Prokopov AYu. Physical Modeling of Failures of the Ground Surface. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya* (Vestnik RGUPS. 2019;(2(74)):124-131. (In Russ.).
3. Prokopov AYu, Lebedko VA. Selection and Justification of Shore Protection Methods (on the Example of the Kuban River in Krasnodar). *Izvestiya RGSU*. 2015;20:41–48. (In Russ.).
4. Prokopov AYu, Adoniev NA. Analysis of Existing Coastal Protection Methods Used at the Black Sea Coast. In: *Proceedings of the All-Russian (National) Scientific and Practical Conference "Topical Problems of Science and Technology. 2023"*. Rostov-on-Don: DSTU; 2023. P. 287-289. (In Russ.).
5. Kushtin VI, Turchik SE, Glinskaya OS. The Analysis of the Modern Methods of Obtaining Geospace Information for Railway Infrastructure Objects Monitoring. *Engineering Journal of the Don*. 2022;(11(95)):18-25. <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/> (accessed: 9.03.2024). (In Russ.).
6. Zvegintseva AA, Vasilenko MI. Some Aspects of the Improvement of Coastal Areas of Settlements. In: *Proceedings of the All-Russian Scientific Conference "Safety, Protection and Preservation of the Natural Environment: Fundamental and Applied Research"*. Belgorod: BSTU named after V. G. Shukhov; 2020. P. 289-293. (In Russ.).
7. Efremova TV, Bolotov VV. Consequences of man-made impact on the southern and western shores of the Black Sea. In: *Proceedings of the VI All-Russian Scientific Conference of Young Scientists "Integrated Research of the World Ocean"*. Moscow: P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences; 2021. P. 449-450. (In Russ.).
8. Sun J, Zhu Z, Song J, Guo J, Cai Y, Fu Y, et al. Research on Multivariate Yellow Sea SST Week Prediction Method Based on Encoder-Decoder LSTM. *Monitoring systems of environment*. 2022;1(47):5–14. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2022-1-5-14>
9. Kazmin AS. Fronts in the Yellow and East China Seas: the Case Study. *Journal of Oceanological Research*. 2018;46(3):20–34. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46\(3\).2](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(3).2)
10. Moroz VV, Bogdanov KT, Rostov VI, Rostov ID. *Atlas of Tides of the Bering, Okhotsk, Japanese and East China Seas*. Volume 10. Vladivostok: V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch RAS; 2007. (In Russ.).
11. Dolgikh GI, Budrin SS, Shvets VA, Yakovenko SV. Determination of “Forerunner”-Waves Formation Zones for Typhoons Passing over the East China and Japan Sea. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle*. 2023;513(2):245–249. (In Russ.).
12. Turlov AG. Mathematical Model of the Engineering Protection of the Shore Reservoirs with the Use of Drainage Water for Irrigation. *Vestnik of Volga State University of Technology Series «Forest. Ecology. Nature Management*. 2021;3(19):64–76. (In Russ.).
13. Dörrie R, Laghi V, Arrè L, Kienbaum G, Babovic N, Hack N, et al. Combined Additive Manufacturing Techniques for Adaptive Coastline Protection Structures. *Buildings*. 2022;12(11):1806. <https://doi.org/10.3390/buildings12111806>

- Об авторах:*

*Заявленный вклад авторов:*

**Принята к публикации 12.03.2024**

*About the Authors:*

**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, 344003, RF), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [prokopov72@rambler.ru](mailto:prokopov72@rambler.ru)

**Nikita A. Adoniev**, PhD Student of the Engineering Geology, Footings and Foundations Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [nikitaad1999@gmail.com](mailto:nikitaad1999@gmail.com)

*Claimed contributorship:*

AYu Prokopov: setting the objective, conducting field research and photographic evidences of objects in the People's Republic of China, describing and systematising the methods of engineering protection of coasts and hillslopes in the People's Republic of China.

NA Adoniev: search, analysis and systematisation of literature sources on coastal engineering protection used in the Netherlands, Japan, the USA, Great Britain and Italy, formulating the recap and conclusions.

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

*All authors have read and approved the final manuscript.*

**Received** 01.03.2024

**Revised** 11.03.2024

**Accepted** 12.03.2024

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

## CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS



УДК 691

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-48-56>

### Строительные отходы с позиции теории устойчивости дисперсных систем

О.Н. Парамонова , Н.В. Юдина 

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

✉ [paramonova\\_oh@mail.ru](mailto:paramonova_oh@mail.ru)

EDN: PGLYRK

#### Аннотация

**Введение.** Ежегодно растущие масштабы строительства зданий и сооружений в крупных городах приводят к образованию и накоплению значительного количества широкого номенклатурного ряда строительных отходов различного агрегатного состояния. При этом каждый вид отходов характеризуется определенным набором параметров свойств, определяющим в дальнейшем возможность его вторичного использования, что ставит перед обществом актуальные задачи не только в сфере снижения загрязнения окружающей среды, но и размещения, а в лучшем случае, переработки отходов.

Для решения обозначенных задач крайне важными данными об отходах должны служить характеристики их свойств, определяющие поведение строительных отходов в окружающей среде.

Исследования отечественных и зарубежных ученых в сфере решения проблем утилизации строительных отходов практически не рассматривают особенности их поведения в окружающей среде, а также недостаточно раскрывают взаимосвязь характерных особенностей компонентов отходов с характеристиками окружающей среды и не в полной мере учитывают граничные условия, относящиеся к этой взаимосвязи.

Именно поэтому авторами статьи предлагаются результаты исследований, посвященных классификации характерных особенностей строительных отходов по группам параметров их свойств с позиции теории устойчивости дисперсных систем. При этом параметры свойств строительных отходов рассматриваются для дисперсной фазы и дисперсионной среды, а в качестве основного классификационного признака выбрана физическая сущность процессов и явлений, наблюдаемых в строительных отходах.

Таким образом, целью исследования является анализ и систематизация свойств строительных отходов, базирующиеся на теории устойчивости дисперсных систем, с точки зрения расширения сферы их повторного применения в различных отраслях хозяйственной деятельности.

**Материалы и методы.** Объектом исследования выбраны строительные отходы, образующиеся в результате осуществления технологических процессов на предприятиях строительной индустрии. Строительные отходы и их свойства показаны с точки зрения теории устойчивости дисперсных систем. Распределение параметров свойств строительных отходов проведено на основе физических процессов и явлений, которые характерны для того или иного вида отхода. Свойства строительных отходов и параметры, описывающие их, представлены в комплексе для дисперсной фазы и дисперсионной среды.

**Результаты исследования.** В результате проведенных исследований систематизированы обобщенные параметры свойств строительных отходов на основе применения теории устойчивости дисперсных систем с точки зрения расширения области их повторного применения в хозяйственной деятельности и, тем самым, снижения загрязнения окружающей среды.

**Обсуждение и заключение.** Предложенная систематизация характеристик строительных отходов позволит:

- изменять их поведение в окружающей среде с целью снижения загрязнения среды и выделения компонентов отходов из нее для их дальнейшего применения в хозяйственной деятельности с предшествующей этому подготовкой по необходимым результирующим параметрам свойств;
- снижать устойчивость отходов, т. е. способность отхода сопротивляться внешним воздействиям, и за счет этого также обеспечивать уменьшение загрязнения окружающей среды на заключительном этапе их жизненного цикла.

**Ключевые слова:** строительство, строительные отходы, свойства строительных отходов, вторичное использование строительных отходов, жизненный цикл

**Для цитирования.** Парамонова О.Н., Юдина Н.В. Строительные отходы как вторичные материальные ресурсы с позиции теории устойчивости дисперсных систем. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(1):48–56. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-48-56>

Research article

## Construction Waste from Perspective of the Disperse Systems Stabilisation Theory

Oksana N. Paramonova  , Natalya V. Yydina 

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

 [paramonova\\_oh@mail.ru](mailto:paramonova_oh@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** Every year, the scale of construction of buildings and structures in the large cities increases, thus leading to generation and accumulation of a considerable amount of a wide range of different sort of construction waste in various aggregate states. At the same time, each type of waste is characterised by a certain set of properties with the parameters that determine the possibility of its future reuse, therefore there arise the urgent problems to be solved by society not only concerning the reduction of the environmental pollution, but also disposal, and at best recycling the waste.

The data on the specifications of the construction waste properties, which determine its behaviour in the environment, is extremely important for solving these problems.

In the works of the native and foreign scientists on solving the construction waste management problems, the features of its behaviour in the environment were hardly ever studied, nor was the relationship between the distinctive features of its components and the environment characteristics enough revealed, and the boundary conditions referring to this relationship were not fully taken into account.

That is why the authors present the results of the research on the classification of the distinctive features of the construction waste by grouping the parameters of their properties based on the theory of disperse systems stabilisation. Besides, the parameters of the construction waste properties have been investigated both for the dispersed phase and the dispersion medium, whereas the physical entity of the processes and phenomena observed in the construction waste has been chosen as the main classification criteria.

Thus, the research aims to analyse and systematise the construction waste properties, based on the theory of disperse systems stabilisation in terms of extending the scope of the waste reuse in various sectors of economy.

**Materials and Methods.** The object of the study is the construction waste generated in a result of the technological processes at the enterprises of the construction industry. Construction waste and its properties are investigated from perspective of the theory of disperse systems stabilisation. The classification of the parameters of the construction waste properties is carried out on the basis of the physical processes and phenomena that are characteristic for a particular type of waste. The construction waste properties and the parameters describing them are presented both for the dispersed phase and the dispersion medium.

**Results.** As a result of the conducted research, the generalised parameters of the construction waste properties have been systematised based on the theory of disperse systems stabilisation in terms of extending the scope of the waste reuse in the business activities that leads to reducing the environmental pollution.

**Discussion and Conclusions.** The proposed classification of the construction waste parameters will make it possible:

- to change the behaviour of the waste in the environment aiming to reduce the environmental pollution and to extract the waste components from the environment for their further reuse in the business activity after pre-treatment resulting in the necessary property parameters;
- to decrease waste stability, i.e. its ability to resist the external impacts, and thereby also ensure the reduction of the environmental pollution at the final stage of the waste life cycle.

**Keywords:** construction, construction waste, construction waste properties, construction waste reuse, life cycle

**For citation.** Paramonova ON, Yydina NV. Construction Waste from Perspective of the Disperse Systems Stabilisation Theory. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(1):48–56. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-48-56>

**Введение.** В настоящее время строительство зданий и сооружений происходит с достаточно большой скоростью, что влечет за собой увеличение темпов производства строительных материалов, рост количества сносимых построек и демонтируемых ветхих сооружений, а следовательно, увеличивается объем образующихся отходов строительства [1, 2].

Перечень строительных отходов содержит десятки наименований, которые усложняют классификацию, учет, сбор и переработку.

Существующие классификации строительных отходов крайне разнообразны, но односторонни — не рассматривают особенности поэтапного поведения строительных отходов в окружающей среде, что может приводить к изменению их свойств. Цель данного исследования — анализ и систематизация свойств строительных отходов, базирующиеся на теории устойчивости дисперсных систем, с точки зрения расширения сферы их повторного применения в различных отраслях хозяйственной деятельности.

Жизненный цикл (ЖЦ) строительных отходов может происходить в различных условиях и состоять из следующих основных этапов, каждый из которых связан с проявлением различных параметров свойств отходов [3–9] (рис. 1).

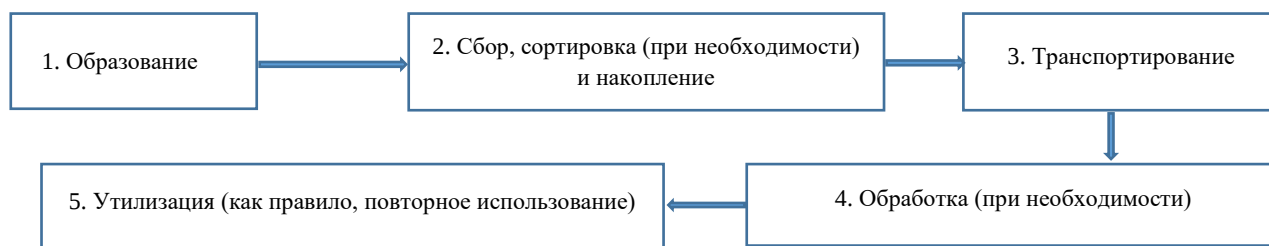


Рис. 1. Принципиальная схема ЖЦ строительных отходов

Существующие подходы к систематизации сведений об отходах строительства базируются на следующих классификационных признаках: источник происхождения; стадия технологического процесса; вид отхода по агрегатному состоянию; объемы образования; класс опасности; возможности вторичного использования; степень изученности и разработанности технологий утилизации [7–9, 10].

Строительные отходы можно утилизировать с помощью многочисленных современных технологий, выбор которых зависит от нескольких параметров, позволяющих выделить 3 основные категории отходов (рис. 2).

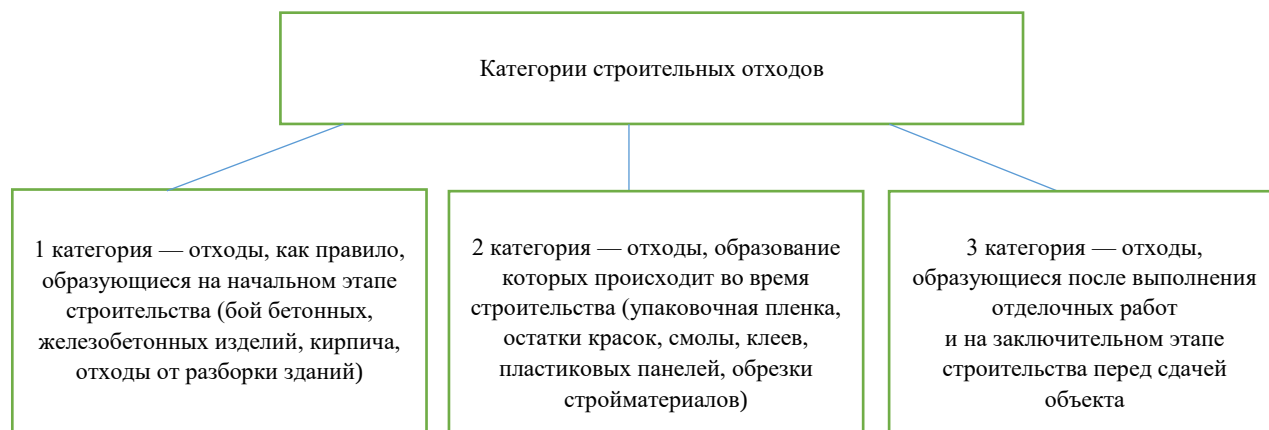


Рис. 2. Категории строительных отходов [11–13]

Помимо представленной выше классификации, строительные отходы можно разделить на:

- сырьевые отходы, представляющие собой остатки сырьевых материалов, не изменивших своих основных свойств (кора древесины, отходы щебня, керамзита и пр.);
- отходы строительного производства (бой кирпича, бой керамической плитки, застывшего раствора, тара из-под ЛКМ, бой стекла и др.) [12–14].

Классификация строительных отходов с позиции возможности их вторичного использования позволяет выделить:

- пригодные для вторичного использования отходы (либо в качестве вторичного ресурса, либо в качестве вторичного сырья);
- не обладающие полезными свойствами отходы и направляемые в конечном итоге на захоронение [5, 15–17].

Строительные отходы, прежде чем выбрать способ их переработки для вторичного использования, можно классифицировать по наиболее часто встречающимся дефектам в строительных материалах/конструкциях в зависимости от типа материала. Так основными можно выделить 4 типа материалов: деревянные, металлические, железобетонные и каменные. Дефектами в конструкциях из них могут быть:

- в деревянных: механические повреждения, увлажнение, поражения гнилью, прогибы, провисания и т. п.;
- в металлических: прожоги, коррозия, погнутость, трещины по сварным швам;
- в железобетонных: разрушение от размораживания, поражение арматуры и материала ржавчиной, возникновение трещин, сколов граней, отслоений защитного слоя и т. п.;
- в каменных: разрушение кирпичной кладки, сколы кирпичной кладки, наклонные, горизонтальные и вертикальные трещины и т. д.

На практике широкое распространение использования строительных отходов определяется их физическими и химическими свойствами, техническими возможностями их переработки и другими факторами. Поэтому, исходя из многообразия применяемых к классификации строительных отходов классификационных признаков, вопрос изучения и систематизации их свойств, что по мнению авторов должно рассматриваться в качестве основного классификационного признака, для расширения области их повторного применения, является весьма актуальным [7–9, 11].

Актуальность данного вопроса подкрепляется необходимостью обеспечения экологически безопасных условий при организации всех стадий процесса строительства зданий и сооружений различных назначений.

**Материалы и методы.** Объектом исследования выбраны строительные отходы, образующиеся в результате осуществления технологических процессов на предприятиях строительной индустрии. Строительные отходы и их свойства систематизированы по группам параметров на основе использования положений теории устойчивости дисперсных систем. Распределение параметров свойств строительных отходов проведено на основе физических процессов и явлений, которые характерны для того или иного вида отхода. Свойства строительных отходов и параметры, описывающие их, представлены в комплексе для дисперсной фазы и дисперсионной среды.

Предложенная систематизация характеристик строительных отходов, базирующаяся на сборе и обработке информации и статистических данных, анализе и синтезе результатов отечественных и зарубежных литературных источников, по мнению авторов, позволит изменять поведение отходов в окружающей среде, меняя нужные свойства, что дает возможность, в свою очередь, снизить загрязнение среды и за счет выделения компонентов отходов из нее применять их повторно в хозяйственной деятельности.

**Результаты исследования.** Значительные масштабы образования и накопления отходов строительства обуславливают загрязнение компонентов окружающей среды урбанизированных территорий, что требует незамедлительного участия общества в решении злободневных проблем уменьшения загрязнения, а также разработки инновационных методов утилизации отходов. Именно поэтому решению данных проблем должны способствовать сведения об их свойствах.

В современном научном мире существует многообразие подходов к изучению свойств отходов (и строительных в том числе), опирающихся на различные характеристики самих отходов. Однако практически ни один из известных подходов не раскрывает взаимосвязь характеристик строительных материалов и образующихся из них отходов с характеристиками компонентов окружающей среды [18–22].

На каждом этапе ЖЦ строительных отходов наблюдается загрязнение компонентов окружающей среды, причем в действительности процесс загрязнения может осуществляться как последовательно, так и одновременно в пространственных и временных условиях [13, 15]. Однако последствия загрязнения могли бы быть менее значительными, если бы учитывались и своевременно изменялись необходимые параметры свойств строительного отхода с целью выделения пригодных для применения компонентов отхода из окружающей среды и направления их на повторное использование.

Поэтому важно рассматривать этапы ЖЦ строительных отходов и их поведение в окружающей среде с учетом происходящих в ней физических и пр. процессов комплексно. Целостность характеристик таких процессов показывает их взаимосвязь и, наряду с этим, может акцентировать доминирующее влияние какого-то одного из процессов. Такое влияние характеризуется взаимной связью параметров свойств отхода в целом, а если детализировать процесс согласно теории устойчивости дисперсных систем — характеристиками свойств дисперсных фаз (ДФ) и дисперсионной среды (ДС) отхода, а также параметрами окружающей среды и т. д. [7].

Различные характеристики, описывающие свойства строительных отходов, устанавливают широкий диапазон параметров, определяющих дисперсную фазу каждой номенклатуры отходов и характеристики дисперсионной среды, которые, в свою очередь, требуют систематизации. Поэтому нами предпринята попытка сгруппировать эти параметры с учетом физических характеристик явлений, наблюдаемых в строительных отходах (рис. 3) [7, 23, 24].

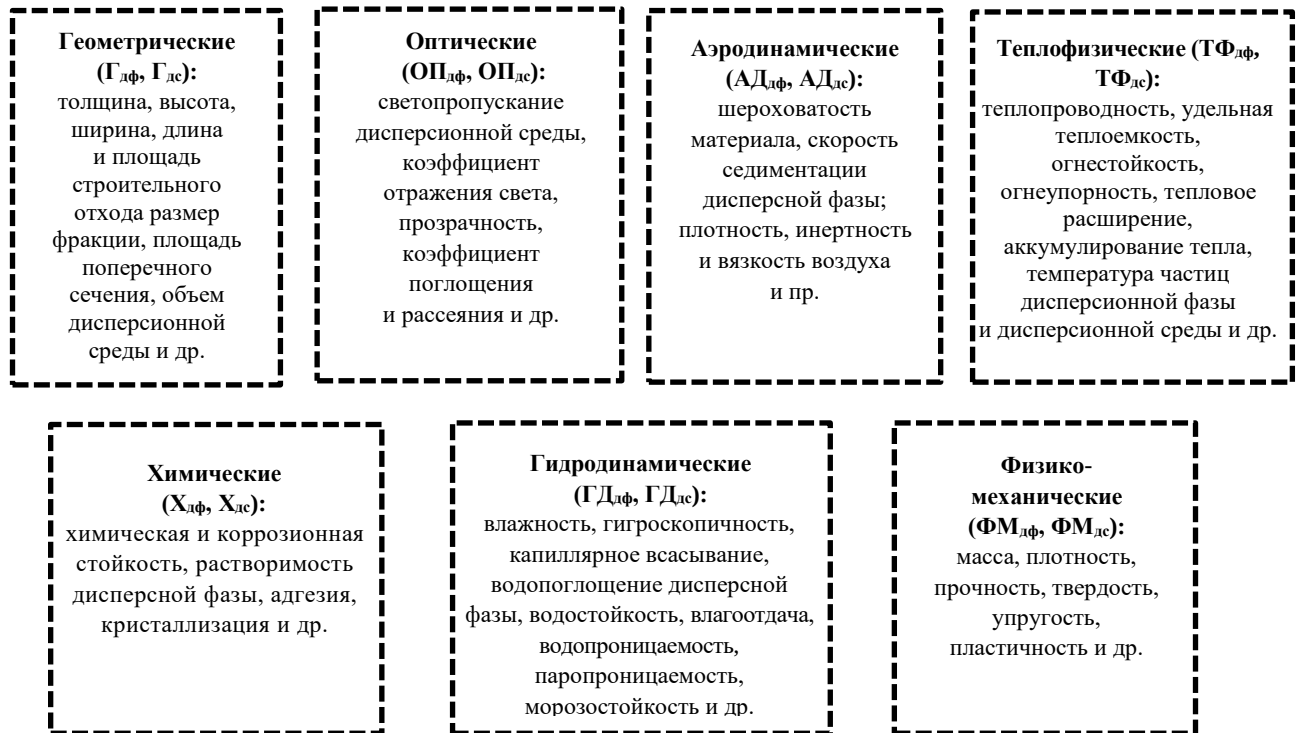


Рис. 3. Группы параметров свойств строительных отходов [1, 11]

Изучение свойств ДС и ДФ укрупненных групп строительных отходов согласно представленным выше классификациям позволило установить связь групп параметров фазовых элементов (частиц, остатков строительного отхода). Эту связь можно представить совокупностью параметров строительных отходов в целом ( $K_{стр.отх.}$ ). Тогда эту функциональную зависимость между группами параметров фазовых составляющих строительных отходов можно представить в следующем виде:

$$K_{стр.отх.} = f_1(K_{ДФ}, K_{ДС}), \quad (1)$$

где  $K_{ДФ}$  — совокупность параметров, определяющих свойства ДФ строительных отходов;  $K_{ДС}$  — совокупность параметров, определяющих свойства ДС строительных отходов.

Такое рассмотрение свойств строительных отходов, основанное на обобщении параметров ( $K_{стр.отх.}$ ), описывающих эти свойства, позволит расширять теоретические знания за счет дополнения каждой группы параметров ДФ и ДС новыми характеристиками, что, в свою очередь, позволит оценить все аспекты динамики строительных материалов и отходов на каждом этапе их ЖЦ в окружающей среде [7–9].

Помимо этого, параметры свойств отходов определяют их энергетический ресурс, т. е. в процессе ЖЦ строительные материалы и отходы приобретают, распределяют и расходуют энергию. Количественно охарактеризовать такое перераспределение энергии можно энергетическими параметрами, которые, как показали результаты исследований, определяются взаимосвязанным комплексом групп параметров свойств ДФ и ДС строительных отходов.

Компоновка параметров свойств выделенных групп для ДФ и ДС строительных отходов создает энергетические параметры строительных отходов, которые в совокупности определяют суммарную свободную энергию строительных отходов ( $W_{S стр.отх.}$ ). Она, в свою очередь, функционально зависит от отдельных энергетических параметров ДФ и ДС строительных отходов. Тогда, выборочно оперируя значимыми энергетическими параметрами для определенного вида строительного отхода, можно перераспределять отдельные виды энергии (кинетическая, тепловая, электромагнитная и др.). Подобное перераспределение даст возможность изменять поведение строительных отходов в окружающей среде, что позволит снизить их негативное воздействие на компоненты окружающей среды за счет своевременного недопущения, удаления, попадания, распространения [7–9, 13–16].

Теория дисперсных систем отражает взаимосвязь параметров свойств, энергетических параметров и в конечном счете устойчивости. Таким образом, особенности поведения в окружающей среде, которые проявляют строительные материалы и отходы согласно теории устойчивости дисперсных систем, находятся в зависимости от запаса  $W_{S стр.отх.}$ , что оказывает влияние и на устойчивость (устойчивое состояние в окружающей среде):  $W_{S стр.отх.} \sim U_{стр.отх.}$ .

В современных словарях под устойчивостью понимают укрупненно жизнеспособность дисперсной системы или характеристику интенсивности изменения параметров свойств и энергетических параметров дисперсной системы за определенный промежуток времени в условиях воздействий извне.

Управление данной характеристикой позволяет изъять частицы (отходы) из окружающей среды без возможности их распределения/распространения в среде, куда они поступили. Так уменьшение устойчивости дисперсных систем приводит либо к укреплению частиц ДС (рекристаллизация), либо к слипанию и укрупнению этих частиц (происходит образование агрегатов) [7–9], что позволяет изъять эти частицы из среды.

В результате проведенных исследований авторы пришли к следующим выводам:

- изучение строительных отходов с позиции теории устойчивости дисперсных систем позволит отслеживать поведение строительных отходов в окружающей среде в процессе их ЖЦ;
- полученные в процессе слежения сведения о поведении строительных отходов в окружающей среде позволят рассматривать определенный вид отхода либо как элемент загрязнения окружающей среды, либо как вторичный материальный (энергетический) ресурс;
- сведения о параметрах свойств строительных отходов, их энергетических параметрах и устойчивости дадут возможность корректировать эти параметры, что в свою очередь, обеспечит возможность выбора и/или разработки принципиально новых технологий для вторичного использования строительных отходов.

**Обсуждение и заключение.** В результате проведенных исследований можно заключить, что анализ и систематизация параметров свойств, энергетических параметров и устойчивости строительных отходов позволят управлять поведением строительных отходов в окружающей среде с целью уменьшения их устойчивости и в итоге снижения загрязнения компонентов окружающей среды, а наряду с этим, расширения области их повторного применения.

#### Список литературы

1. Беспалов В.И., Парамонова О.Н. Классификационно-методические основы борьбы с загрязнением окружающей среды твердыми отходами потребления. В: *Материалы международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2012»*. Одесса: Купrienko; 2012.
2. Лапина О.А., Лапина А.П. Экологическая оценка строительных материалов. *Вестник евразийской науки*. 2013;5(18):132. URL: <https://naukovedenie.ru/index.php?p=issue-5-13> (дата обращения 04.02.2024).
3. Гориславко Д.М., Ворона-Сливинская Л.Г. Классификация строительных отходов и расчет их количества. В: *Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Инновационные методы организации строительного производства»*. Санкт-Петербург: СПбГТУ; 2021. С. 205–209. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47176056&pff=1> (дата обращения 04.02.2024).
4. Козлова Е.В., Заворзаев А.А., Трофимов Д.В., Ступин А.А. Отходы строительства и вторичное использование ресурсов строительства. *Вестник Коломенского института (филиала) Московского политехнического университета*. 2020;13:157–162. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44733044> (дата обращения 04.02.2024).
5. Лунев Г.Г., Прохоцкий Ю.М. Вторичные строительные ресурсы: эколого-экономический подход к классификации. *Компетентность*. 2019;7:18–23. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vtorichnye-stroitelnye-resursy-ekologo-ekonomicheskiy-podhod-k-klassifikatsii> (дата обращения 04.02.2024).
6. Davis P., Aziz F., Tanvi Newaz M., Sher W., Simon L. The Classification of Construction Waste Material Using a Deep Convolutional Neural Network. *Automation in Construction*. 2021;122:103481. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103481>
7. Парамонова О.Н. Рассмотрение твердых отходов потребления как дисперсной системы. *Инженерный вестник Дона*. 2013;3(26):148. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1933> (дата обращения 04.02.2024).
8. Paramonova O., Bepalov V., Gurova O., Alekseenko L., Tsarevskaya I. Dynamics of Changes in the Properties of Municipal Solid Waste in the Environment. In: *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018: Volume 2*. Cham: Springer International Publishing; 2019. P. 960–970. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8\\_95](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8_95)
9. Штенске К.С., Парамонова О.Н. Исследование параметров свойств асбеста в кусковой форме как отхода, образующегося в литейном производстве. *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. 2021;1(35):42–46. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44905759> (дата обращения 04.02.2024).
10. Ахмед А.А.А., Аль-Бу-Али У.С.Д. Утилизация строительных отходов. *Наука и инновации в строительстве*. 2018;347–352.

11. Барахтенко В.В., Бурдонов А.Е., Зелинская Е.В., Толмачева Е.Н., Головнина А.В., Самороков В.Э. Исследование свойств современных строительных материалов на основе промышленных отходов. *Фундаментальные исследования*. 2013;10(12):2599–2603. <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=32837> (дата обращения 04.02.2024).
12. Гончарова М.А., Борков П.В., Аль-Суррайви Х.Г.Х. Рециклинг крупнотоннажных бетонных и железобетонных отходов при реализации контрактов полного жизненного цикла. *Строительные материалы*. 2019;12:52–57. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-52-57>
13. Ермолаева Ю.В. Жизненный цикл отходов и метаболизм городской среды. В: *Материалы V Всероссийского социологического конгресса «Социология и общество: социальное неравенство и социальная справедливость»*. М.: Российское общество социологов; 2016. С. 8981–9001. <https://elibrary.ru/item.asp?id=27229805&pff=1> (дата обращения 04.02.2024).
14. Huang B., Gao X., Xu X., Song J., Geng Y., Sarkis J. et al. A Life Cycle Thinking Framework to Mitigate the Environmental Impact of Building Materials. *One Earth*. 2020;3(5):564–573. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.010>
15. Jalaee F., Zoghi M., Khoshand A. Life Cycle Environmental Impact Assessment to Manage and Optimize Construction Waste Using Building Information Modeling (BIM). *International Journal of Construction Management*. 2021;21(8):784–801. <https://doi.org/10.1080/15623599.2019.1583850>
16. Khandelwal H., Dhar H., Thalla A.K., Kumar S. Application of Life Cycle Assessment in Municipal Solid Waste Management: A Worldwide Critical Review/ *Journal of Cleaner Production*. 2019;209:630–654. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.233>
17. Ruiz L.A.L., Ramón X.R., Domingo S.G. The Circular Economy in the Construction and Demolition Waste Sector — A Review and an Integrative Model Approach. *Journal of Cleaner Production*. 2020;248:119238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119238>
18. Jin R., Yuan H., Chen Q. Science Mapping Approach to Assisting the Review of Construction and Demolition Waste Management Research Published Between 2009 and 2018. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019;140:175–188. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.029>
19. Osmani M., Villoria-Sáez P. Current and Emerging Construction Waste Management Status, Trends and Approaches. In book: *Waste: A Handbook for Management*. Cambridge, Massachusetts, USA: Academic Press; 2019. P. 366–379. [https://repository.lboro.ac.uk/articles/chapter/Current\\_and\\_emerging\\_construction\\_waste\\_management\\_trends\\_and\\_approaches/9460307](https://repository.lboro.ac.uk/articles/chapter/Current_and_emerging_construction_waste_management_trends_and_approaches/9460307) (дата обращения 04.02.2024).
20. Hao J., Yuan H., Liu J., Chin C.S., Lu W. A Model for Assessing the Economic Performance of Construction Waste Reduction *Journal of Cleaner Production*. 2019;232:427–440. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.348>
21. Kabirifar K., Mojtahedi M., Wang C., Tam V.W.Y. Construction and Demolition Waste Management Contributing Factors Coupled with Reduce, Reuse, and Recycle Strategies for Effective Waste Management: A Review. *Journal of Cleaner Production*. 2020;263:121265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265>
22. Левицкая К.М., Зубарев А.С. К вопросу эффективного управления строительными материалами и ресурсами. В: *Сборнике трудов международной научно-технической конференции молодых ученых*. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова; 2020. С. 1451–1454. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44101755> (дата обращения 04.02.2024).
23. Мойсейчик Е.А., Ботян Е.А. Происхождение и классификация отходов демонтажа и строительства. *Экология и строительство*. 2020;2:17–26. <https://doi.org/10.35688/2413-8452-2020-02-003>
24. Романова А. А., Середина А. Л. Рециклинг как инновационный метод обращения со строительными отходами. В: *Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Новая Экономика: Институты, Инструменты, Тренды»*. Н.В. Спасская, Е.В. Такмакова Е.В. (ред.). Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева; 2022. С. 162–165.

## References

1. Bespalov VI, Paramonova ON. Classification and Methodological Foundations of Combating Environmental Pollution by Solid Waste of Consumption. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Scientific Research and Its Practical Application. The Current State and Ways of Development 2012”*. Odessa: Kuprienko Publ.; 2012. (In Russ.).
2. Lapina OA, Lapina AP. Ecological Assessment of Construction Materials. *Vestnik evraziiskoi nauki*. 2013;5(18):132. URL: <https://naukovedenie.ru/index.php?p=issue-5-13> (accessed: 04.02.2024). (In Russ.).
3. Gorislavko DM, Vorona-Slivinskaya LG. Classification of Construction Waste and Calculation of Quantity. In: *Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference “Innovative Methods of Organizing Construction Production”*. St. Petersburg: St. Petersburg State Technical University; 2021. P. 205–209. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47176056&pff=1> (accessed: 04. 02.2024). (In Russ.).

4. Kozlova EV, Zavorzaev AA, Trofimov DV, Stupin AA. Construction Waste and Secondary Use of Construction Resources. *Vestnik Kolomenskogo instituta (filiala) Moskovskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2020;13:157–162. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44733044> (accessed: 04.02.2024). (In Russ.).
5. Lunev GG, Prokhotskiy YuM. Secondary Building Resources: Environmental and Economic Approach to the Classification. *Competency*. 2019;(7):18–23. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vtorichnye-stroitelnye-resursy-ekologo-ekonomicheskoy-podkhod-k-klassifikatsii> (accessed: 04.02.2024). (In Russ.).
6. Davis P, Aziz F, Tanvi Newaz M, Sher W, Simon L. The Classification of Construction Waste Material Using a Deep Convolutional Neural Network. *Automation in Construction*. 2021;122:103481. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103481>
7. Paramonova ON. Review of Solid Waste Consumption as the Dispersed System. *Engineering Journal of Don*. 2013;3(26):148. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1933> (accessed: 02.04.2024). (In Russ.).
8. Paramonova O, Bepalov V, Gurova O, Alekseenko L, Tsarevskaya I. Dynamics of Changes in the Properties of Municipal Solid Waste in the Environment. In: *Proceedings of the International Scientific Conference "Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies". EMMFT 2018: Volume 2*. Cham: Springer International Publishing; 2019. P. 960–970. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8\\_95](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8_95)
9. Shtenske KS, Paramonova ON. Investigation of Asbestos Properties Parameters in a Lump Form as Waste Generated in Foundry. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2021;1(35):42–46. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44905759> (accessed: 04.02.2024).
10. Ahmed AAA, Al-Bu-Ali USD. Utilization of Construction Waste. *Nauka i innovatsii v stroitel'stve*. 2018;347–352.
11. Barakhtenko VV, Burdonov AE, Zelinskaya EV, Tolmacheva EN, Golovnina AV, Samorokov VE. Investigation of Modern Building Materials Based Industrial Waste. *Fundamental Research*. 2013;10(12):2599–2603. <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=32837> (accessed: 02/04/2024).
12. Goncharova MA, Borkov PV, Al-Surraivi Hussain HGH. Recycling of Large-Capacity Concrete and Reinforced Concrete Waste in the Context of Realization of Full Life Cycle Contracts. *Stroitel'nye materialy*. 2019;(12):52–57. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-52-57>
13. Ermolaeva YuV. Waste Life Cycle and Urban Environment Metabolism. In: *Proceedings of the V All-Russian Sociological Congress "Sociology and Society: Social Inequality and Social Justice"*. Moscow: Russian Society of Sociologists; 2016. P. 8981–9001. <https://elibrary.ru/item.asp?id=27229805&pf=1> (accessed: 04. 02.2024).
14. Huang B, Gao X, Xu X, Song J, Geng Y, Sarkis J, et al. A Life Cycle Thinking Framework to Mitigate the Environmental Impact of Building Materials. *One Earth*. 2020; 3(5):564–573. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.010>
15. Jalaei F, Zoghi M, Khoshand A. Life Cycle Environmental Impact Assessment to Manage and Optimize Construction Waste Using Building Information Modeling (BIM). *International Journal of Construction Management*. 2021;21(8):784–801. <https://doi.org/10.1080/15623599.2019.1583850>
16. Khandelwal H, Dhar H, Thalla AK, Kumar S. Application of Life Cycle Assessment in Municipal Solid Waste Management: A Worldwide Critical Review. *Journal of Cleaner Production*. 2019;209:630–654. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.233>
17. Ruiz L.A.L., Ramón X.R., Domingo S.G. The Circular Economy in the Construction and Demolition Waste Sector — a Review and an Integrative Model Approach. *Journal of Cleaner Production*. 2020;248:119238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119238>
18. Jin R, Yuan H, Chen Q. Science Mapping Approach to Assisting the Review of Construction and Demolition Waste Management Research Published Between 2009 and 2018. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019;140:175–188. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.029>
19. Osmani M, Villoria-Sáez P. Current and Emerging Construction Waste Management Status, Trends and Approaches. In book: *Waste: A Handbook for Management*. Cambridge, Massachusetts, USA: Academic Press; 2019. P. 366–379. [https://repository.lboro.ac.uk/articles/chapter/Current\\_and\\_emerging\\_construction\\_waste\\_management\\_trends\\_and\\_approaches/9460307](https://repository.lboro.ac.uk/articles/chapter/Current_and_emerging_construction_waste_management_trends_and_approaches/9460307) (accessed 02.04.2024).
20. Hao J, Yuan H, Liu J, Chin CS, Lu W. A Model for Assessing the Economic Performance of Construction Waste Reduction. *Journal of Cleaner Production*. 2019;232:427–440. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.348>
21. Kabirifar K, Mojtahedi M, Wang C, Tam VWY. Construction and Demolition Waste Management Contributing Factors Coupled with Reduce, Reuse, and Recycle Strategies for Effective Waste Management: A Review. *Journal of Cleaner Production*. 2020;263:121265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265>
22. Levitskaya KM, Zubarev AS. On the Issue of Effective Management of Building Materials and Resources. In: *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of Young Scientists*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; 2020. P. 1451–1454. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44101755> (accessed 04. 02.2024).

23. Moiseichik EA, Botyan EA. Origin and Classification of Dismantling and Construction Waste. *Ehkologiya i stroitel'stvo*. 2020;(2):17–26. <https://doi.org/10.35688/2413-8452-2020-02-003>

24. Romanova AA, Seredina AL. Recycling as an Innovative Method of Construction Waste Management. In: *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference "New Economy: Institutions, Tools, Trends"*. Spasskaya NV, Tokmakova EV (eds). Orel: Orel State University named after I.S. Turgenev; 2022. P. 162–165.

*Об авторах:*

**Оксана Николаевна Парамонова**, доцент кафедры инженерной защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, [ScopusID](#), [ORCID](#), [paramonova\\_oh@mail.ru](mailto:paramonova_oh@mail.ru)

**Наталья Владимировна Юдина**, доцент кафедры инженерной защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат биологических наук, доцент, [ScopusID](#), [ORCID](#), [Udi-natasha@yandex.ru](mailto:Udi-natasha@yandex.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

О.Н. Парамонова — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, анализ результатов исследований, доработка текста.

Н.В. Юдина — подготовка текста и графических материалов, подготовка выводов, формирование библиографического перечня.

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

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Поступила в редакцию** 17.01.2024

**Поступила после рецензирования** 30.01.2024

**Принята к публикации** 05.02.2024

*About the Authors:*

**Oksana N. Paramonova**, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Environmental Engineering Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ORCID](#), [ScopusID](#), [paramonova\\_oh@mail.ru](mailto:paramonova_oh@mail.ru)

**Natalya V. Yydina**, Cand.Sci. (Biology), Associate Professor of the Environmental Engineering Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ORCID](#), [ScopusID](#), [Udi-natasha@yandex.ru](mailto:Udi-natasha@yandex.ru)

*Claimed contributorship:*

ON Paramonova: formulating the main concept, aim and objectives of the research, analysis of the research results, refining the text.

NV Yydina: preparing the text and graphic materials, preparing the conclusions, compiling the bibliography.

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

*All authors have read and approved the final manuscript.*

**Received** 17.01.2024

**Revised** 30.01.2024

**Accepted** 05.02.2024

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION



УДК 69.05

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-57-70>

## Формирование системы показателей управления стоимостью инвестиционно-строительных проектов зеленых медицинских зданий

К.М. Крюков  , Ч. Чжан

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

 [kkrioukov@gmail.com](mailto:kkrioukov@gmail.com)



EDN: QHWIUP

### Аннотация

**Введение.** Строительство зеленых медицинских зданий является довольно новым и приоритетным направлением строительства в Китае. Одним из ключевых элементов эффективности реализации проектов зеленых медицинских зданий является управление стоимостью инвестиционно-строительного проекта. Проекты зеленых зданий связаны с высоким техническим содержанием объекта, широким спектром областей и участников. Поэтому к управлению затратами выдвигаются более высокие требования, а традиционный режим фрагментированного управления не позволяет удовлетворить потребности развития зеленых медицинских зданий. В исследовании рассматриваются вопросы управления стоимостью проектов зеленого медицинского строительства, анализируется необходимость, осуществимость, тенденции развития и практические проблемы управления затратами проектов зеленого медицинского строительства. Целью данного исследования является выработка критериев оценки управления затратами проектов зеленого медицинского здания на всех стадиях жизненного цикла.

**Материалы и методы.** В исследовании используются такие методы, как метод исследования литературы и метод экспертного интервью. Метод экспертного интервью позволяет использовать опыт экспертов в смежных областях для оказания помощи в принятии решений. В этих целях в рамках исследования была разработана анкета.

**Результаты исследования.** На основе углубленного изучения различных факторов, которые влияют на управление затратами проектов зеленого медицинского строительства, разработаны стратегии и меры реагирования на основе преимуществ и характеристик управления затратами. Обобщая показатели оценки управления затратами, задействованные в процессе строительства проектов зеленого медицинского строительства, и объединяя мнения экспертов и ученых в смежных областях, создана система оценки управления затратами проекта зеленого медицинского здания. Разработанные критерии оценки позволяют лучше реализовать контроль затрат на проекты зеленого медицинского строительства, повысить уровень управления стоимостью проекта, повысить комплексные преимущества проекта и обеспечить управление затратами и контроль затрат для аналогичных проектов.

**Обсуждение и заключение.** Результаты исследования обеспечивают теоретическую основу для построения системы оценки управления затратами для проектов зеленого медицинского строительства в целях решения проблем управления затратами на зеленые медицинские здания. Практическая значимость заключается в обеспечении реального практического подхода для улучшения управления затратами на проекты зеленых медицинских зданий.

**Ключевые слова:** управление стоимостью, зеленые медицинские здания

**Для цитирования.** Крюков К.М., Чжан Ч. Формирование системы показателей управления стоимостью инвестиционно-строительных проектов зеленых медицинских зданий. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(1):57–70. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-57-70>

## Creation of a System of Cost Management Indicators for the Construction Investment Projects of the Green Healthcare Buildings

Konstantin M. Kryukov  , Chunyue Zhang

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

 [kkrioukov@gmail.com](mailto:kkrioukov@gmail.com)

### Abstract

**Introduction.** Construction of the green healthcare buildings is a rather new and priority direction of construction in China. One of the key components of efficient implementation of the projects of green healthcare buildings is the cost management of a construction investment project. The projects of green buildings envisage the advanced technical content of a facility, a wide project scope and large number of participants. Therefore, the cost management requirements have to be more demanding, however, the traditional fragmented management fails to meet the requirements fostering the development of the green healthcare buildings. The present research investigates the issues of cost management of the green healthcare construction projects, analyses the necessity, feasibility, development trends and practical cost management problems thereof. The research strives to develop the cost management assessment indicators for all life cycle stages of the projects of green healthcare buildings.

**Materials and Methods.** The research was conducted using such methods as the literature review and the expert interview methods. The expert interview method allows using the experience of experts from the related fields to assist in decision-making. Therefore, a questionnaire was developed as a part of the research.

**Results.** Upon in-depth study of the various factors affecting the cost management of the green healthcare construction projects, the strategies and response measures have been developed based on the advantages and cost management features. By summarizing the cost management assessment indicators referring to implementation of the green healthcare construction projects and by combining the opinions of the experts and scientists from the related fields, the cost management assessment system for a project of green healthcare building has been created. The created assessment indicators make it possible to implement better control over the costs assigned to the green healthcare construction projects, elevate the level of project cost management, enhance the integrated benefits of the project and ensure the cost management and cost control for the similar projects.

**Discussion and Conclusion.** The results of the research provide a theoretical basis for creating a cost management assessment system for the green healthcare construction projects aimed to solve the problems of cost management of the green healthcare buildings. The practical significance consists in providing a real practical approach to improving the cost management of the projects of green healthcare buildings.

**Keywords:** cost management, green medical buildings

**For citation.** Kryukov KM, Zhang C. Formation of a system of indicators for managing the cost of investment and construction projects of green medical buildings. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(1):57–70. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-57-70>

**Введение.** На современном этапе концепция зеленого развития проникла во все сферы жизни и стала лейтмотивом развития строительной отрасли Китая. Руководством страны поставлена задача углубления институциональных инноваций зеленого развития и применения зеленых технологий и зеленого производства. В направлениях развития страны до 2035 года подчеркивается установление концепции зеленого развития, соблюдение направления зеленого развития и достижение целей высококачественного развития. Главными факторами, препятствующими зеленому развитию, являются высокое энергопотребление и высокое загрязнение окружающей среды, в том числе за счет строительства и эксплуатации возводимых зданий.

В качестве объекта исследования было выбрано управление стоимостью проекта по возведению зеленых медицинских зданий. Актуальность данного выбора обусловлена тем, что зеленые медицинские здания имеют высокий профессиональный и технический уровень, охватывают широкий спектр областей и имеют множество участвующих организаций, они выдвигают более высокие требования к управлению проектами.

Зеленые медицинские здания значительно отличаются от обычных зданий. В зеленых медицинских зданиях больше внимания уделяется интеллекту, экологичности и гуманизации здания. Это в основном отражается в более высоких нормативных требованиях и отраслевых стандартах, с особым упором на гуманистический подход и внедрение зеленых технологий. Данный подход подчеркивает интеграцию с окружающей средой, гармонию, дополнение движения и статики, повышение эффективности освещения

здания, снижение шумового загрязнения и прочее для достижения истинной защиты естественной экологической среды и зеленого развития.

В 2019 году в КНР внедрена новая система оценки зеленых зданий. Разработаны экологические рекомендации для медицинских зданий, ставшие первым поддающимся количественной оценке инструментом зеленого проектирования и оценки медицинских зданий. Однако проведенных исследований зеленых медицинских зданий отечественными и зарубежными учеными относительно мало, и большинство из них сосредоточено на концепциях проектирования, системах оценки и изучении приложений, что дополнительно отражает необходимость и целесообразность углубленного изучения зеленых медицинских зданий в направлении исследования управления затратами на строительство зеленого здравоохранения.

На основе комплексного подхода к исследованию зеленых медицинских зданий и управления стоимостью этих проектов было установлено, что существующие исследования недостаточны.

Во-первых, содержание исследования требует дальнейшего углубления. Проектирование и строительство зеленых медицинских зданий началось сравнительно недавно, и ученые все еще находятся на исследовательской стадии. Кроме того, исследования по управлению затратами инвестиционных проектов в основном ограничиваются областями зеленого строительства жилых зданий, а исследований по управлению затратами проектов зеленого медицинского строительства недостаточно.

Во-вторых, исследование должно быть расширено. Существующие разработки по управлению затратами строительных проектов в основном обсуждают вопросы управления затратами с точки зрения застройщика. Большинство из них ограничивается исследованиями управления затратами на определенном этапе проектирования, строительства, эксплуатации и технического обслуживания и т. д.

Принимая во внимание исследования ученых и практиков по управлению инвестиционными проектами по строительству зеленых медицинских зданий, в этом исследовании уделяется основное внимание управлению стоимостью проекта зеленого медицинского здания на всех стадиях жизненного цикла инвестиционного проекта. Для достижения эффективного управления затратами на строительство зеленых медицинских зданий необходимо внедрение научных и передовых моделей и методов управления. Целью работы является разработка критериев, влияющих на экономическую эффективность данных проектов с учетом его развития на всех стадиях жизненного цикла.

**Материалы и методы.** Исследование проводилось по алгоритму «постановка проблем — анализ проблем — решение проблем», а в качестве объекта исследования использовалось управление затратами проектов зеленого медицинского строительства. В соответствии с представленным алгоритмом планировалось изучить показатели оценки, построить модели оценки, провести анализ случаев, а также выдвинуть контрмеры и предложения, направленные на улучшение системы управления затратами, оптимизацию процесса управления затратами, повышение уровня управления затратами.

В данном исследовании использовались метод исследования литературы и метод экспертного интервью.

*Исследование литературы.* С использованием баз данных материалов, соответствующих теме этого исследования, была отобрана соответствующая информация. Полученные данные были сгруппированы и проанализированы, чтобы обобщить текущий статус исследований и соответствующую теоретическую основу управления затратами проектов зеленого медицинского строительства.

*Метод экспертного интервью.* Метод консультирования экспертов в смежных областях для оказания помощи в принятии решений. Этот метод может восполнить недостаток способностей и опыта исследователей, а также повысить рациональность и эффективность принятия решений. В данном исследовании используется экспертный метод интервью для анализа выбранных проектов в целом. Показатели оценки управления стоимостью проекта зеленого медицинского здания пересматриваются и дополняются в режиме консультирования, чтобы заложить основу для последующего анализа.

### Результаты исследования

*Определение индекса оценки на основе метода исследования литературы.*

Чтобы обеспечить научность определения показателей оценки затрат с помощью метода исследования литературы, использовался поиск по ключевым словам: «показатели оценки управления затратами на зеленое строительство», «управление затратами на протяжении всего жизненного цикла», «факторы, влияющие на управление затратами» и т. п. В исследовании были интегрированы и выбраны высококачественные источники, которые полностью соответствуют теме «зеленое медицинское строительство». Авторами были определены те, кто имеет большее влияние на исследование управления затратами. На основе анализа были выделены 22 научно-практических источника, адекватных тематике управления затратами на строительство зеленых медицинских зданий (таблица 1).

Таблица 1

Сводная информация на основе метода исследования литературы для определения показателей оценки

| Обозначение | Наименование показателей                                                                                                                       | Номер источника |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| А           | Исследование по управлению затратами проекта недвижимости в общине Цзяньвань                                                                   | 1               |
| Б           | Исследование по оценке эффекта управления затратами проектов строительства метрополитена на основе цепочки создания стоимости                  | 2               |
| В           | Исследование по управлению затратами инженерно-строительных проектов — на основе создания системы управления стоимостью                        | 3               |
| Г           | Проект декорированного жилого здания на основе бережливого строительства для биомедицинской базы в районе Дасин г. Пекин.                      | 4               |
| Д           | Исследование модели оценки зрелости управления стоимостью проекта недвижимости на основе теории переменного веса                               | 5               |
| Е           | Исследование комплексного управления затратами проекта туристической недвижимости                                                              | 6               |
| Ж           | Исследование факторов влияния на управление стоимостью проекта зеленого строительства на основе здания (Шанхай)                                | 7               |
| З           | Исследование комплексного управления затратами проекта реконструкции здания палаты Сеульской детской больницы                                  | 8               |
| И           | Краткое обсуждение управления затратами жизненного цикла медицинских зданий на примере провинциальной репродуктивной больницы провинции Хэнань | 9               |
| К           | Прикладные исследования проектов строительства больниц                                                                                         | 10              |
| Л           | Исследование факторов влияния управления зеленым строительством на основе теории полного жизненного цикла                                      | 11              |
| М           | Исследование модели зрелости и оценка управления стоимостью проекта недвижимости на основе полного жизненного цикла                            | 12              |
| Н           | Исследование комплексного управления затратами проекта недвижимости компании Zhengshanjia                                                      | 13              |
| О           | Оценка управления затратами на проектирование электросетей: жизненный цикл проекта                                                             | 14              |
| П           | Исследование стратегии комплексного инженерного консалтинга для развития предприятий                                                           | 15              |
| Р           | Факторы, влияющие на контроль затрат на зеленое строительство                                                                                  | 16              |
| С           | Исследование по контролю затрат проектов сотрудничества в сфере недвижимости                                                                   | 17              |
| Т           | Комплексное инженерно-консалтинговое исследование на основе практики строительных проектов                                                     | 18              |
| У           | Исследование ключевых факторов, влияющих на эффективность управления стоимостью проекта недвижимости на основе всего процесса жизненного цикла | 19              |
| Ф           | Исследования по управлению затратами всего процесса инженерных проектов зеленого строительства                                                 | 20              |
| Х           | Исследования по применению модели комплексного инженерного консалтинга                                                                         | 21              |
| Ч           | Анализ факторов, влияющих на дополнительные затраты на экологическое строительство                                                             | 22              |

Ввиду проблем, связанных с тем, что индикаторы оценки уровня управления затратами, включенные в приведенную выше литературу, слишком разделены и нечетко определены, некоторые индикаторы оценки были структурированы с позиции оценки уровня управления затратами проектов зеленого медицинского строительства (таблица 2).

С помощью метода исследования литературы изначально были выявлены и дополнены показатели оценки уровня управления затратами проектов зеленого медицинского строительства. Однако показатели оценки, выбранные только на основе предыдущих исследований ученых, будут недостаточно адекватными. Существуют такие проблемы, как недостаточная репрезентативность и дублирование факторов. В связи с этим в настоящем исследовании используется метод экспертного интервью для дальнейшей доработки и совершенствования изначально выбранных показателей оценки с целью повышения научности и полноты показателей оценки уровня управления затратами.

Таблица 2

Индекс оценки управления затратами зеленого медицинского здания на основе литературы

| Код этапа | Этап                                            | Критерии                                                                                | Ссылка на обозначение источника       |
|-----------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| А         | Решение по проекту.<br>Этап: прединвестиционный | Адекватность предварительного исследования                                              | А, Г, Ж, З                            |
|           |                                                 | Обоснованность проектного предложения                                                   | Д, Е, Ж, И, П, Т, Х, Ч                |
|           |                                                 | Научный характер отчета о ТЭО                                                           | Г, Д, Ж, И, К, Н, П, Т, У, Ф, Х, Ч    |
|           |                                                 | Точность инвестиционных оценок                                                          | Б, Д, И, М, Н, П, С, Т, У             |
|           |                                                 | Осведомленность строительной организации об управлении экологическими затратами         | А, Д, Л, С, Ч                         |
|           |                                                 | Рациональность решений по оценке проектов                                               | З, И, П, С, Т, У                      |
|           |                                                 | Научная природа модели управления затратами                                             | А, Д, К, Л, М, Р, С, У, Ф, Х          |
|           |                                                 | Возможности планирования финансирования                                                 | Д, Е, М, Ф, Х                         |
|           |                                                 | Возможности анализа затратных рисков                                                    | Б, Д, М, О                            |
| В         | Этап: проектирование                            | Рациональность плана обследования                                                       | К, П, Т, Х                            |
|           |                                                 | Пригодность проектных решений                                                           | Г, Д, Е, Ж, И, М, Н, С, Т, У          |
|           |                                                 | Степень применения максимального дизайна                                                | Д, Е, И, М, С, У                      |
|           |                                                 | Продолжительность рассмотрения проектно-сметной документации зеленых медицинских зданий | Д, З, П, Т                            |
|           |                                                 | Продолжительность рассмотрения бюджета строительства, этапа планирования                | Г, Д, З, П, С, Т, Ф                   |
|           |                                                 | Специальные консалтинговые услуги по проектированию зеленых медицинских зданий          | И, К, П                               |
|           |                                                 | Разработка проекта конфигурации зеленой технологии                                      | Д, Ж, Л, П, Р, С, Ф, Х, Ч             |
|           |                                                 | Осведомленность дизайнеров об управлении экологическими затратами                       | К, Л, М, П, С, Ч                      |
|           |                                                 | Экономическая целесообразность архитектурного проектирования                            | Е, М, Н, У, Х                         |
|           |                                                 | Научная природа планирования торгов                                                     | А, Б, З, К, Н, П, Т, У, Ф, Х          |
|           |                                                 |                                                                                         |                                       |
| С         | Тендерные закупки.<br>Этап: торги и закупки     | Стандартизация управления тендерным процессом                                           | А, Е, З, К, М, П, Т, Х                |
|           |                                                 | Полнота составления ведомости объемов работ                                             | З, Н, П, Т                            |
|           |                                                 | Контроль цен на торгах                                                                  | З, Н, П, С, Т                         |
|           |                                                 | Подготовка условий договора                                                             | К, О, П, С, Т                         |
|           |                                                 | Продолжительность пересмотра планов зеленого строительства                              | Б, З, К, П, Р, Ф, Х, Ч                |
| Д         | Этап: строительство                             | Уровень управления контрактами на зеленое строительство                                 | Д, Е, К, М, О, Т, У, Ф, Х             |
|           |                                                 | Усилия по управлению прогрессом в области зеленого строительства                        | Б, В, Г, Д, Е, З, К, М, О, Т, Х       |
|           |                                                 | Усилия по управлению качеством зеленого строительства                                   | Б, В, Г, З, К, О, Т                   |
|           |                                                 | Надзор за зеленым строительством                                                        | А, Д, И, К, П, Р, Ф, Ч                |
|           |                                                 | Возможности управления претензиями на инженерные изменения                              | А, Б, Г, Д, Е, З, К, М, П, Р, С, Т, У |
|           |                                                 | Навыки учета и анализа затрат                                                           | Б, В, Г, Д, Е, З, С, Т, У             |
|           |                                                 | Осведомленность строительной организации об управлении экологическими затратами         | Б, К, М, С, Т, У, Ф                   |
|           |                                                 | Возможности управления работниками, материалами и оборудованием                         | Б, В, Г, Х                            |
| Е         | Этап: приемка в эксплуатацию                    | Возможности планирования завершения работ                                               | Г, З, К, Н, П, Т, Ф                   |
|           |                                                 | Возможности управления расчетами за окончание этапов работ и завершения строительства   | Б, Г, Д, Е                            |
|           |                                                 | Завершение окончательного управления расчетами. Полнота исполнительных данных           | Е, З, К, П, Т, Ф                      |
|           |                                                 | Специальный уровень тестирования зеленых медицинских зданий                             | К, П, Т, Х                            |
|           |                                                 | Гарантия и срок обслуживания                                                            | Б, Г, Д, Е, Ж, К, О, Т, Ф             |
|           |                                                 | Возможности постпроектной оценки                                                        | К, Н, П, Т                            |
|           |                                                 | Рациональность процесса оценки эффективности проекта                                    | А, В, К, П                            |
|           |                                                 |                                                                                         |                                       |
| F         | Этап: эксплуатация объекта                      | Возможности управления зелеными медицинскими зданиями                                   | И, К, П, Т                            |
|           |                                                 | Уровень управления эксплуатацией зеленого медицинского здания                           | И, К, П, Т, Х                         |
|           |                                                 | Уровень управления активами проекта                                                     | Ж, К, П, Т                            |

В данном исследовании участвовали специалисты проектных и строительных организаций, а также научные сотрудники, связанные с зелеными медицинскими зданиями и управлением затратами на зеленое строительство. Опрос экспертов проводился с использованием полуструктурированных опросников и онлайн-видеоконференций. В опросе было предложено экспертам пересмотреть и улучшить показатели оценки, выбранные с помощью метода исследования литературы. Результаты интервью и модифицированные мнения каждого эксперта были обобщены (таблица 3).

Таблица 3

## Результаты экспертных интервью

| №  | Мнение эксперта                                                                                                                                                                                                                            | Экспертное обоснование                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Объединить «достаточность предварительных исследований» и «обоснованность проектного предложения»                                                                                                                                          | На этапе принятия решения по проекту после завершения предварительного расследования будет написан отчет о технико-экономическом обосновании, поэтому результаты предварительного расследования будут отражены в отчете о технико-экономическом обосновании. Следовательно «достаточность предварительных исследований» будет объединена с показателем «обоснованность ТЭО»                        |
| 2  | Добавить. На этапе принятия решений по проекту «законы и правила, степень внедрения отраслевых стандартов»                                                                                                                                 | Управление затратами на этапе принятия решений по проекту будет регулироваться законами, постановлениями и отраслевыми нормами. Таким образом, в процессе управления затратами степень соблюдения законов, правил и отраслевых норм также является одним из показателей оценки работы по управлению затратами                                                                                      |
| 3  | Удалить «возможность анализа затратных рисков»                                                                                                                                                                                             | Анализ стоимостного риска является частью технико-экономического обоснования проекта, и возможность анализа стоимостного риска в конечном итоге будет отражена в полноте отчета о технико-экономическом обосновании                                                                                                                                                                                |
| 4  | Удалить «Разработка проекта конфигурации зеленой технологии»                                                                                                                                                                               | Разработка проекта конфигурации зеленой технологии является частью проектирования зеленых медицинских зданий                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 5  | Удалить «Специальные консалтинговые услуги по проектированию зеленых медицинских зданий»                                                                                                                                                   | Показатель «Специальные консалтинговые услуги по проектированию зеленых медицинских зданий» охватывает зеленые технологии при проектировании зеленых медицинских зданий, а консультационные услуги также включают срок рассмотрения проекта                                                                                                                                                        |
| 6  | Удалить «Экономическая целесообразность архитектурного проектирования»                                                                                                                                                                     | Экономическая целесообразность архитектурного проектирования является результатом проектирования раздела «Архитектурные решения», а показатель «Степень применения» уже имеется. Существует проблема дублирования в определении «экономической целесообразности архитектурного проектирования».                                                                                                    |
| 7  | «Полнота составления ведомости объемов работ» включается в показатель «Контрольной цены торгов»                                                                                                                                            | Процесс подготовки тендерной документации будет включать в себя подготовку ведомости объемов работ и объединяется с контрольной ценой торгов. Полнота подготовки ведомости объемов работ или определение цены торгов в конечном итоге будет отражено в тендерной документации по зеленому медицинскому строительству                                                                               |
| 8  | Добавить план закупок на этап торгов и закупок                                                                                                                                                                                             | Этап торгов и закупок включает в себя не только торги, которые повлияют на управление затратами проекта, но и охватывает закупку сопутствующих строительных материалов и оборудования, что также повлияет на управление затратами. Эффективность системы подготовка плана закупок будет более полной                                                                                               |
| 9  | Удалить «Усилия по управлению прогрессом в области зеленого строительства», «Усилия по управлению качеством зеленого строительства», «Надзор за зеленым строительством», «Возможности управления работниками, материалами и оборудованием» | Будь то «управление прогрессом в области зеленого строительства», «управление качеством зеленого строительства» или «Управление трудом, материалами и оборудованием», все это относится к задачам надзора контролирующей стороны на этапе зеленого строительства, а возможности управления в этих трех аспектах относятся к возможностям надзора за зеленым строительством контролирующей стороной |
| 10 | Удалить «Возможности управления расчетами за окончание этапов работ и завершения строительства»                                                                                                                                            | Расчет завершения — это содержание работы строительной организации                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 11 | Удалить «Осведомленность строительной организации об управлении экологическими затратами»                                                                                                                                                  | Осведомленность пользователей об управлении экологическими затратами напрямую связана с управлением затратами проекта                                                                                                                                                                                                                                                                              |

Основываясь на методе исследования литературы и методе экспертного интервью, представлена система показателей, позволяющая оценить уровень управления затратами на реализацию инвестиционного проекта зеленых медицинских зданий. Система показателей охватывает этапы принятия проектных решений, этапы изысканий и проектирования и т. д. (рис. 1).

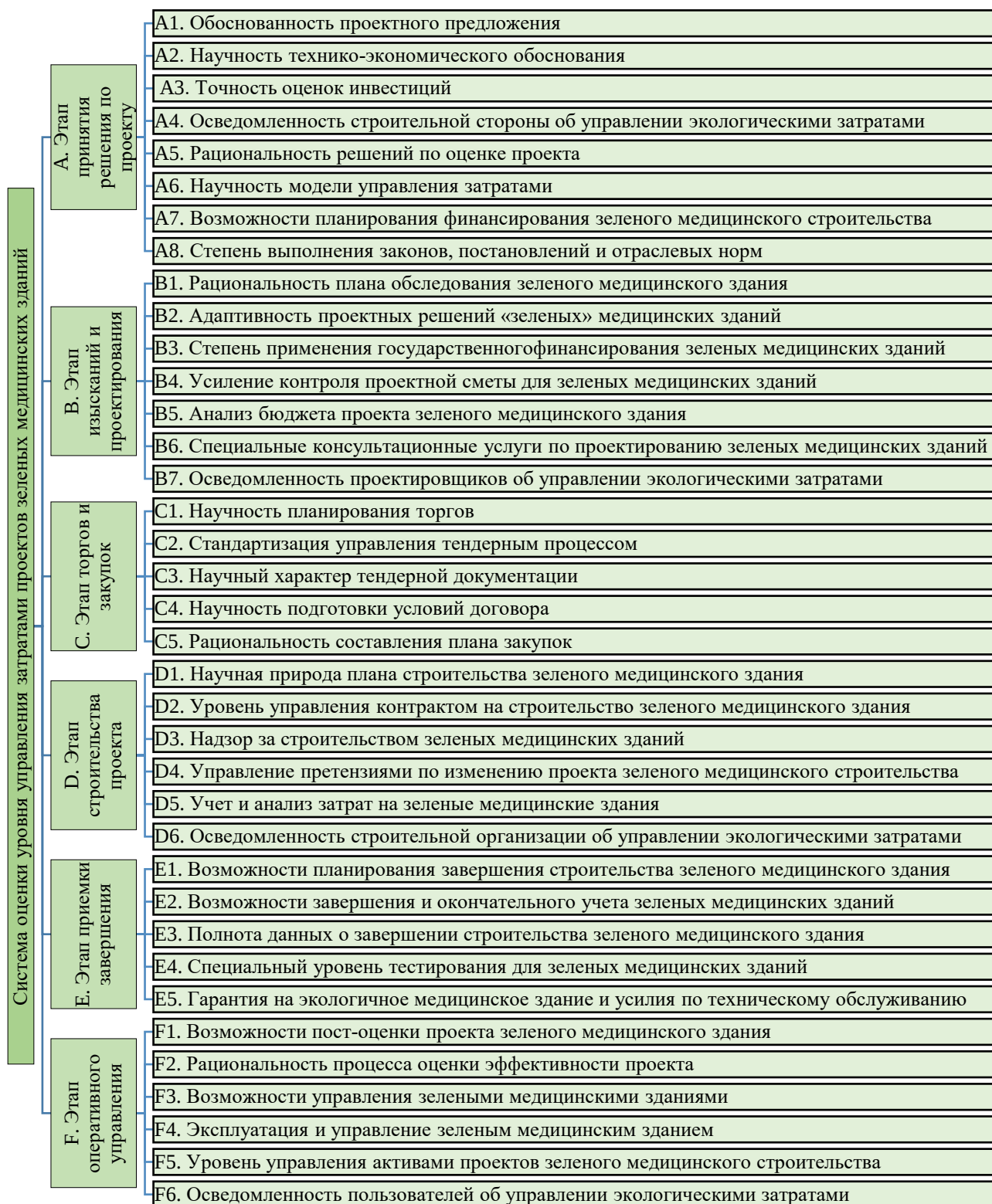


Рис. 1. Система индексов оценки управления затратами

**Обсуждение и заключение.** На основании выделенных показателей оценки предлагаются конкретные предложения по каждому этапу жизненного цикла инвестиционного проекта зеленого медицинского здания.

#### Этап принятия решения по проекту

**Обоснованность проектного предложения.** Предложение по проекту представляет собой рекомендательный документ, выдвинутый разработчиком проекта на основе внутренних и внешних требований и условий, таких как национальная и местная политика и правила, рыночное планирование, общее видение предлагаемого проекта и т. д. Поэтому рациональность проектного предложения в определенной степени определяет осуществимость проекта строительства.

*Научность технико-экономического обоснования.* В качестве основного содержания этапа принятия решений по проекту отчет о технико-экономическом обосновании представляет собой анализ и демонстрацию экономической осуществимости и технической рациональности, основанной на экономических, политических и культурных условиях местоположения проекта, а также собственных технологиях, ресурсах, будущем проекта, перспектив и других факторов. Поэтому характер отчета является отражением экономики проекта и технической науки и находится в центре внимания управления затратами.

*Точность оценок инвестиций в зеленое здравоохранение.* Оценка инвестиций является не только важной основой для принятия проектных решений, но также основой для сбора средств и оценки выгод строительных проектов. Таким образом, точность инвестиционных оценок является ключевым критерием контроля стоимости проекта на этапе подготовки к реализации.

*Осведомленность строительной стороны об управлении экологическими затратами.* То есть осведомленность предприятия-разработчика или подразделения об управлении затратами в процессе строительства зеленых медицинских зданий. Высокая осведомленность застройщиков об управлении экологическими затратами может не только улучшить качество, безопасность, здоровье и комфорт зеленых медицинских зданий, но и снизить затраты на строительство зеленых медицинских зданий.

*Рациональность решений по оценке проекта.* Содержание принятия решений по оценке проекта включает в себя: оценку энергосбережения, экологическую оценку, оценку безопасности, оценку воздействия дорожного движения, оценку рисков социальной стабильности проекта и т. д. Рациональность содержания этих решений по оценке напрямую влияет на последующее строительство и контроль затрат зеленых медицинских зданий.

*Научность модели управления затратами.* Без научной и эффективной модели управления затратами на зеленое медицинское здание будет не только трудно гарантировать, что проект достигнет ожидаемых результатов зеленой эксплуатации, но также окажет негативное влияние на управление затратами проекта. Поэтому необходимо построить многоотраслевую и многогранную модель управления затратами для достижения эффективного контроля затрат на проекты зеленого медицинского строительства.

*Возможности планирования финансирования зеленого медицинского строительства.* Возможности планирования финансирования отражают надежность и своевременность источников финансирования строительных проектов. В настоящее время специальные финансовые услуги в стране для развития зеленых медицинских зданий еще не запущены. Они по-прежнему представляют собой в основном государственные гранты и банковские кредиты. Им не хватает гибких каналов финансирования, и они подвержены таким проблемам, как финансовые трудности или чрезмерные финансовые затраты.

*Степень выполнения законов, постановлений и отраслевых норм.* Политика, правила и отраслевые нормы относятся к ряду правил, методов, руководств и т. д., изданных государственными ведомствами или отраслевыми организациями для зеленых медицинских зданий. Их введение влияет на развитие полномасштабного проектирования зеленых медицинских зданий, а также на управление затратами.

#### Этап изысканий и проектирования

*Рациональность плана обследования зеленого медицинского здания.* Провести инженерные изыскания на основе проекта и на объекте, понять фактическую ситуацию с проектом, предоставить соответствующие данные для последующего проектирования, завершить анализ и оптимизацию проекта плана, сформировать официальный документ и представить его в отдел планирования на рассмотрение, что напрямую связано с рациональностью плана изысканий. Возможность успешно завершить изыскательские работы.

*Адаптивность проектных решений зеленых медицинских зданий.* В процессе проектирования зеленых медицинских зданий необходимо не только учитывать проектирование и оптимизацию конструкций, систем водоснабжения и водоотведения, отопления, вентиляции и кондиционирования, электроснабжения и других систем, но также сравнивать и выбирать несколько вариантов для определения оптимального проектного решения, удовлетворяющего реальный спрос на зеленые медицинские здания. Это не только улучшит качество проекта, но и поможет всем участвующим организациям лучше управлять затратами.

*Степень применения государственного финансирования зеленых медицинских зданий.* Проектное финансирование относится к проектным работам, выполняемым в соответствии с заранее определенной суммой инвестиций при обеспечении основных функций здания в процессе проектирования проекта зеленого медицинского здания. Таким образом, чем выше применение государственного финансирования проектирования, тем лучше эффект управления стоимостью проекта.

*Усиление контроля проектной сметы для зеленых медицинских зданий.* Бюджет предварительного проектирования представляет собой приблизительный расчет всех затрат на весь процесс реализации проекта зеленого медицинского здания от создания проекта до его завершения и приемки. Это один из важных критериев оценки того, перерасходованы ли затраты на проект. Таким образом, увеличение количества проверок

специальных проектно-сметных смет является одним из мощных средств управления затратами на проекты зеленых медицинских зданий.

*Анализ бюджета проекта зеленого медицинского здания.* Бюджет проекта, являющийся результатом этапа проектирования строительных чертежей, является важной основой для подписания контрактов и распределения проектных средств. Чем строже анализ бюджетов проекта, тем лучше эффект управления затратами.

*Специальные консультационные услуги по проектированию зеленых медицинских зданий.* Зеленые медицинские здания более сложны и труднее построить, чем обычные здания. Из-за отсутствия соответствующего опыта у строителя требуется профессиональная консультационная группа для предоставления специальных консультационных услуг по проектированию зеленых медицинских зданий. К ним в основном относятся: гуманизация лечебного процесса, перцептивной среды, использования строительных материалов, безбарьерных объектов для маломобильных групп населения и т. д. Таким образом, усиление консультационных услуг по специальному проектированию зеленых медицинских зданий должно не только обеспечить удобную и комфортную медицинскую среду для медицинского персонала и пациентов, но и усилить управление затратами на специальное проектирование зеленых медицинских зданий.

*Осведомленность проектировщиков об управлении экологическими затратами.* Уровень осведомленности проектировщиков об управлении экологическими затратами напрямую связан с целостностью и осуществимостью результатов проектирования и влияет на стоимость всего проекта зеленого медицинского здания.

#### Этап торгов и закупок

*Научность планирования торгов.* Планирование торгов влияет на весь этап торгов по проекту зеленого медицинского здания. Обоснованная эффективность планирования торгов обеспечивает успешное завершение торгов.

*Стандартизация управления тендерным процессом.* Стандартизация процесса торгов позволяет избежать таких проблем, как сопутствующие заявки и навязывание предложений, а также помогает создать эффективную систему торгов и сформировать прозрачную среду торгов, тем самым обеспечивая справедливость и беспристрастность всего процесса торгов.

*Научный характер тендерной документации по зеленому медицинскому строительству.* Тендерная документация включает объявления о торгах, приглашения к участию в торгах, инструкции для участников тендера, методы оценки заявок, форматы тендерной документации, ведомость объемов работ, проектные чертежи, технические стандарты и требования и т. д. Научный характер тендерной документации означает, что ее содержание является научным и играет положительную роль в продвижении работы по управлению затратами.

*Научность подготовки условий договора.* При планировании и подготовке условий контракта необходимо всесторонне учитывать характеристики зеленых медицинских зданий и формулировать условия контракта, которые в значительной степени адаптированы к особенностям зеленых медицинских зданий, чтобы обеспечить наличие научно обоснованной поддержки для ненужных споров в последующих зеленых медицинских зданиях.

*Рациональность составления плана закупок.* В процессе строительства зеленых медицинских зданий необходимо закупать экологические строительные материалы и оборудование. Прямая закупка экологически чистых строительных материалов и оборудования напрямую связана с увеличением себестоимости. Поэтому нельзя игнорировать рациональность составления плана закупок в процессе управления затратами зеленых медицинских зданий.

#### Этап строительства объекта

*Научная природа плана строительства зеленого медицинского здания.* Необходимо научно и рационально готовить планы зеленого строительства, расширять обзор планов, постоянно демонстрировать и оптимизировать их для получения оптимального плана. Это обеспечивает научное строительство проектов зеленых медицинских зданий и улучшает возможности управления затратами проекта.

*Уровень управления контрактом на строительство зеленого медицинского здания.* Контракты на зеленое строительство служат важной гарантией интересов всех участвующих сторон и служат ориентиром для регулирования поведения всех участвующих сторон. Повышение уровня управления контрактами на зеленое строительство не только поможет усилить управление субподрядными контрактами и повысить комплексные преимущества субподрядных работ, но и управлять поведением всех участников проекта.

*Надзор за строительством зеленых медицинских зданий.* Надзор за зеленым строительством является важной частью этапа строительства. Усиление надзора за зеленым строительством может, с одной стороны, обеспечить безопасность текущих строительных операций и улучшить качество строительства, с другой стороны, это может также уменьшить злоупотребление материалами, улучшить эффективность использования ресурсов и повышение уровня управления затратами.

*Управление претензиями по изменению проекта зеленого медицинского строительства.* Инженерные изменения неизбежно будут происходить на этапе строительства, и, соответственно, неизбежно возникнут связанные с этим претензии. Таким образом, улучшение возможностей управления претензиями к инженерным изменениям не только повысит уровень управления стоимостью проекта, но и улучшит эффективность проекта.

*Учет и анализ затрат на зеленые медицинские здания.* Учет и анализ затрат проекта на этапе строительства в основном относится к классификации, обобщению, учету и анализу затрат в процессе строительства. Чем объективнее и обоснованнее будут результаты учета и анализа, тем выше будет отражен уровень управления затратами проекта.

*Осведомленность строительной организации об управлении экологическими затратами.* Поскольку строительные компании являются важным участником этапа строительства проекта, осведомленность строительных компаний об управлении зелеными затратами является важной гарантией обеспечения реализации зеленого строительства в процессе строительства зеленых медицинских зданий. Это напрямую связано с затратами на строительство зеленых медицинских зданий.

#### Этап приемки

Возможности планирования завершения строительства зеленого медицинского здания. Планирование всего процесса приемки на этапе завершения, включая организацию различных субъектов для участия в ряде задач по приемке объекта. Планирование завершения отражает, является ли процесс приемки завершения эффективным и соответствующим требованиям.

Возможности завершения и окончательного учета зеленых медицинских зданий. Чем сильнее способность управлять завершёнными окончательными отчётами, тем больше это способствует общему управлению и контролю затрат жизненного цикла проектов зеленого медицинского строительства.

Полнота данных о завершении строительства зеленого медицинского здания. Управление данными на этапе завершения в основном включает в себя архивирование, регистрацию, прием и передачу данных. Информация о завершении должна быть сохранена и является важным документом.

Специальный уровень тестирования для зеленых медицинских зданий. Специальная проверка в основном относится к специальной проверке шума зеленого медицинского здания, звукоизоляции, плотности мощности освещения и коэффициента дневного света, полной герметичности здания, тепловых дефектов конструкции внешней оболочки и т. д. Чем выше уровень специального контроля, тем более точные результаты испытаний могут быть гарантированы.

Гарантия на экологичное медицинское здание и усилия по техническому обслуживанию. Под работами по гарантийному обслуживанию подразумевается возникновение проблем с качеством в пределах ответственности в течение гарантийного срока. Должна быть возможность как можно скорее осмотреть проблемную часть и определить ответственное подразделение; своевременно уведомить ответственное подразделение о необходимости проведения ремонта; контролировать процесс технического обслуживания; принимать результаты технического обслуживания и ремонта.

#### Этап оперативного управления

*Возможности пост-оценки проекта зеленого медицинского здания.* Постпроектная оценка — это работа по оценке после реализации проекта, которая в основном включает в себя оценку экономической выгоды проекта, подготовку отчетов об оценке и другой соответствующий контент. Чем выше способность послепроектной оценки, тем выше общий уровень управления стоимостью проекта.

*Рациональность процесса оценки эффективности проекта.* Оценка эффективности проекта подразумевает использование методов научных расчетов для расчета расходов проекта, выгод и других показателей на основе целевых затрат, а также анализа того, достигнуты ли экономические выгоды и цели проекта.

*Возможности управления зелеными медицинскими зданиями.* Включает использование новых технологий для поддержания среды обитания пользователей, повышения эффективности и комфорта.

*Эксплуатация и управление зеленым медицинским зданием.* В основном сосредоточенность на обслуживании инфраструктуры и энергоснабжении, а также на предоставлении соответствующих основных услуг, включая холод, тепло, электричество, природный газ, водопроводную воду, горячую воду и пар. Поставка энергетических систем и соответствующих базовых услуг, таких как уборка, охрана и т. д. Чем выше уровень управления эксплуатацией, тем выше качество предоставляемых услуг и эффективнее процесс управления эксплуатацией.

*Уровень управления активами проектов зеленого медицинского строительства.* Управление активами является важной задачей на этапе эксплуатации и обслуживания. В соответствии с требованиями управления активами осуществляется планирование и оценка активов. Чем выше уровень управления активами, тем полнее меры управления предоставляются инвесторам.

*Осведомленность пользователей об управлении экологическими затратами.* Осведомленность пользователей об управлении экологическими затратами в основном отражается на техническом обслуживании внутренних помещений и оборудования зеленых медицинских зданий, а также на экологической защите воды и электричества. Чем выше осведомленность пользователя об управлении экологическими затратами, это может не только сократить последующее обслуживание затрат, но и улучшить качество проекта.

Таким образом, созданная система комплексной оценки стоимости проекта зеленого медицинского здания, учитывающая его специфику на всех стадиях жизненного цикла посредством сочетания литературных исследований и экспертных интервью позволяет пересмотреть и улучшить показатели оценки управления затратами проектов зеленых медицинских зданий. Однако данное исследование является первым этапом разработки системы критериев управления затратами зеленых медицинских зданий. Для обоснованного понимания важности и критериальности показателей, значимости и ранжирования каждого из них необходимо использовать методы аналитической иерархии и метод нечеткой комплексной оценки для построения комплексной модели оценки управления затратами. В дальнейшем исследовании предполагается также апробация разработанной системы на конкретном примере проекта зеленого медицинского здания в Китайской народной республике.

### Список литературы

1. Цуй Чжию. *Исследование по управлению затратами третьего этапа проекта недвижимости в общине Цзяньвань*. Харбинский инженерный университет; 2021. URL: <https://m.doc88.com/p-77239112557189.html> (дата обращения: 03.02.2024).
2. Чжан Цзяин. *Исследование по оценке эффекта управления затратами проектов строительства метро на основе цепочки создания стоимости*. Чэнду: Университет Сихуа; 2021. URL: <https://m.doc88.com/p-77239112557189.html> (дата обращения: 04.02.2024).
3. Ма Цинпэн. *Исследование управления затратами инженерно-строительных проектов*. Тяньцзинь: Тяньцзиньский университет; 2015. URL: <https://mall-cnki-net-443.vpn.zjyc.edu.cn/magazine/article/CDMD/1016119304.htm> (дата обращения: 04.02.2024).
4. Лу Пин. Построение системы управления затратами для полностью декорированных жилых проектов на основе бережливого строительства. *Бизнес-менеджмент*. 2021(11):72–73. URL: <https://www.doc88.com/p-07616171081698.html> (дата обращения: 04.02.2024).
5. Ли Хао, Ли Инбин, Цуй Чжуолин. Исследование модели оценки зрелости управления стоимостью проекта недвижимости, основанной на теории переменного веса. *Жилье и недвижимость*. 2021(24):7–15. URL: <https://www.doc88.com/p-90099866596292.html> (дата обращения: 04.02.2024).
6. Сюй Цуйлян. *Исследование комплексного управления затратами проекта туристической недвижимости*. Циндао: Циндаоский университет науки и технологий; 2020. URL: <https://mall-cnki-net-443.vpn.zjyc.edu.cn/magazine/article/CDMD/1020073945.htm> (дата обращения: 06.02.2024).
7. Чжоу Вэньфан. *Исследование факторов, влияющих на управление затратами проектов зеленого строительства*. Гуанчжоу: Южно-Китайский технологический университет; 2019. URL: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-2114.2022.05.079>
8. Сунь Мэншо. *Исследование комплексного управления затратами проекта реконструкции здания палаты Сеульской детской больницы*. Пекин: Пекинский университет гражданского строительства и архитектуры; 2019. URL: <https://mall-cnki-net-443.vpn.zjyc.edu.cn/magazine/article/CDMD/1019108311.htm> (дата обращения: 06.02.2024).
9. Цзя Чэнхуэй, Лю Хань, Чжан Ди. Краткая дискуссия об управлении затратами жизненного цикла медицинских зданий на примере репродуктивной больницы провинции Хэнань. *Китайская исследовательская больница*. 2018;5(02):47–51. URL: <https://wenku.baidu.com/view/8f3f64aea9956bec0975f46527d3240c8547a1e2?fr=xueshu&wktks=1709449790906> (дата обращения: 06.02.2024).
10. Ту Юэя. *Прикладные исследования в проектах строительства больниц*. Куньмин: Юньнаньский университет; 2021. URL: <https://mall-cnki-net-443.vpn.zjyc.edu.cn/magazine/article/CDMD/1021111727.htm> (дата обращения: 06.02.2024).
11. Гуань Иран. *Исследование факторов влияния на управление зеленым строительством на основе теории полного жизненного цикла*. Чжэнчжоу: Хэнаньский университет финансов и экономики; 2022. URL: <https://mall-cnki-net-443.vpn.zjyc.edu.cn/magazine/article/CDMD/1022632131.htm> (дата обращения: 05.02.2024).
12. Чэнь Шаньшань. *Исследование модели зрелости и оценки управления стоимостью проекта недвижимости на основе полного жизненного цикла*. Чунцин: Университет Чунцина; 2015. URL: <https://d.wanfangdata.com.cn/thesis/D684309> (дата обращения: 05.02.2024).

13. Дай Сюэмэй. *Исследование комплексного управления затратами проекта Zhengshanjia компании по недвижимости*. Ланьчжоу: Университет Ланьчжоу; 2022. URL: <https://ir.lzu.edu.cn/handle/262010/497196> (дата обращения: 05.02.2024).
14. Цзяо Дж, Ду Ю, Ян Дж и др. Оценка управления затратами на проектирование электросетей: теория жизненного цикла. В: *IEEE Инновационные технологии интеллектуальных сетей — Азия (ISGT Asia)*; 2019. С. 2499–2504. <https://doi.org/10.1109/isgt-asia.2019.8880881>
15. Цяо Цзюньцзе, Чжун Вэй, Инь Илин, Ван Чжисинь. Исследование стратегии комплексного инженерного консалтинга при развитии предприятий, занимающихся консалтингом в области инженерных затрат. *Технология управления проектами*, 2019,17(07):59–63. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4313.2019.07.010>
16. Ван Ляньюэ, Цюй Сяовэй, Ли Диндин, Цюй Жунжун. Факторы, влияющие на контроль затрат на зеленое строительство. *Журнал Шэньянского университета*. 2020;32(5):416–422. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4313.2019.07.010>
17. Чжэн Цзиньбин. *Исследование по контролю затрат проектов сотрудничества в сфере недвижимости*. Ханчжоу: Чжэцзянский университет; 2022. URL: <https://mall-cnki-net-443.vpn.zjyc.edu.cn/magazine/article/CDMD/1022725693.htm> (дата обращения: 05.02.2024).
18. Бай Юнчунь. *Исследование комплексного инженерного консультирования на основе практики строительных проектов*. Хэфэй: Хэфэйский технологический университет; 2020. URL: <https://d.wanfangdata.com.cn/thesis/D02215103> (дата обращения: 05.02.2024).
19. Ян Липей. *Исследование ключевых факторов, влияющих на эффективность управления стоимостью проекта недвижимости на основе всего процесса*. Чжэнчжоу: Университет Чжэнчжоу; 2019. URL: <https://d.wanfangdata.com.cn/thesis/D01700711> (дата обращения: 05.02.2024).
20. Хуан Дяньдань. *Исследование по управлению затратами всего процесса инженерных проектов зеленого строительства*. Цзиньчжоу: Журнал Ляонинского технологического университета. 2021;6:104–107 <https://doi.org/10.47939/et.v2i6.33>
21. Лю Цзюнь. *Исследование применения модели комплексного инженерного консалтинга*. Чэнду: Юго-Западный университет Цзяотун; 2019. URL: <https://mall-cnki-net-443.vpn.zjyc.edu.cn/magazine/article/CDMD/1019950845.htm> (дата обращения: 04.02.2024).
22. Ву Х, Ли Х, Лу Дж и др. Анализ факторов, влияющих на дополнительные затраты на экологическое строительство. *Advanced Materials Research*, 2014;1073–1076:1249–1253. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1073-1076.1249>

## References

1. Cui Zhiyu. *Research on Cost Management of the FL Jiangwan District Phase III Real Estate project*. M.Sci. (Engineering) Dissertation. Harbin Engineering University; 2021. URL: <https://m.doc88.com/p-77239112557189.html> (accessed: 3.02.2024).
2. Zhang Jiaying. *A Study to Evaluate the Cost Management Effect of Metro Construction Projects Based on Value Chain*. Chengdu: Xihua University; 2021. URL: <https://m.doc88.com/p-77239112557189.html> (accessed: 4.02.2024).
3. Ma Qingpeng. *A Study of Cost Management in Engineering and Construction Projects*. Tianjin: Tianjin University; 2015. URL: <https://mall-cnki-net-443.vpn.zjyc.edu.cn/magazine/article/CDMD/1016119304.htm> (accessed: 4.02.2024).
4. Lu Ping. *Research on Cost Management of Fully Decorated Residential Projects Based on Lean Construction*. *Business Management*. 2021(11):72–73. URL: <https://www.doc88.com/p-07616171081698.html> (accessed: 4.02.2024).
5. Li Hao, Li Yingying, Cui Zhuolin. *A Study on a Real Estate Project Cost Management Maturity Assessment Model Based on Variable Weight Theory*. *Housing and Real Estate*. 2021(24):7–15. URL: <https://www.doc88.com/p-90099866596292.html> (accessed: 4.02.2024).
6. Xu Cuilian. *Study on Integrated Cost Management of Tourism Real Estate Project*. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology; 2020. URL: <https://mall-cnki-net-443.vpn.zjyc.edu.cn/magazine/article/CDMD/1020073945.htm> (accessed: 6.02.2024).
7. Zhou Wenfang. *A Study of Factors Influencing Cost Management of Green Building Projects*. Guangzhou: South China University of Technology; 2019. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-2114.2022.05.079>
8. Sun Mengshuo. *Study on Integrated Cost Management of Seoul Children's Hospital Ward Building Renovation Project*. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture; 2019. URL: <https://mall-cnki-net-443.vpn.zjyc.edu.cn/magazine/article/CDMD/1019108311.htm> (accessed: 6.02.2024).

9. Jia Chenghui, Liu Han, Zhang Di. Discussion on Life Cycle Cost Management of the Medical Buildings — Taking Henan Medical Reproductive Hospital as an Example. *Journal of Chinese Research Hospitals*. 2018;5(02):47–51. URL: <https://wenku.baidu.com/view/8f3f64aea9956bec0975f46527d3240c8547a1e2?fr=xueshu& wkts =1709449790906> (accessed: 6.02.2024).
10. Tu Yuey. *Applied research in hospital construction projects*. Kunming: Yunnan University; 2021. URL: <https://mall-cnki-net-443.vpn.zjyc.edu.cn/magazine/article/CDMD/1021111727.htm> (accessed: 6.02.2024).
11. Guan Iran. *A Study of Influencing Factors on Green Building Management Based on Full Life Cycle Theory*. Zhengzhou: Henan University of Finance and Economics; 2022. URL: <https://mall-cnki-net-443.vpn.zjyc.edu.cn/magazine/article/CDMD/1022632131.htm> (accessed: 5.02.2024).
12. Chen Shanshan. *A Study of the Maturity Model and Assessment of Real Estate Project Cost Management Based on the Full Life Cycle*. Chongqing: Chongqing University; 2015. URL: <https://d.wanfangdata.com.cn/thesis/D684309>
13. Dai Xuemei. *A Study on the Integrated Cost Management of Zhengshanjia Real Estate Company Project*. Lanzhou: Lanzhou University; 2022. URL: <https://ir.lzu.edu.cn/handle/262010/497196> (accessed: 5.02.2024).
14. Jiao J, Du Y, Yang J, et al. Cost Management Evaluation of Power Grid Engineering: A Life Cycle Theory. In: *Proceedings of the Conference 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies — Asia (ISGT Asia)*. Chengdu: IEEE; 2019. P. 2499–2504. <https://doi.org/10.1109/isgt-asia.2019.8880881>
15. Qiao Junjie, Zhong Wei, Yin Yilin, Wang Zhixin Research on Integrated Engineering Consulting Strategy in the Development of Engineering Cost Consulting Enterprises. *Project Management Technology*, 2019, 17(07):59–63. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4313.2019.07.010>
16. Wang Lianyue, Qu Xiaowei, Li Dingding, Qu Rongrong. Influencing Factors of Green Building Cost Control Based on DEMATEL-ISM. *Journal of Shenyang University (Natural Science)*. 2020;32(5):416–422. <https://doi.org/10.16103/j.cnki.21-1583/n.2020.05.010>
17. Zheng Jingying. *A Study on Cost Control of Real Estate Cooperation Projects*. Hangzhou: Zhejiang University; 2022. URL: <https://mall-cnki-net-443.vpn.zjyc.edu.cn/magazine/article/CDMD/1022725693.htm> (accessed: 5.02.2024).
18. Bai Yongchun. *Research on Integrated Engineering Consulting Based on Construction Project Practice*. Hefei: Hefei University of Technology; 2020. URL: <https://d.wanfangdata.com.cn/thesis/D02215103> (accessed: 5.02.2024).
19. Yang Lipai. *A Study of the Key Factors Affecting the Effectiveness of Real Estate Project Cost Management Based on the Entire Process*. Zhengzhou: Zhengzhou University; 2019. URL: <https://d.wanfangdata.com.cn/thesis/D01700711> (accessed: 5.02.2024).
20. Huang Dandan. Analysis of Cost Budget and Cost Control of New Green Building Project. *Journal of Liaoning University of Technology, Jinzhou*. 2021;6:104–107. <https://doi.org/10.47939/et.v2i6.33>
21. Liu Junwu. *Research on the Application of the Integrated Engineering Consulting Model*. Chengdu: Southwest Jiaotong University; 2019. URL: <https://mall-cnki-net-443.vpn.zjyc.edu.cn/magazine/article/CDMD/1019950845.htm> (accessed: 4.02.2024).
22. Wu X, Li X, Lu J, et al. Analysis of Influencing Factor on Green Building's Incremental Cost Analysis of factors affecting the incremental costs of green construction. *Advanced Materials Research*. 2014;1073–1076:1249–1253. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1073-1076.1249>

Об авторах:

**Константин Михайлович Крюков**, доцент кафедры организации строительства Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат экономических наук, доцент, [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-7151), [ScopusID](https://scopus.org/authorid/1511517151), [kkrioukov@gmail.com](mailto:kkrioukov@gmail.com)

**Чжан Чунюэ**, магистрант 2 года обучения кафедры организации строительства Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [1351595732@qq.com](mailto:1351595732@qq.com)

Заявленный вклад авторов:

К.М. Крюков — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, доработка текста, формирование выводов.

Чжан Чунюэ — исследование по теме работы, проведение расчетов, подготовка текста.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 20.02.2024

Поступила после рецензирования 16.03.2024

Принята к публикации 20.03.2024

*About the Authors:*

**Konstantin M. Kryukov**, Cand.Sci. (Economics), Associate Professor of the of Construction Management Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ORCID](#), [ScopusID](#), [kkrioukov@gmail.com](mailto:kkrioukov@gmail.com)

**Chunyue Zhang**, 2-year Master's Student of the Construction Management Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [1351595732@qq.com](mailto:1351595732@qq.com)

*Claimed contributorship:*

KM Kryukov: formulating the main concept, aim and objectives of the research, scientific supervision, refining the text, formulating the conclusions.

Zhang Chunyue: conducting research on the topic, carrying out calculations, preparing the text.

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

*All authors have read and approved the final manuscript.*

**Received** 20.02.2024

**Revised** 16.03.2024

**Accepted** 20.03.2024

# СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА CONSTRUCTION MECHANICS



УДК 624.04

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-71-83>

## Определение реологических параметров полимеров при помощи методов машинного обучения



А.С. Чепурненко , Т.Н. Кондратьева

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

✉ [anton\\_chepurnenk@mail.ru](mailto:anton_chepurnenk@mail.ru)

EDN: ECDAUG

### Аннотация

**Введение.** В настоящей работе рассмотрена методика определения реологических параметров материалов, входящих в нелинейную реологическую модель Максвелла-Гуревича, по кривым релаксации напряжений. Представлен обзор основных направлений метаэвристических подходов (локальный поиск, эволюционные алгоритмы) к решению задач комбинаторной оптимизации. Описаны метаэвристические алгоритмы для решения некоторых важных задач комбинаторной оптимизации с особым акцентом на построение деревьев поиска решений. Проведен сравнительный анализ алгоритмов для решения задачи регрессии в CatBoost Regressor. Целью работы является определение реологических свойств полимеров методами машинного обучения.

**Материалы и методы.** Объектом исследования выступают сгенерированные наборы данных, полученные на основе теоретических кривых релаксации напряжений. Представлены таблицы исходных данных для обучения моделей по всем выборкам, проведен статистический анализ характеристик исходных наборов данных. Общее количество численных экспериментов по всем выборкам составило 346020 вариаций. При разработке моделей использован метод искусственного интеллекта CatBoost, для повышения точности модели применены методы регуляризации (Weight Decay, Decoupled Weight Decay Regularization, Augmentation), для нормализации данных использован метод Z-Score.

**Результаты исследования.** В результате исследования разработаны интеллектуальные модели для определения реологических параметров полимеров (начальная релаксационная вязкость, модуль скорости) по сгенерированным наборам данных на примере эпоксидного связующего ЭДТ-10. По результатам тестирования моделей с наилучшими параметрами проведены оценки качества: для параметра  $\eta_0^*$  диапазон значений MAPE 0,46 — 2,72, MSE 0,15 — 1,09, RMSE 0,19 — 0,44, MAPE 0,46 — 1,27; для параметра  $m^*$  — MAPE 0,07 — 0,32, MSE 0,01 — 0,13, RMSE 0,10 — 0,41, MAPE 0,58 — 2,72. Полученные значения метрик являются допустимыми. Графики обучения демонстрируют стабильность процесса.

**Обсуждение и заключения.** Разработанные интеллектуальные модели являются масштабируемыми и кроссплатформенными, имеют практическое прикладное значение, что обеспечивает их применение в широком спектре научных и инженерных приложений.

**Ключевые слова:** реология, полимеры, искусственный интеллект, машинное обучение, регрессия, CatBoost

**Для цитирования.** Чепурненко А.С., Кондратьева Т.Н. Определение реологических параметров полимеров при помощи методов машинного обучения. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2024;3(1):71–83. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-71-83>

## Determining the Rheological Parameters of Polymers Using Machine Learning Techniques

Anton S. Chepurnenko , Tatiana N. Kondratieva 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

✉ [anton\\_chepurnenk@mail.ru](mailto:anton_chepurnenk@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** The paper investigates the methodology for determining the rheological parameters of materials based on the nonlinear Maxwell-Gurevich rheological model using the stress relaxation curves. The review of the main directions of the metaheuristic approaches (local search, evolutionary algorithms) to solving the combinatorial optimization problems is presented. The metaheuristic algorithms for solving some important combinatorial optimization problems with the special emphasis on building decision trees are described. The comparative analysis of the algorithms for solving the regression problem in CatBoost Regressor is carried out. The aim of the work is to determine the rheological properties of polymers using machine learning techniques.

**Materials and Methods.** The objects of the study are the generated data sets obtained on the basis of the theoretical stress relaxation curves. The source data tables for model training across all samples are presented, and the statistical analysis of the source data sets characteristics is carried out. The total number of numerical experiments across all samples amounted to 346020 variations. To develop the models, the CatBoost artificial intelligence techniques were used; the regularization techniques (Weight Decay, Decoupled Weight Decay Regulation, Augmentation) were used to increase the model accuracy; and Z-Score technique was used for data normalization.

**Results.** As a result of the research, the intelligent models for determining the rheological parameters of polymers (initial relaxation viscosity, velocity modulus) have been developed based on the generated data sets on the example of the epoxy binder EDT-10. Based on the testing results of the models with the best parameters, the quality assessments were carried out: for the parameter  $\eta_0^*$  the range of values MAPE 0.46 — 2.72, MSE 0.15 — 1.09, RMSE 0.19 — 0.44, MAPE 0.46 — 1.27; for the parameter  $m^*$  — MAPE 0.07 — 0.32, MSE 0.01 — 0.13, RMSE 0.10 — 0.41, MAPE 0.58 — 2.72. The resulting metric values are permissible. The training graphs demonstrate the stability of the process.

**Discussion and Conclusion.** The developed intelligent models are scalable and cross-platform, have practical applied significance that ensures their implementation in a wide range of the scientific and engineering apps.

**Keywords:** rheology, polymers, artificial intelligence, machine learning, regression, CatBoost

**For citation.** Chepurnenko AS, Kondratieva TN. Determining the Rheological Parameters of Polymers Using Machine Learning Techniques. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(1):71–83. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-71-83>

**Введение.** В настоящее время полимерные материалы и композиты на их основе находят все более широкое применение в строительстве. Как и для традиционных строительных материалов, таких как дерево и бетон, для полимерных материалов характерно явно выраженное явление ползучести. Решение задачи механики полимеров невозможно без определения их реологических свойств. Реологическое поведение полимерных материалов может быть описано линейными [1] и нелинейными моделями [2–5]. Нелинейные модели характеризуются большей сложностью, но в то же время обеспечивают лучшее совпадение с экспериментальными данными. Одной из простейших линейных моделей является модель Максвелла-Томпсона, в которой тело представляется как комбинация вязких и упругих элементов. Введение в данную модель Г.И. Гуревичем зависимости релаксационной вязкости полимера от напряжения позволило получить хорошую сходимость с экспериментом для многих полимеров [6–10]. В случае одноосного напряженного состояния основное уравнение модели Максвелла-Гуревича имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \varepsilon^*}{\partial t} &= \frac{f^*}{\eta^*}, \\ f^* &= \sigma - E_\infty \varepsilon^*, \\ \frac{1}{\eta^*} &= \frac{1}{\eta_0^*} \exp\left(\frac{|f^*|}{m^*}\right).\end{aligned}\tag{1}$$

где  $\varepsilon^*$  — деформация ползучести;  $f^*$  — функция напряжений;  $\sigma$  — напряжение;  $E_\infty$  — модуль высокоэластичности;  $\eta_0^*$  — начальная релаксационная вязкость (далее просто «вязкость»);  $m^*$  — модуль скорости.

Модуль высокоэластичности представляет собой релаксационную константу, устанавливающую связь между предельной деформацией ползучести (при  $t \rightarrow \infty$ ) и действующим напряжением ( $E_\infty = \frac{\sigma_\infty}{\varepsilon_\infty^*}$ ). Определение данной

величины выполняется из экспериментов на ползучесть или релаксацию напряжений и не составляет большого труда в случае выхода экспериментальной кривой на горизонтальную асимптоту. Нахождение величин  $m^*$  и  $\eta_0^*$  в то же время связано с определенными трудностями, поскольку теоретические кривые ползучести и релаксации при использовании уравнения Максвелла-Гуревича не могут быть описаны аналитическими функциями. Некоторые алгоритмы определения этих величин представлены в работах [11–13]. Недостатком этих алгоритмов являются высокие требования к качеству экспериментальных кривых.

Большие перспективы в задачах определения свойств материалов, в том числе и полимерных, имеют методы искусственного интеллекта. В статье [14] впервые была представлена методика обработки кривых релаксации полимеров при помощи искусственных нейронных сетей (ИНС). Помимо ИНС к эффективным алгоритмам машинного обучения относится алгоритм CatBoost Regressor (Adaptive Boosting). Adaptive Boosting (AdaBoost) — метаэвристика высокого уровня, принадлежащая классу комбинированных оптимизационных методов, организующая прямой случайный поиск вероятных решений, оптимальных или близких к оптимальным решениям, пока не будет выполнено заданное условие либо достигнуто заданное число итераций. Алгоритмы комбинаторной оптимизации позволяют решать большое количество практических задач, таких как, например, задача коммивояжера, задачи о назначениях, задачи планирования, построение деревьев поиска решений, размерность которых может достигать экспоненциальной. Авторы статей [15–17] предлагают обзор основных направлений метаэвристических подходов (локальный поиск, эволюционные алгоритмы) к решению задач комбинаторной оптимизации. Алгоритмы метаэвристик в задачах поиска оптимального контента имеют широкий спектр задач, в том числе задачи, связанные с обучением моделей, являются альтернативным решением при глубоком обучении нейронной сети, решают проблемы переобучения моделей [16].

При выборе семейств алгоритмов для решения задачи регрессии в CatBoost Regressor часто оставляют выбор в пользу решающих деревьев, хотя это могут быть и линейные алгоритмы, или какие-либо другие.

Часто встречающиеся закономерности в обучающей выборке, которые не могут не присутствовать в тестовой выборке, могут негативно влиять на тестовую выборку или на всю выборку обучающегося пространства, что приводит модель к переобучению. Иными словами, такие закономерности имеют характер совпадения. Чем больше степеней свободы имеет наша модель, тем больше рисков в переобучении.

Так, например, в моделях, построенных на алгоритмах решающих деревьев, переобучение происходит достаточно быстро на простых моделях, чего можно избежать при построении дерева решений с большой глубиной переобучения и добиться идеального качества модели лишь потому, что каждому элементу обучающей выборки будет соответствовать свой лист в решающем дереве.

Весьма наглядным примером является алгоритм  $k$ -ближайших соседей, который подстраивается под обучающую выборку, поскольку среди  $k$ -ближайших соседей рассматриваемого объекта может иметь место выброс или условно локальный шум, которые приведут к ошибке всего алгоритма.

Линейные алгоритмы склонны к переобучению, поскольку для них необходимо учитывать размерность признаков: если размерность признаков из количества признаков будет много больше, то переобучение неизбежно, потому что появится слишком много степеней свободы для небольшого размера выборки.

Конечно, переобучение моделей — это обычная практика при их тестировании, когда есть хоть какое-то условие принятия решения в контексте неполных или разреженных данных, однако на практике в контексте машинного обучения переобучение понимается как значимое отклонение качества модели обучающей выборки от тестовой выборки.

Проведенный анализ предметной области говорит о необходимости расширения инструментов для прогнозирования реологических параметров полимеров, в том числе с применением современных интеллектуальных алгоритмов. Их внедрение позволит сократить время и ресурсы, затрачиваемые на определение физических характеристик материала, ускорить процесс разработки новых продуктов и технологий, а также улучшить качество и конкурентоспособность выпускаемой продукции.

Целью настоящей статьи является построение модели для прогнозирования реологических параметров полимера по кривым релаксации напряжений на основе алгоритма CatBoost.

**Материалы и методы.** Методика обработки кривых релаксации напряжений апробировалась на примере оксидного связующего ЭДТ-10, выступающего в качестве полимерной матрицы в стеклопластиках. Для обучения модели были сгенерированы три набора данных по методике, приведенной в [14], с различными размерностями датасетов.

В таблицах 1–3 частично представлены анализируемые массивы данных. Общее количество численных экспериментов составило:  $n_1 = 64800$  (таблица 1);  $n_2 = 131220$  (таблица 2);  $n_3 = 150000$  (таблица 3).

Таблица 1

Таблица исходных данных для обучения модели ( $n_1$ )

| №      | Деформация,<br>% | Напряжение<br>в начале<br>процесса,<br>МПа | Напряжение<br>в конце<br>процесса,<br>МПа | Время<br>релаксации, ч | Условное<br>время<br>окончания<br>процесса, ч | Модуль<br>скорости,<br>МПа | Вязкость,<br>10 <sup>6</sup> МПа·с |
|--------|------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 1      | 1                | 20                                         | 6,666666667                               | 0,00259842             | 0,273543249                                   | 2                          | 5                                  |
| 2      | 2                | 40                                         | 13,33333333                               | 3,60E-05               | 0,110365845                                   | 2                          | 5                                  |
| 3      | 3                | 60                                         | 20                                        | 6,30E-07               | 0,051685264                                   | 2                          | 5                                  |
| 4      | 1                | 20                                         | 6,666666667                               | 0,08131234             | 8,559969561                                   | 2                          | 156,4646                           |
| 5      | 2                | 40                                         | 13,33333333                               | 0,00112781             | 3,453670584                                   | 2                          | 156,4646                           |
| 6      | 3                | 60                                         | 20                                        | 1,97E-05               | 1,617383311                                   | 2                          | 156,4646                           |
| 7      | 1                | 20                                         | 6,666666667                               | 0,16002626             | 16,84639587                                   | 2                          | 307,9292                           |
| ...    |                  |                                            |                                           |                        |                                               |                            |                                    |
| 647997 | 3                | 120                                        | 60                                        | 0,00070187             | 46,05477107                                   | 4                          | 14848,53                           |
| 647998 | 1                | 40                                         | 20                                        | 2,92322874             | 307,7361555                                   | 4                          | 15000                              |
| 647999 | 2                | 80                                         | 40                                        | 0,04054574             | 124,1615756                                   | 4                          | 15000                              |
| 648800 | 3                | 120                                        | 60                                        | 0,00070903             | 46,52455947                                   | 4                          | 15000                              |

Таблица 2

Таблица исходных данных для обучения модели ( $n_2$ )

| №      | Деформация,<br>% | Напряжение<br>в начале<br>процесса,<br>МПа | Напряжение<br>в конце<br>процесса,<br>МПа | Время<br>релаксации, ч | Условное<br>время<br>окончания<br>процесса, ч | Модуль<br>скорости,<br>МПа | Вязкость,<br>10 <sup>6</sup> МПа·с |
|--------|------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 1      | 1                | 20                                         | 6,666666667                               | 0,00259842             | 0,273543249                                   | 2                          | 5                                  |
| 2      | 2                | 40                                         | 13,33333333                               | 3,60E-05               | 0,110365845                                   | 2                          | 5                                  |
| 3      | 3                | 60                                         | 20                                        | 6,30E-07               | 0,051685264                                   | 2                          | 5                                  |
| 4      | 1                | 20                                         | 6,666666667                               | 0,13467771             | 14,1778857                                    | 2                          | 259,1525                           |
| 5      | 2                | 40                                         | 13,33333333                               | 0,001868006            | 5,720317864                                   | 2                          | 259,1525                           |
| 6      | 3                | 60                                         | 20                                        | 3,27E-05               | 2,678873513                                   | 2                          | 259,1525                           |
| 7      | 1                | 20                                         | 6,666666667                               | 0,26675701             | 28,08222816                                   | 2                          | 513,3050                           |
| ...    |                  |                                            |                                           |                        |                                               |                            |                                    |
| 131217 | 3                | 120                                        | 60                                        | 0,00069702             | 45,73627046                                   | 4                          | 14745,84                           |
| 131218 | 1                | 40                                         | 20                                        | 2,92322874             | 307,7361555                                   | 4                          | 15000                              |
| 131219 | 2                | 80                                         | 40                                        | 0,04054574             | 124,1615756                                   | 4                          | 15000                              |
| 131220 | 3                | 120                                        | 60                                        | 0,00070903             | 46,52455947                                   | 4                          | 15000                              |

Таблица 3

Таблица исходных данных для обучения модели ( $n_3$ )

| №      | Деформация, % | Напряжение в начале процесса, МПа | Напряжение в конце процесса, МПа | Время релаксации, ч | Условное время окончания процесса, ч | Модуль скорости, МПа | Вязкость, $10^6$ МПа·с |
|--------|---------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------------|
| 1      | 1             | 20                                | 6,666666667                      | 0,00259842          | 0,273543249                          | 2                    | 5                      |
| 2      | 2             | 40                                | 13,33333333                      | 3,60E-05            | 0,110365845                          | 2                    | 5                      |
| 3      | 3             | 60                                | 20                               | 6,30E-07            | 0,051685264                          | 2                    | 5                      |
| 4      | 1             | 20                                | 6,666666667                      | 0,16163267          | 17,01550661                          | 2                    | 311,0204               |
| 5      | 2             | 40                                | 13,33333333                      | 0,00224187          | 6,865206031                          | 2                    | 311,0204               |
| 6      | 3             | 60                                | 20                               | 3,92E-05            | 3,21503438                           | 2                    | 311,0204               |
| 7      | 1             | 20                                | 6,666666667                      | 0,32066692          | 33,75746998                          | 2                    | 617,0408               |
| ...    |               |                                   |                                  |                     |                                      |                      |                        |
| 149997 | 3             | 120                               | 60                               | 0,00069456          | 45,57539516                          | 4                    | 14693,97               |
| 149998 | 1             | 40                                | 20                               | 2,92322874          | 307,7361555                          | 4                    | 15000                  |
| 149999 | 2             | 80                                | 40                               | 0,04054574          | 124,1615756                          | 4                    | 15000                  |
| 150000 | 3             | 120                               | 60                               | 0,00070903          | 46,52455947                          | 4                    | 15000                  |

В таблицах 4–6 представлены статистические характеристики исходных наборов данных по выборкам:  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  — соответственно.

Таблица 4

Статистические характеристики исходного набора данных ( $n_1$ )

| Параметр | Деформация, % | Напряжение в начале процесса, МПа | Напряжение в конце процесса, МПа | Время релаксации, ч | Условное время окончания процесса, ч | Модуль скорости, МПа | Вязкость, $10^6$ МПа·с |
|----------|---------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------------|
| count    | 64800,00      | 64800,00                          | 64800,00                         | 64800,00            | 64800,00                             | 64800,00             | 64800,00               |
| mean     | 2,00          | 60,0                              | 25,38                            | 1,99                | 146,13                               | 3,00                 | 7502,50                |
| std      | 0,82          | 28,6                              | 12,68                            | 6,35                | 179,06                               | 0,68                 | 4372,22                |
| min      | 1,00          | 20,0                              | 6,67                             | 0,00                | 0,00                                 | 2,00                 | 5,00                   |
| max      | 3,00          | 120,0                             | 60,00                            | 83,66               | 1504,03                              | 4,00                 | 15000,00               |

Таблица 5

Статистические характеристики исходного набора данных ( $n_2$ )

| Параметр | Деформация, % | Напряжение в начале процесса, МПа | Напряжение в конце процесса, МПа | Время релаксации, ч | Условное время окончания процесса, ч | Модуль скорости, МПа | Вязкость, $10^6$ МПа·с |
|----------|---------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------------|
| count    | 131220,00     | 131220,00                         | 131220,00                        | 131220,00           | 131220,00                            | 131220,00            | 131220,00              |
| mean     | 2,00          | 60,00                             | 25,42                            | 1,83                | 143,25                               | 3,00                 | 7502,50                |
| std      | 0,82          | 28,19                             | 12,46                            | 5,72                | 172,07                               | 0,65                 | 4401,46                |
| min      | 1,00          | 20,00                             | 6,67                             | 0,00                | 0,00                                 | 2,00                 | 5,00                   |
| max      | 3,00          | 120,00                            | 60,00                            | 83,66               | 1504,03                              | 4,00                 | 15000,00               |

Таблица 6

Статистические характеристики исходного набора данных ( $n_3$ )

| Параметр | Деформация, % | Напряжение в начале процесса, МПа | Напряжение в конце процесса, МПа | Время релаксации, ч | Условное время окончания процесса, ч | Модуль скорости, МПа | Вязкость, $10^6$ МПа·с |
|----------|---------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------------|
| count    | 150000,00     | 150000,00                         | 150000,00                        | 150000,00           | 150000,00                            | 150000,00            | 150000,00              |
| mean     | 2,00          | 60,00                             | 25,42                            | 1,80                | 139,77                               | 3,00                 | 7502,50                |
| std      | 0,82          | 28,11                             | 12,42                            | 5,60                | 167,24                               | 0,64                 | 4416,16                |
| min      | 1,00          | 20,00                             | 6,67                             | 0,00                | 0,00                                 | 2,00                 | 5,00                   |
| max      | 3,00          | 120,00                            | 60,00                            | 83,66               | 1504,03                              | 4,00                 | 15000,00               |

Одним из способов борьбы с переобучением модели является регуляризация функции потерь. За счет коэффициентов регуляризации, задающих перераспределение весов в модели, функция потерь принимает минимальное значение. Данный метод обеспечивает повышенную точность модели и снижает ненужные отклонения.

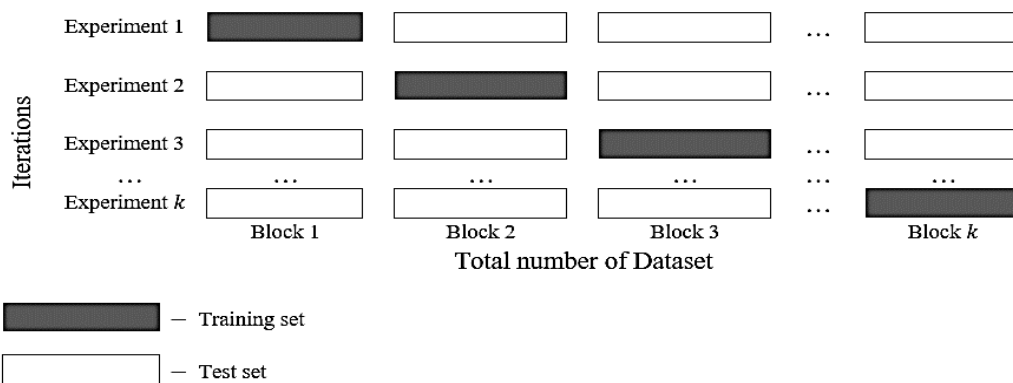
Регуляризация через функцию потерь в глубоком обучении подразумевает применение метода распада весов (Weight Decay), при котором коэффициенты регуляризации  $\lambda(t)$  позволяют избежать энтропии распределения предсказаний нейронной сети (2):

$$L_r(t+1) = L_r(t) + \lambda(t)W(t), \quad (2)$$

где  $t$  — порядковый номер текущей итерации;  $W(t)$  — норма вектора весов;  $L_r(t+1)$  — функция регуляризации.

Каждый вес нейронной сети обновляется пропорционально согласно градиенту функции потерь. Данный метод был совмещен с методом градиентного спуска Adam, в результате комбинации метода оптимизации и техники регуляризации через функцию потерь появился метод AdamW [17].

Другой вариант борьбы с переобучением модели — кросс-валидация. В данном методе проводится  $k$  раз обучений модели вместо одного, как предусмотрено в методе регуляризации функции потерь. Идея в следующем: по схеме (рис. 1) на каждом эксперименте выбирается  $k$ -е — окно (блок, он же валидационный) из  $k$  — элементов; на остальных:  $k-1$  — окнах происходит обучение и далее проверка качества модели. Таким образом, разрушаются закономерности, сформированные ранее, и формируются новые более качественные до того момента, пока ошибка модели не станет удобоваримой. Данный способ мы уже использовали в своей работе [18] и наблюдали в работах других ученых [19].

Рис. 1. Разбиение данных в  $k$ -блочную перекрестную проверку

Третий способ регуляризации нейронной сети связан с изменением данных. Аугментация данных подразумевает дополнение данных, например, дисперсионным шумом за счет увеличения объема обучающей выборки. Новые данные могут улучшить качество модели, повысить ее чувствительность и робастность. Получив дополнительные данные, нейронная сеть понимает какие преобразования над ними являются допустимыми. Чаще всего аугментация данных применяется в области компьютерного зрения.

В данной работе мы остановимся на втором способе регуляризации данных, а именно — связанном с изменением структуры сети.

При построении прогнозной модели важно определиться с функцией, оценивающей качество работы этой модели. Для оценки качества функционирования нейронной сети при решении задачи регрессии достаточно использовать две функции RMSE и MAPE, в отличие от задач на классификацию, где дополнительно используют такие функции, как MSE и MAE. В нашей работе мы будем оценивать возможности прогноза построенных моделей на различных выборках и сравнивать полученные результаты с моделями, построенными с разными параметрами. В таблице 7 представлены метрики, использованные в работе, приведены преимущества и недостатки. Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) рассчитывается по формуле:

$$R^2 = \frac{\left( \sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y}) (y_t - \bar{y}_t) \right)^2}{\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2 \sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y}_t)^2} \quad (3)$$

Таблица 7

Метрики качества для анализа регрессионных моделей

| Метрика качества                      | Формула                                                                          | Преимущества                                                                                                 | Недостатки                                                                      |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Mean Absolute Error (MAE)             | $MAE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T  y_t - \bar{y}_t $                               | Более устойчивая оценка моделей, чем RMSE. Не подвержена влиянию выбросов. Практически соответствует медиане | Сложно интерпретируема. Сравнивать оценки возможно только на одинаковой выборке |
| Mean Squared Error (MSE)              | $MSE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y}_t)^2$                             | Возможно сравнение моделей на различных выборках                                                             | Подвержена влиянию выбросов                                                     |
| Root-Mean-Square Error (RMSE)         | $RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y}_t)^2}$                     | Используется как при прогнозировании положительных, так и отрицательных значений                             | Неустойчивая оценка, использует усредненные значения                            |
| Mean Absolute Percentage Error (MAPE) | $MAPE = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \left  \frac{y_i - \bar{y}_i}{y_i} \right  100$ | Является эффективным критерием оценки коэффициентов моделей                                                  | Сравнивать оценки возможно только на одинаковой выборке                         |

**Результаты исследования.** В данном разделе мы предоставим результаты прогнозирования на базе трех наборов данных. Обучение моделей CatBoost Regressor проводилось по следующей схеме. Глубина дерева настраивалась в соответствии со значениями: {4, 6, 8, 10}; скорость обучения: {0,01, 0,03, 0,05, 0,07, 0,08, 0,09}; количество итераций: {500, 800, 1000, 1500}; коэффициент  $\lambda(t)=3,0$  (1) для достижения наименьшей ошибки прогнозирования. В таблице 8 представлены наборы наилучших значений параметров моделей CatBoost Regressor по выборкам  $n_1$ ;  $n_2$ ;  $n_3$  для параметров: «Вязкость» ( $\eta_0^*$ ;  $\eta_{01}^*$ ;  $\eta_{02}^*$ ;  $\eta_{03}^*$ ); «Модуль скорости» ( $m^*$ ;  $m_1^*$ ;  $m_2^*$ ;  $m_3^*$ ) соответственно.

Таблица 8

Наилучшие значения параметров для моделей CatBoost Regressor

| Параметр      | Глубина дерева | Скорость обучения | Количество итераций |
|---------------|----------------|-------------------|---------------------|
| $\eta_{01}^*$ | 6              | 0,08              | 1000                |
| $m_1^*$       | 6              | 0,08              | 1000                |
| $\eta_{02}^*$ | 6              | 0,08              | 1000                |
| $m_2^*$       | 6              | 0,08              | 1000                |
| $\eta_{03}^*$ | 6              | 0,08              | 1000                |
| $m_3^*$       | 6              | 0,08              | 800                 |

По данным таблицы 8 можно наблюдать частые совпадения наилучших значений параметров на различных выборках, это обусловлено тем, что статистические характеристики исходных наборов данных  $n_1$ ;  $n_2$ ;  $n_3$ , описанные ранее, в некоторых случаях совпадают либо разнятся в диапазоне от  $10^{-1}$  до  $10^{-3}$ . В том числе, одинаковые значения параметров обучения моделей для трех наборов данных связаны с тем, что каждый из них описывает идентичные по своей природе процессы.

Функция потерь и точность прогноза модели стабилизируются в режиме 1000 итераций для всех моделей, исключение составляет модель, построенная по выборке  $n_3$  для параметра  $m^*$ , для которой достаточно 800 итераций на этапе обучения.

Качественная оценка параметров моделей выглядит следующим образом. Для параметра  $\eta_0^*$ :  $\eta_{0_1}^*$  — RMSE = 0,173,  $R^2 = 0,995$ ;  $\eta_{0_2}^*$  — RMSE = 0,090,  $R^2 = 0,998$ ;  $\eta_{0_3}^*$  — RMSE = 0,091,  $R^2 = 0,989$ . Для параметра  $m^*$ :  $m_1^*$  — RMSE = 0,095,  $R^2 = 0,998$ ;  $m_2^*$  — RMSE = 0,07,  $R^2 = 0,997$ ;  $m_3^*$  — RMSE = 0,076,  $R^2 = 0,996$ .

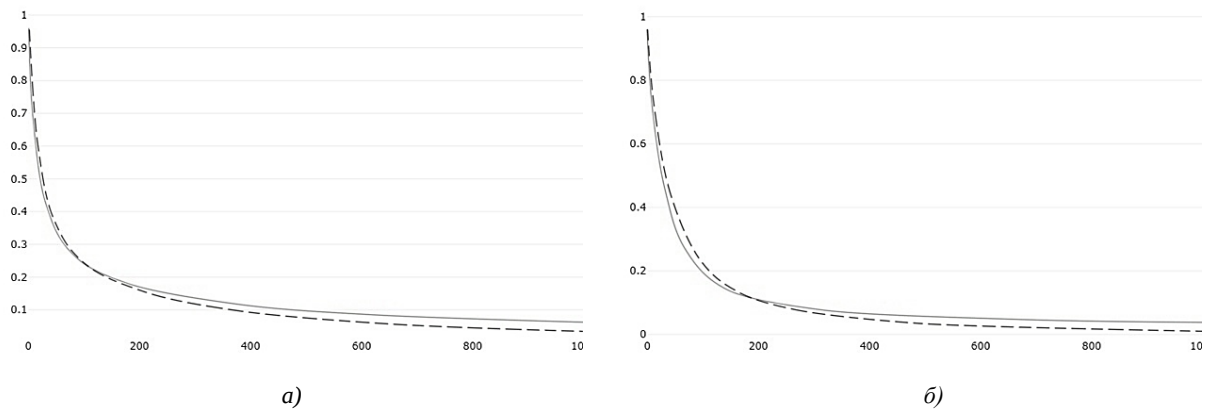
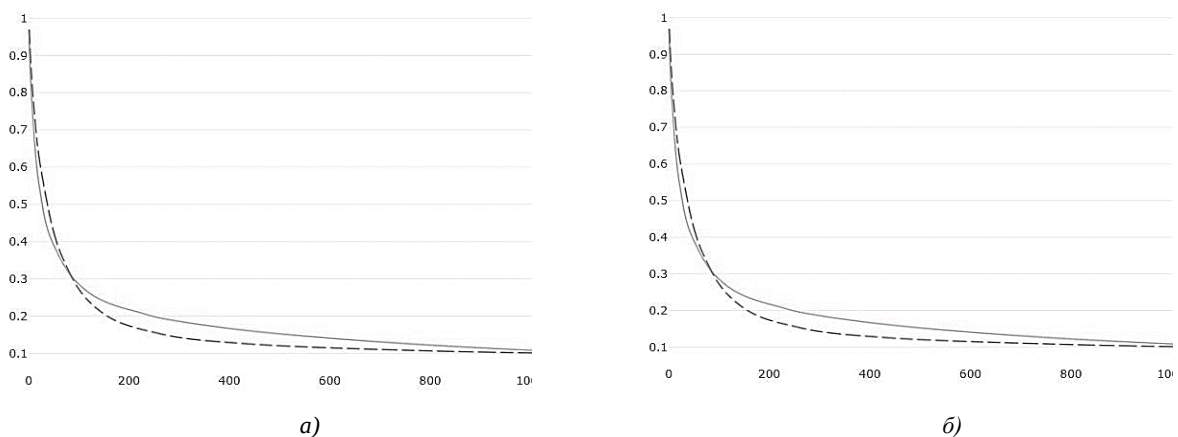
Недостатком данного метода является то, что он несет немалые затраты по времени, поскольку алгоритм поиска оптимальных параметров по сетке очень медленный из-за потенциально большого количества тестируемых комбинаций. Учитывая все комбинации значений параметров модели, каждая модель обучалась не менее 480 эпох. Для получения результирующей модели применен метод ранней остановки. Использован метод AdamW в качестве оптимизационного метода. Метрики качества работы алгоритма приведены в таблице 9.

Таблица 9

Метрики качества моделей

| Параметр       | MAE  | MSE    | RMSE | MAPE, % | $R^2_{\text{train}}$ | $R^2_{\text{test}}$ |
|----------------|------|--------|------|---------|----------------------|---------------------|
| $\eta_{0_1}^*$ | 0,35 | 0,1552 | 0,44 | 1,27    | 0,88269              | 0,87976             |
| $m_1^*$        | 0,32 | 0,1285 | 0,41 | 0,58    | 0,84161              | 0,83612             |
| $\eta_{0_2}^*$ | 0,15 | 1,0877 | 0,19 | 0,46    | 0,96721              | 0,96420             |
| $m_2^*$        | 0,07 | 0,0094 | 0,1  | 2,56    | 0,97914              | 0,97768             |
| $\eta_{0_3}^*$ | 0,24 | 0,9893 | 0,3  | 0,83    | 0,91130              | 0,90678             |
| $m_3^*$        | 0,08 | 0,0105 | 0,1  | 2,72    | 0,97569              | 0,97436             |

На рис. 2–4 показаны графики прогноза: на обучающих выборках — пунктирная линия; на тестовых выборках — сплошная линия итоговых моделей с наилучшими параметрами (таблица 8).

Рис. 2. Графики прогноза на выборке ( $n_1$ ) по параметрам: а — для  $\eta_0^*$ ; б — для  $m^*$ Рис. 3. Графики прогноза на выборке ( $n_2$ ) по параметрам: а — для  $\eta_0^*$ ; б — для  $m^*$

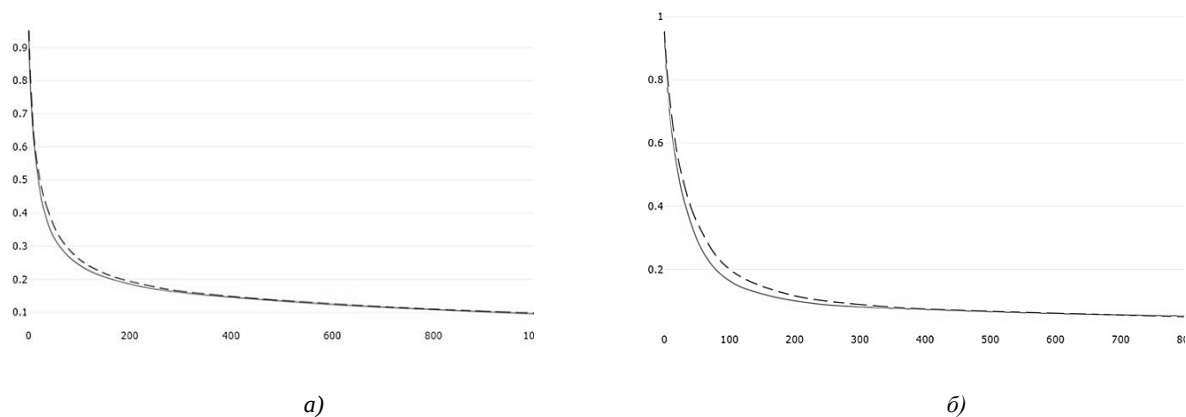


Рис. 4. Графики прогноза на выборке ( $n_3$ ) по параметрам: а — для  $\eta_0^*$ ; б — для  $t^*$

Соотношение между реальными и прогнозируемыми значениями для параметров  $\eta_0^*$  и  $t^*$  показаны на рисунках 5–7 по выборкам  $n_1$ ;  $n_2$ ;  $n_3$  соответственно обозначениям.

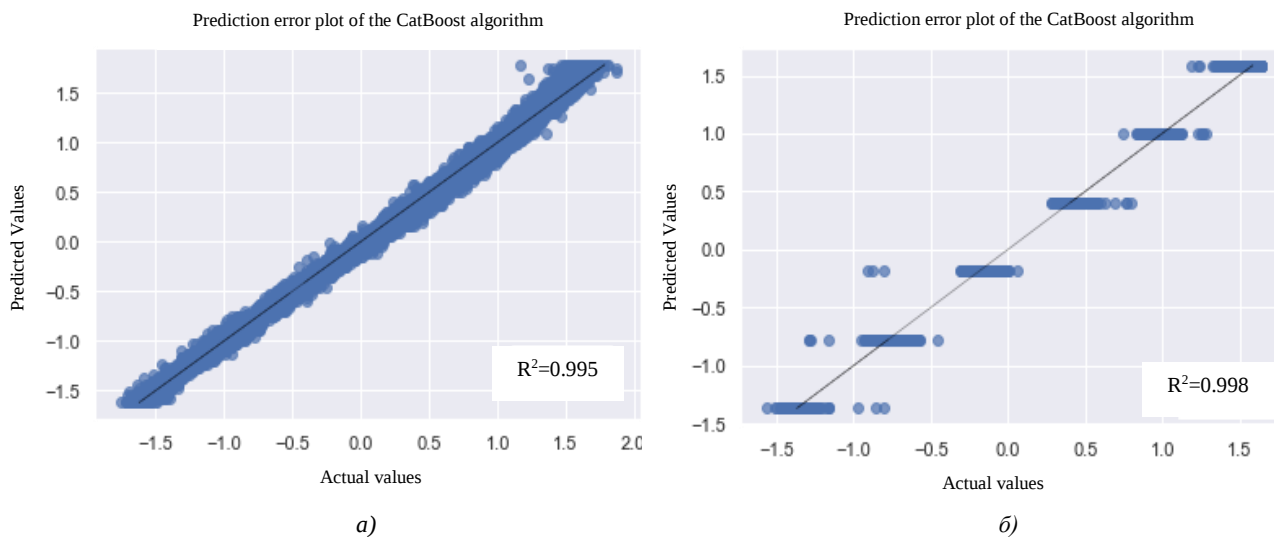


Рис. 5. Графики ошибок прогноза ( $n_1$ ): а — для  $\eta_0^*$ ; б — для  $t^*$

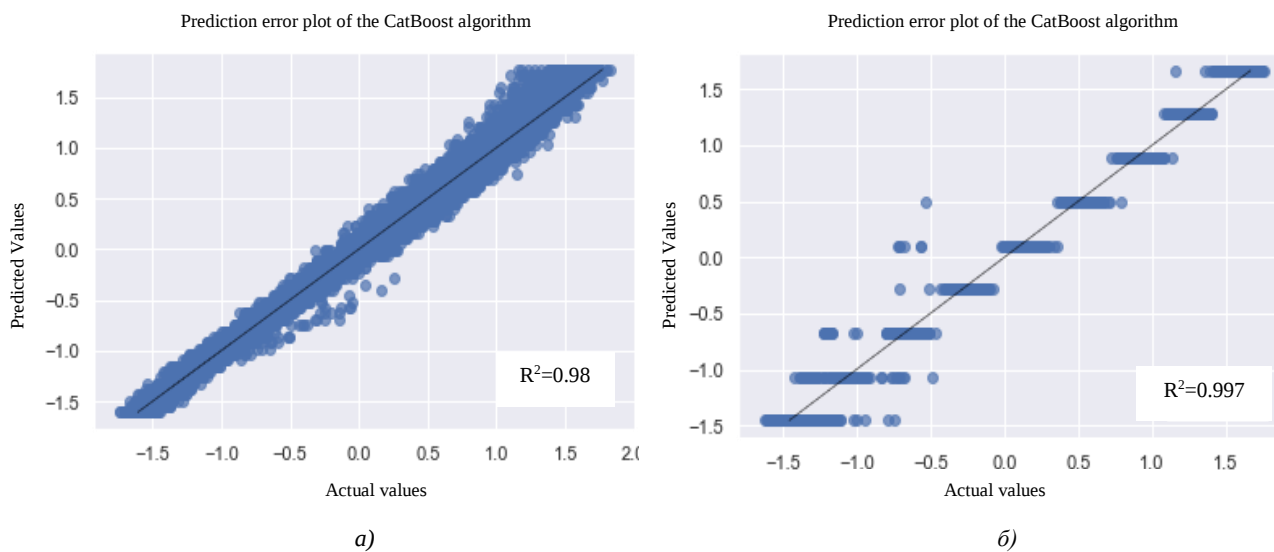


Рис. 6. Графики ошибок прогноза ( $n_2$ ): а — для  $\eta_0^*$ ; б — для  $t^*$

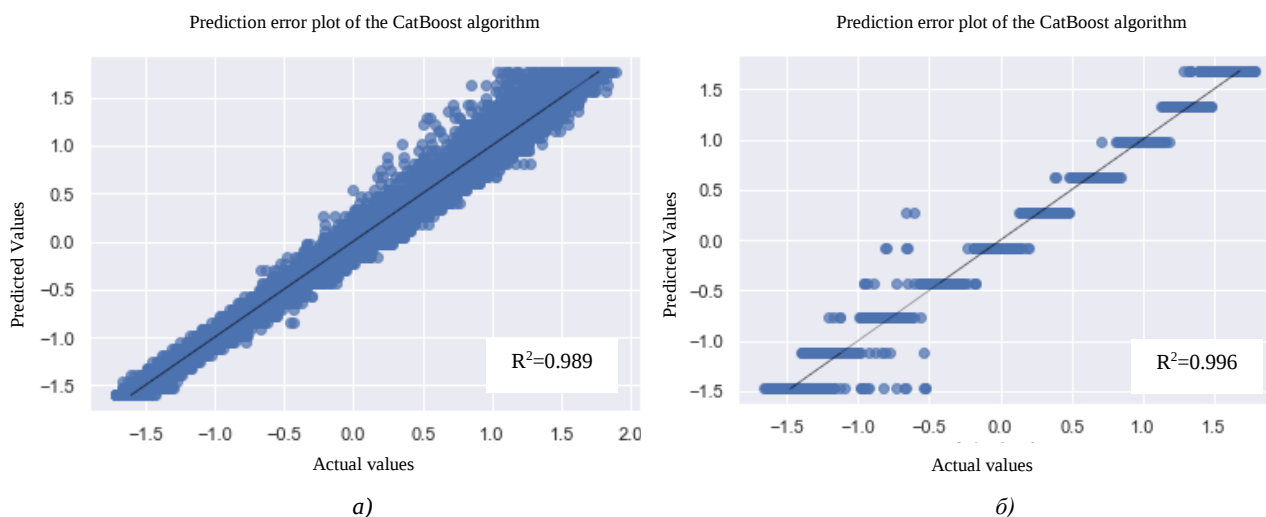


Рис. 6. Графики ошибок прогноза ( $n_3$ ): а — для  $\eta_0^*$ ; б — для  $m^*$

Графики ошибок прогноза показывают фактические значения из набора данных в сравнении с прогнозируемыми значениями, сгенерированными нашей моделью. Данный способ визуализации позволяет увидеть, насколько велика дисперсия в модели.

**Обсуждение и заключение.** Оценивая значения метрик качества разработанных интеллектуальных моделей, можно сделать выводы, что они демонстрируют высокую точность и надежность в предсказании реологических параметров полимеров. Сравнивая значения метрики MAPE, полученные в данной работе, с аналогичными исследованиями, можно сделать вывод, что ошибка находится в пределах допустимых значений.

Рассматриваемый «умный» алгоритм полезен с практической точки зрения, так как он представляет собой быстрый и точный способ анализа реологических параметров полимеров без необходимости проведения дорогостоящих и затяжных экспериментов.

При этом данное исследование расширяет представления о возможностях применения методов машинного обучения в области материаловедения.

Разработанные алгоритмы могут быть полезны при изучении свойств уникальных материалов для строителей, технологов, применимы в промышленности и для научных исследований в области материаловедения и химии при разработки новых типов полимеров с улучшенными свойствами.

Методы искусственного интеллекта успешно применяются в различных отраслях, например, в процессе строительства на всех этапах, включая контроль качества при производстве строительных материалов, в том числе полимерных материалов и композитов на их основе. Интеллектуальные модели, построенные на основе CatBoost, были реализованы в среде Jupyter Notebook на языке Python. При обучении были задействованы сгенерированные наборы данных, полученные путем построения теоретических кривых релаксации напряжений по методу Эйлера на примере эпоксидного связующего ЭДТ-10. Для разработанных интеллектуальных моделей реологических параметров полимеров (начальная релаксационная вязкость, модуль скорости) проведены оценки качества моделей, построены графики прогнозов на обучающих и тестовых выборках, а также графики прогнозов ошибок итоговых моделей с наилучшими параметрами.

С учетом того, что разрабатываемые алгоритмы машинного обучения были применены на большом объеме данных, зависящих от большого количества параметров, всегда имеется погрешность данных, которая находится в пределах 10 %. В нашем случае значение метрики MAPE, полученное при тестировании разработанных моделей машинного обучения, является допустимым и представляет диапазон значений 0,46–2,72. Таким образом, модели могут быть верифицированы и приняты к использованию при определении реологических параметров полимеров.

В перспективе дальнейших исследований планируется расширить спектр инструментов и методов машинного обучения, таких как, например,  $k$ -nearest neighbors, support vector regression (SVR).

### Список литературы

1. Chepurnenko V., Yazyev B., Song X. Creep Calculation for a Three-Layer Beam with a Lightweight Filler. In: *Proceedings of the International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017)*. MATEC Web Conf. Vol. 129. EDP Sciences; 2017. 05009 <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712905009>

2. Litvinov S.V., Yazyev B.M., Turko M.S. Effecting of Modified HDPE Composition on the Stress-Strain State of Constructions. In: *Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 463(4). IOP Publishing; 2018. 042063 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/4/042063>
3. Amjadi M., Fatemi A. Creep and Fatigue Behaviors of High-Density Polyethylene (HDPE): Effects of Temperature, Mean Stress, Frequency, and Processing Technique. *International Journal of Fatigue*. 2020;141:105871. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105871>
4. Xiang G., Yin D., Meng R., Lu S. Creep Model for Natural Fiber Polymer Composites (NFPCs) Based on Variable Order Fractional Derivatives: Simulation and Parameter Study. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020;137(24):48796. <https://doi.org/10.1002/app.48796>
5. Tezel T., Kovan V., Topal E.S. Effects of the Printing Parameters on Short-Term Creep Behaviors of Three-Dimensional Printed Polymers. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019;136(21):47564. <https://doi.org/10.1002/app.47564>
6. Trush L., Litvinov S., Zakieva N., Bayramukov S. Optimization of the Solution of a Plane Stress Problem of a Polymeric Cylindrical Object in Thermoviscoelastic Statement. In: *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol 692. Cham: Springer; 2017. P. 885–893. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1\\_95](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_95)
7. Tsybin N.Y., Turusov R.A., Andreev V.I. Comparison of Creep in Free Polymer Rod and Creep in Polymer Layer of the Layered Composite. *Procedia Engineering*. 2016;153:51–58. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.079>
8. Andreev VI, Sereda SA. Calculation of an Inhomogeneous Polymer Thick-Walled Cylindrical Shell Taking into Account Creep under the Action of Temperature Load. In: *Proceedings of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1015(1). XXIX R-P-S Seminar 2020. Wroclaw, Poland: IOP Publishing; 2021. 012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1015/1/012002>
9. Litvinov S.V., Klimenko E.S., Kulinich I.I., Yazyeva S.B. Longitudinal Bending of Polymer Rods with Account Taken of Creep Strains and Initial Imperfections. *International Polymer Science and Technology*. 2015;42(2):23–26. <https://doi.org/10.1177/0307174X1504200206>
10. Litvinov S.V., Trush L.I., Yazyev S.B. Flat Axisymmetrical Problem of Thermal Creepage for Thick-Walled Cylinder Made of Recyclable PVC. *Procedia Engineering*. 2016;150:1686–1693. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.156>
11. Yazyev B.M., Chepurnenko A.S., Savchenko A.A. Calculation of Three-Layer Panels with Polyurethane Foam Filler Taking into Account the Rheological Properties of the Middle Layer. *Materials Science Forum*. 2018;935:144–149. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.935.144>
12. Dudnik A.E., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V. Determining the Rheological Parameters of Polyvinyl Chloride, with Change in Temperature Taken into Account. *International Polymer Science and Technology*. 2017;44(1):43–48. <https://doi.org/10.1177/0307174X1704400109>
13. Litvinov S, Yazyev S, Chepurnenko A, Yazyev B. Determination of Rheological Parameters of Polymer Materials Using Nonlinear Optimization Methods. In: *Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020*. Singapore: Springer; 2021. P. 587–594. [https://doi.org/10.1007/978-981-33-6208-6\\_58](https://doi.org/10.1007/978-981-33-6208-6_58)
14. Chepurnenko A. Determining the Rheological Parameters of Polymers Using Artificial Neural Networks. *Polymers*. 2022;14(19):3977. <https://doi.org/10.3390/polym14193977>
15. Muhammad W., Brahme A.P., Ibragimova O., Kang J., Inal K. A machine learning framework to predict local strain distribution and the evolution of plastic anisotropy & fracture in additively manufactured alloys. *International Journal of Plasticity*. 2021;136:102867. <https://doi.org/10.1016/j.iplas.2020.102867>
16. Oh W.B., Yun T.J., Lee B.R., Kim C.G., Liang Z.L. A Study on Intelligent Algorithm to Control Welding Parameters for Lap-joint. *Procedia Manufacturing*. 2019;30:48–55. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.008>
17. Ramos-Figueroa O., Quiroz-Castellanos M., Mezura-Montes E., Schütze O. Metaheuristics to solve grouping problems: a review and a case study. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2020;53:100643. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2019.100643>
18. Kondratieva T, Priyashnikova L, Razveeva I. Machine Learning For Algorithmic Trading. In: *Proceedings of E3S Web Conf. Topical Problems of Agriculture, Civil and Environmental Engineering (TPACEE 2020)*. Vol. 224. E3S Sciences; 2020. 01019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022401019>
19. Krause A, Fairbank M. Baseline Win Rates for Neural-Network Based Trading Algorithms. In: *2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. Glasgow, UK: IEEE; 2020. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/IJCNN48605.2020.9207649>

## References

1. Chepurnenko V, Yazyev B, Song X. Creep Calculation for a Three-Layer Beam with a Lightweight Filler. In: *Proceedings of the International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017)*. MATEC Web Conf. Vol. 129. EDP Sciences; 2017. 05009 <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712905009>
2. Litvinov SV, Yazyev BM, Turko MS. Effecting of Modified HDPE Composition on the Stress-Strain State of Constructions. In: *Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 463(4). IOP Publishing; 2018. 042063 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/4/042063>
3. Amjadi M, Fatemi A. Creep and Fatigue Behaviors of High-Density Polyethylene (HDPE): Effects of Temperature, Mean Stress, Frequency, and Processing Technique. *International Journal of Fatigue*. 2020;141:105871. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105871>
4. Xiang G, Yin D, Meng R, Lu S. Creep Model for Natural Fiber Polymer Composites (NFPCs) Based on Variable Order Fractional Derivatives: Simulation and Parameter Study. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020;137(24):48796. <https://doi.org/10.1002/app.48796>
5. Tezel T, Kovan V, Topal ES. Effects of the Printing Parameters on Short-Term Creep Behaviors of Three-Dimensional Printed Polymers. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019;136(21):47564. <https://doi.org/10.1002/app.47564>
6. Trush L, Litvinov S, Zakieva N, Bayramukov S. Optimization of the Solution of a Plane Stress Problem of a Polymeric Cylindrical Object in Thermoviscoelastic Statement. In: *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol 692. Cham: Springer; 2017. P. 885–893. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1\\_95](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_95)
7. Tsybin NY, Turusov RA, Andreev VI. Comparison of Creep in Free Polymer Rod and Creep in Polymer Layer of the Layered Composite. *Procedia Engineering*. 2016;153:51–58. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.079>
8. Andreev VI, Sereda SA. Calculation of an Inhomogeneous Polymer Thick-Walled Cylindrical Shell Taking into Account Creep under the Action of Temperature Load. In: *Proceedings of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1015(1). XXIX R-P-S Seminar 2020. Wroclaw, Poland: IOP Publishing; 2021. 012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1015/1/012002>
9. Litvinov SV, Klimenko ES, Kulnich II, Yazyeva SB. Longitudinal Bending of Polymer Rods with Account Taken of Creep Strains and Initial Imperfections. *International Polymer Science and Technology*. 2015;42(2):23–26. <https://doi.org/10.1177/0307174X1504200206>
10. Litvinov SV, Trush LI, Yazyev SB. Flat Axisymmetrical Problem of Thermal Creepage for Thick-Walled Cylinder Made of Recyclable PVC. *Procedia Engineering*. 2016;150:1686–1693. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.156>
11. Yazyev BM, Chepurnenko AS, Savchenko AA. Calculation of Three-Layer Panels with Polyurethane Foam Filler Taking into Account the Rheological Properties of the Middle Layer. *Materials Science Forum*. 2018;935:144–149. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.935.144>
12. Dudnik AE, Chepurnenko AS, Litvinov SV. Determining the Rheological Parameters of Polyvinyl Chloride, with Change in Temperature Taken into Account. *International Polymer Science and Technology*. 2017;44(1):43–48. <https://doi.org/10.1177/0307174X1704400109>
13. Litvinov S, Yazyev S, Chepurnenko A, Yazyev B. Determination of Rheological Parameters of Polymer Materials Using Nonlinear Optimization Methods. In: *Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020*. Singapore: Springer; 2021. P. 587–594. [https://doi.org/10.1007/978-981-33-6208-6\\_58](https://doi.org/10.1007/978-981-33-6208-6_58)
14. Chepurnenko A. Determining the Rheological Parameters of Polymers Using Artificial Neural Networks. *Polymers*. 2022;14(19):3977. <https://doi.org/10.3390/polym14193977>
15. Muhammad W, Brahme AP, Ibragimova O, Kang J, Inal K. A Machine Learning Framework to Predict Local Strain Distribution and the Evolution of Plastic Anisotropy & Fracture in Additively Manufactured Alloys. *International Journal of Plasticity*. 2021;136:102867. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2020.102867>
16. Oh WB, Yun TJ, Lee BR, Kim CG, Liang ZL. A Study on Intelligent Algorithm to Control Welding Parameters for Lap-joint. *Procedia Manufacturing*. 2019;30:48–55. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.008>
17. Ramos-Figueroa O, Quiroz-Castellanos M, Mezura-Montes E, Schütze O. Metaheuristics to Solve Grouping Problems: A Review and a Case Study. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2020;53:100643. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2019.100643>
18. Kondratieva T, Priianishnikova L, Razveeva I. Machine Learning For Algorithmic Trading. In: *Proceedings of E3S Web Conf. Topical Problems of Agriculture, Civil and Environmental Engineering (TPACEE 2020)*. Vol. 224. E3S Sciences; 2020. 01019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022401019>

19. Krause A, Fairbank M. Baseline Win Rates for Neural-Network Based Trading Algorithms. In: *2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. Glasgow, UK: IEEE; 2020. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/IJCNN48605.2020.9207649>

*Об авторах:*

**Чепурненко Антон Сергеевич**, профессор кафедры сопротивления материалов Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, доцент, [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [anton\\_chepurnenk@mail.ru](mailto:anton_chepurnenk@mail.ru)

**Кондратьева Татьяна Николаевна**, доцент кафедры математики и информатики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, [ORCID](#), [ktn618@yandex.ru](mailto:ktn618@yandex.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

А.С. Чепурненко — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Т.Н. Кондратьева — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

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

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Поступила в редакцию** 20.02.2024

**Поступила после рецензирования** 28.02.2024

**Принята к публикации** 10.03.2024

*About the Authors:*

**Anton S. Chepurnenko**, Dr.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Strength of Materials Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [anton\\_chepurnenk@mail.ru](mailto:anton_chepurnenk@mail.ru)

**Tatiana N. Kondratieva**, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of Mathematics and Computer Science Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ORCID](#), [ktn618@yandex.ru](mailto:ktn618@yandex.ru)

*Claimed contributorship:*

Chepurnenko AS: scientific supervision, analysis of the research results, refining the text, correcting the conclusions.

Kondratieva TN: formulating the main concept, aim and objective of the research, carrying out the calculations, preparing the text, formulating the conclusions.

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

*All authors have read and approved the final manuscript.*

**Received** 20.02.2024

**Revised** 28.02.2024

**Accepted** 10.03.2024

# ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО, ПЛАНИРОВКА СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ URBAN PLANNING, RURAL SETTLEMENTS PLANNING



УДК 7.71

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-84-93>

## Этнографические центры в структуре городских образований

В.Г. Потапова , А.М. Воробьева

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

[rostland@mail.ru](mailto:rostland@mail.ru)

EDN: AUQMJL

### Аннотация

**Введение.** Развитие познавательного туризма в нашей стране является одним из перспективных направлений. Постановление Правительства РФ об утверждении «Концепции федеральной целевой программы «Развитие внутреннего и въездного туризма в Российской Федерации (2019–2025 годы)» предусматривает комплексное развитие туристических кластеров по приоритетным видам туризма. Одним из приоритетных направлений в туристической деятельности является этнографический туризм, который имеет огромный потенциал, но пока находится в стадии становления. В настоящее время в нашей стране 49 этнографических центров в 36 регионах по всей стране. В последние годы стала очевидной тенденция к формированию туристических досуговых центров с этнографической тематикой на юге России. К таким центрам на юге России относятся этнографический центр «Моя Россия» в Большом Сочи на территории Роза Хутор, выставочный комплекс «Атамань» в станице Тамань Краснодарского края, этно-деревня казаков-некрасовцев и духовных молокан в Ставропольском крае, п. Новокумский, что для территории юга России в количественном отношении, незначительно. Знакомство с опытом строительства и проектирования этнографических объектов показало, что формирование нового типа этнографических центров с просветительско-развлекательной функцией и отдыхом в природных условиях в настоящее время очень актуально. Однако нормативные и методические материалы к их созданию отсутствуют.

**Материалы и методы.** При проведении исследования выполнялись: анализ развития этнографических объектов разного типа с использованием аналитических и графоаналитических методов, натурных обследований и фотофиксации, а также сравнительный анализ функционального зонирования и планировочной организации, объемно-пространственной и композиционной организации этнографических музеев и этнографических парков «под открытым небом». В статье рассмотрены примеры объектов зарубежного и отечественного опыта.

**Результаты исследований.** На основе исследований этнографических объектов выявлены основные научно-обоснованные принципы их градостроительного формирования, выявлены их особенности и отличительные характеристики в организации территорий таких объектов в структуре поселений. Результаты исследований апробируются на концептуальном проекте планировки и застройки туристического этнографического центра в г. Семикаракорск Ростовской области. Цель предложенного проекта — создание туристической этнической среды в структуре градостроительных поселений юга России с целью сохранения традиций Донского казачества и толчка для развития этнографического туризма на территории юга России.

**Обсуждение и заключение.** Планировочное решение и функциональное зонирование этнических центров зависит не только от градостроительной ситуации, территориального расположения в структуре городских образований, но также и от особенностей представляемой культуры на их территории. Результаты исследования позволят расширить географию этнографических центров на юге России, увеличить диапазон развлекательно-познавательных услуг в городской среде путем их расширения и трансформации, сблизить человека с окружающей природой и национальной средой различных народов. Именно поэтому в каждом этнографическом центре можно будет увидеть его отличительные черты, которые придают ему индивидуальность.

**Ключевые слова:** этнографический центр, туризм, историко-культурная среда городов, архитектура, традиция

Для цитирования. Потапова В.Г., Воробьева А.М. Этнографические центры в структуре городских образований. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(1):84–93. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-84-93>

Research article

## Urban Planning Principles in Design of the Ethnographic Centres

Valeriya G. Potapova , Aleksandra M. Vorobyeva  

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

 [rostland@mail.ru](mailto:rostland@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** Development of the education tourism in our country is one of the future-oriented trends. The Russian Federation Government Resolution on Adoption of the Concept of the Federal Target Programme "Development of the Domestic and Inbound Tourism in the Russian Federation (2019-2025)" foresees the comprehensive development of the tourist clusters in the priority types of tourism<sup>1</sup>. Within the tourist industry, the ethnic tourism is one of the priority directions, which has the great potential, but is still in the stage of infancy. Currently, there are 49 ethnographic centres in 36 regions of our country. In recent years, the trend for creating the ethnography-oriented recreation centres in the south of Russia becomes evident. In the south of Russia the following destinations are referred to such centres: the ethnographic centre "My Russia" in Greater Sochi on the territory of Rosa Khutor, the "Ataman" exhibition complex in the village of Taman in the Krasnodar Region, the ethno village of the Nekrasov Cossacks and Molokan Spiritual Christians in the Stavropol Region, Novokumsky settlement, however, their number is not enough for the territory of the south of Russia. The acquaintance with the experience of building and designing the ethnographic facilities has led to the conclusion, that nowadays the creation of a new type of the ethnographic centres combining the education and recreation functions with resting in the natural environment is highly relevant. However, the normative and methodological documents regulating their creation are missing.

**Materials and methods.** The research included: the analysis of development of the various types of the ethnographic facilities using the analytical and graphical analytic methods, field research and photo-fixation, as well as the comparative analysis of the functional zoning and layout, spatial arrangement and composition of the ethnographic museums and the ethnographic parks "in the open air". The article investigates the foreign and domestic examples of the facilities.

**Results.** Based on the study of the ethnographic facilities, the main scientifically based urban planning principles for creation thereof have been distinguished, their features and territorial planning distinctions within the structure of the settlements have been found. The research results are being piloted within the conceptual project of layout and development of the tourist ethnographic centre in the city of Semikarakorsk, Rostov region. The proposed project aims at creating the tourist ethnic environment within the structure of the planned urban settlements of the south of Russia for preserving the Don Cossacks' traditions and boosting the development of the ethnic tourism in the south of Russia.

**Discussion and Conclusion.** The layout and functional zoning of the ethnographic centres depend not only on the urban planning situation, location of their territory within the structure of the urban entities, but also on the identity of the culture represented on their territory. The results of the study enable the geographical expansion of the ethnographic centres across the south of Russia, increase the range of the recreation and education services provided within the urban environment through their enlargement and transformation, bring a person closer to the natural environment and different peoples' national environment. This will enable each ethnographic centre to demonstrate its distinctive features ensuring its individual character.

**Keywords:** ethnographic centre, tourism, historic and cultural urban environment, architecture, tradition

**For citation.** Potapova VG, Vorobyeva AM. Urban Planning Principles in Design of the Ethnographic Centres. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(1):84–93. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-84-93>

**Введение.** Сохранение национальных корней, историко-культурной среды градостроительных образований, традиционной национальной культуры является необходимостью для любых народов в мире, поскольку именно они являются духовной основой и духовным стержнем нации. Вместе с тем становится очевидным, что интенсивные процессы урбанизации, исчезновение кустарного производства в градостроительных поселениях, активная миграция населения, взаимопроникновение субкультур, снос исторического фонда в городах, освобождение участков территорий под новое строительство и т.п. стирают историко-культурную среду градостроительных образований городского и сельского типов. Но именно историко-культурная среда является важным компонентом традиционной культуры народов и их этнических групп, используемым при решении градостроительных задач.

Мировой опыт показывает, что вопросами сохранения памятников культуры в городах, архитектурных исторических объектов, этнографических особенностей жизни и быта народов занимаются повсеместно. Всемирно известны первые музеи под открытым небом: «Северный музей» (Стокгольм, 1872 г.), при котором А. Гелиус создал Скansen-парк, где были размещены привезенные сюда крестьянские постройки с сохранением жизни и быта крестьян, древняя деревянная церковь, скульптуры крестьян в национальных костюмах и др. Востребованность посетителями данного объекта была велика. И постепенно подобные этнографические парки, музеи под открытым небом стали появляться в разных странах и городских образованиях, а направление науки о таких музеях получило название «скансенология». В нашей стране к первым экспозициям под открытым небом можно отнести Всероссийскую сельскохозяйственную выставку в Москве (1923 г.) и музей деревянного зодчества в Коломенском (1927 г.).

Среди ученых, занимающихся теоретическими вопросами формирования «музеев под открытым небом», можно назвать И.В. Барсову, В.А. Нефедова, С.С. Ожегова, В.И. Горохова, Б.В. Гнедовского, В.М. Посохина и других. Однако эти ученые в своих работах главным образом рассматривали опыт проектирования и создания музеев и парков под «открытым небом». Специальные исследования, посвященные складывающемуся в последнее время новому типу этнографических центров в городских образованиях, не проводились.

В современных условиях развития туристической базы одним из перспективных направлений культурно-познавательного туризма в нашей многонациональной стране является этнографический туризм. Его развитие требует расширения туристической базы путем формирования этнографических центров городских образований, которые способны стать местом притяжения людей в регионе, просветительским центром, базой для формирования инновационного туристического продукта. По определению Совета ЮНЕСКО, культурно-этнографический центр представляет собой коллекцию зданий, открытых для всеобщего обозрения, состоящих из образцов доиндустриальной эпохи, всегда оборудованных мебелью и утварью соответствующего периода, открытой площадкой для выступления художественных народных коллективов, ресторанов, где можно попробовать национальную кухню и т. д.<sup>1</sup>

При этом этнографический центр представляет собой особый тип градостроительного туристического центра, который может располагаться на территориях, не только обладающих природным рекреационным потенциалом, удобным географическим положением и транспортным сообщением, но и являющихся объектом городской структуры, который предложит отдыхающим ощутить национально-исторический и культурный дух народа, проживая в постройках с национальным уклоном, предметами быта, утвари и др.

Этнографический центр не является музеем. Он может иметь самую разную тематику и направление — от истории и развлечений до реконструкции исторических событий. Например, реконструкция взятия Азовской крепости турками, которая ежегодно проходит в городе Азов. Но в подобном центре могут находиться отдельные экспозиционные зоны.

Сохранение и увековечивание культур разных народов, передача истории следующему поколению всегда было, есть и будет актуальной темой. Цель представленной работы — анализ существующих градостроительных этнографических объектов, выявление особенностей их планировки, размещения в городской среде, функциональной организации и формирование пространства их территорий.

**Материалы и методы.** Основой в исследовании является применение методов комплексного анализа, включая системный, логический, сравнительно-исторический, фотофиксации, графического моделирования, экспериментального проектирования, способствующих изучению теоретических и натурных процессов градостроительного проектирования и создания историко-культурной среды на территории городских этнографических центров юга России.

Использование статистических данных, исторических и географических сведений, краеведческой и этнографической базы региона, музейно-этнографического, скансенологического и экономического материала позволили раскрыть градостроительные, архитектурно-планировочные и ландшафтные особенности территорий этнографических центров юга России, их функциональной организации, которые будут опробированы на примере проекта этнографического парка в г. Семикаракорске Ростовской области. Применение комплексного изучения отечественной и зарубежной практики, опыта целенаправленного преобразования ландшафта территорий этнографических центров позволяет сформулировать основные принципы архитектурно-планировочной и ландшафтно-пространственной организации территорий в целом и отдельных функциональных зон в частности.

**Результаты исследований.** Проведенное комплексное исследование градостроительных этнографических центров в нашей стране и за рубежом показало, что в концепцию их формирования были заложены принципы

<sup>1</sup> Этнопарки России. URL: <https://traveledge.ru/2021/10/07/etnoparki-rossii> (дата обращения 23.01.2024)

создания как музейных объектов, так и парков под «открытым небом» [1]<sup>2</sup>. Так, например, музей «Семенково» был образован в 1979 году для сохранения традиционного архитектурного наследия севера Руси. Более десяти лет коллектив историков, этнографов и архитекторов отбирал реально существующие постройки для перенесения на территорию музея. В 1985 году сюда были перенесены первые строения — и пополнение коллекции музея продолжалось до 1995 года. За это время он пополнился 17 зданиями. Сегодня «Семенково» располагается на площади 12 гектаров и насчитывает 2 культовые постройки, одну усадьбу, 12 домов и 17 хозяйственных построек (амбары, ледники, бани), а самое последнее строение здесь — оригинальная мельница-столбовка, добавленная к экспозиции в августе 2015 года.

Архитектурно-этнографический музей «Семенково» в Вологодской области — живой памятник истории, культуры и быта русской деревни рубежа XIX–XX веков. В числе архитектурных достопримечательностей «Семенково» перенесённые сюда по брёвнышку настоящие деревянные церкви и часовни, жилые дома разных районов Вологодской области и целая коллекция хозяйственных построек: от всем знакомых амбаров и бань до уникальных ледников — предков современных холодильников. Здесь собрано множество экспозиций и интерактивных программ: можно научиться тонкостям сруба настоящей избы и обработки льна, полюбоваться на разные модели валенок, узнать об истории развития маслодельного промысла в Вологде и секретах северорусского рыболовного промысла<sup>3</sup> [2, 3].

Зарубежным примером может служить этно-комплекс «Станишичи», построенный в марте 2003 года. Первоначально он состоял из искусственного пруда, ресторана и ручья, но со временем он расширился и включил в себя две функциональные водяные мельницы, одну (1917 года выпуска) и вторую (1937 года), молочник (1948 года), каменный колодец, сарай и второй пруд. Есть также рестораны с местными фирменными блюдами, приготовленными на традиционном очаге, в которых подают выпечку из муки, изготовленной в двух мельницах, а также блюда современной кухни [4–5].

Этно-комплекс имеет самостоятельную территорию, организованную в виде села, состоящего из нескольких блоков: этнографическая коллекция, духовный центр, жилая и прогулочная зоны, гастрономическая зона, детская игровая площадка, мини-зоопарк, спорткомплекс. На его территории находятся деревянные сербские дома, построенные в старом стиле, православная церковь, часовня, рестораны сербской традиционной кухни, сувенирные и ремесленные лавки, гостиницы и отели. Имеется также каменный амфитеатр на 380 мест и даже собственная железная дорога, прокатившись по которой можно осмотреть весь этот уникальный комплекс целиком.



Рис. 1. Этно-комплекс села Станишичи, Сербия<sup>4</sup>

Исследования показали, что в определенные исторические периоды времени меняется функциональное зонирование и пространственная организация территорий этнографических объектов. И не совсем соответствует им название «парк под открытым небом», поскольку, как правило, в парках преобладают ландшафтно-парковые пейзажи. Не во всех парках преобладает зрелищно-познавательная функция, как, например, в детских парках. Или большая концентрация развлекательных аттракционов на территории парка имеет свои названия — «городок аттракционов», «страна сказок» и пр.

<sup>2</sup> Вергунов А.П., Денисов М.Ф., Ожегов С.С. *Ландшафтное проектирование: учебное пособие для вузов по спец. «Архитектура»*. М.: Высш.школа; 1991. 240 с.

<sup>3</sup> Горохов В.А. *Зеленая природа города: учебное пособие для вузов*. М.: Архитектура-С; 2005. 592 с.

<sup>4</sup> URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Станишичи\\_\(этно-деревня\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Станишичи_(этно-деревня)) (дата обращения 23.01.2024)

Мировая практика говорит о том, что в настоящее время появились новые типы градостроительных этнографических объектов — открытые этнографические центры в структуре поселений. В них ландшафт территорий и зеленые насаждения играют дополнительную роль. Здесь в определенной градостроительной структуре доминируют объекты архитектуры и дизайна, которые плотно размещаются по территории. К таким объектам, например, можно отнести открытый к Олимпиаде в 2014 году на территории города Сочи в 3,3 га культурно-этнографический центр «Моя Россия». Здесь представлена вся Россия в миниатюре: Сибирь с деревянными избами-срубами, яркая Бурятия с буддийским храмом, элегантная архитектура Санкт-Петербурга, Московский Кремль, Казанский кремль, аутентичные башни Кавказа, Краснодарские подворья и Демидовские заводы Урала. Перед взором путешественников предстают различные культурные пласты истории России<sup>5,6</sup> [6].



Рис. 2. Входная зона на территорию культурно-этнографического центра «Моя Россия»



Рис. 3. На территории культурно-этнографического центра «Моя Россия»

Центр не только популяризирует национальные традиции и ценности Руси, но и предлагает посетителям своего рода путешествие по России в интерактивной форме. Здесь самые разнообразные шоу-экскурсии, творческие мастер-классы для детей и взрослых различной тематики, игровые программы и многое другое. На территории размещаются 4 гостиницы. Вся территория этно-центра, находящегося в градостроительной структуре г. Сочи и размещенного на его окраине, вписана в окружающий ландшафт и создает с ним единое целое. Протяженность этно-центра вдоль реки Мзымта составляет 950 метров. Чистый воздух гор и шум горной реки оставляют неизгладимое впечатление. У посетителей создается ощущение единения с природой. Отдых в природной среде дополняется новыми интересными интерактивными играми и занятиями.

<sup>5</sup> Калущков В.Н. *Основы этнокультурного ландшафтоведения: учебное пособие*. М.: Изд-во МГУ; 2000. 96 с.

<sup>6</sup> Музеи России. URL: <http://www.museum.ru> (дата обращения 23.01.2024)



Рис. 4. Этно-центр «Моя Россия» со стороны реки Мзымта

На территории представлены стенды с информативным насыщением. Огромный стенд посвящен деревянной резьбе ставней на окнах домов разных народностей России. Он производит на зарубежных посетителей сильное впечатление стилем и многообразием этого художественного промысла. Здесь же располагаются 4 гостиницы, рестораны и кафе с национальной кухней.



Рис. 5. Этно-центр «Моя Россия» со стороны реки Мзымта

Исходя из вышеперечисленных примеров, можно сделать вывод о том, что этнографические центры могут являться структурными единицами городских образований. Функциональная организация их территорий направлена на ознакомление и «вступление в диалог» туриста с культурой другого народа. Из опыта следует, что центр может как располагаться непосредственно на месте сохранившихся этнокультурных объектов, так и на специально отведенном удаленном от центра участке территории градостроительного образования, на который могут быть перенесены сохранившиеся объекты, или представлены новые постройки «под старину», отражающие особенности той или иной этнической группы.

Анализ показал, что в настоящее время сложился новый тип градостроительных этнографических центров, представляющих собой развитое целостное пространственное образование («мини-деревня», «мини-город»), композиционно объединяющее между собой различные функциональные зоны на общей благоустроенной территории. Экологический центр является коммерческим многофункциональным (досуг, выставка, зрелища, источник новой познавательной информации, отдых) и многоцелевым градостроительным комплексом с соответствующим оборудованием. Он может размещаться как «на пороге города», так и в его рекреационной зоне на свободных от застройки территориях.

Исследование позволило выявить и сформулировать основные научно-обоснованные градостроительные принципы формирования территории и архитектурных объектов этнографических центров. В условиях юга России этнографические центры могут иметь круглогодичное использование и быть рассчитаны на отдыхающих всех возрастных категорий как постоянного населения, так и временных туристов. Задачей современного

этнографического центра является предоставление посетителям полноценного отдыха и развлечений в природной среде (или приближенной к ней), обеспечение им полноценного культурно-бытового обслуживания и информационного поля, а также контакта с природой.

Этнографические градостроительные центры могут создаваться различных типов: открытого, закрытого и смешанного типа. В каждом конкретном случае должен разрабатываться свой состав и функционально-планировочная структура. В зависимости от ландшафта территории выявляются композиционные оси и узлы территории градостроительного этнографического центра, их связи с городом и его окружением, места пространственного расположения архитектурных объектов, что в целом создает единство композиционного решения и его планировочную структуру (регулярную, линейную, линейно-узловую, радиальную, пейзажную). Поскольку этнографические градостроительные центры являются туристической достопримечательностью, объект должен максимально насыщаться развлечениями, зрелищами, информацией и отдыхом. Архитектурные решения построек на территории градостроительных этнографических центров должны иметь образную выразительность.

В качестве объекта исследования был выбран город Семикаракорск Ростовской области. Семикаракорск получил официальный статус города в 1972 году в результате бурного роста промышленности. Он включен в туристический маршрут Ростовской области «Серебряная подкова Дона» благодаря выгодному географическому положению, благоприятному южному климату, развитому народному промыслу — семикаракорской керамике. Организация рекреационно-туристского комплекса должна сыграть важную роль в интенсификации развития других секторов экономики поселения и Семикаракорского района в целом, которые в настоящее время находятся в кризисном состоянии. Опыт организации туристских комплексов в зарубежных странах свидетельствует о том, что одно дополнительное рабочее место в сфере туризма создает 2–3 рабочих места в отраслях обслуживания.

Основные положения данного исследования заложены в концептуальное проектное предложение по развитию казачьего этнографического центра в г. Семикаракорск.

Учитывая растущую популярность такого вида туризма, можно прогнозировать, что этнографический центр может стать шансом перспективного развития туризма и экономики в целом для некрупных поселений. Ведь основная проблема развития и благосостояния таких поселений в низких экономических показателях и дефиците культурно-деловых зон. Открытие туризма для такого градостроительного поселения станет толчком к выходу на новый уровень, однако при этом будет сохранена его этнокультурная роль.



Рис. 6. Функциональное зонирование этноцентра в г. Семикаракорске (предложения авторов)

Анализ генерального плана поселения показал, что под этнографический центр возможно использование участка территории у микрорайона Молчанов, который находится в северо-восточной части города. Основной концепцией этнографического центра является пропагандирование и сохранение культурного наследия донских казаков, их традиций, быта и ремесел. Предлагается создание следующих функциональных зон: казачья деревня, музейная, храмовая, конноспортивная, административная и выставочная зоны, зона отдыха.

Посетители смогут окунуться в быт донских казаков, посетить различные ремесленные мастерские, сходить на выставку лошадей или прокатиться верхом, отстоять службу в часовне, увидеть изобилие донской природы в

тематических садах выставочной зоны и многое другое. В выставочном пространстве представлена всевозможная утварь и предметы быта донских казаков, а в зеленой зоне отдыха будет расположена сцена-амфитеатр и смотровая башня, которая станет композиционно притягательной точкой парка.

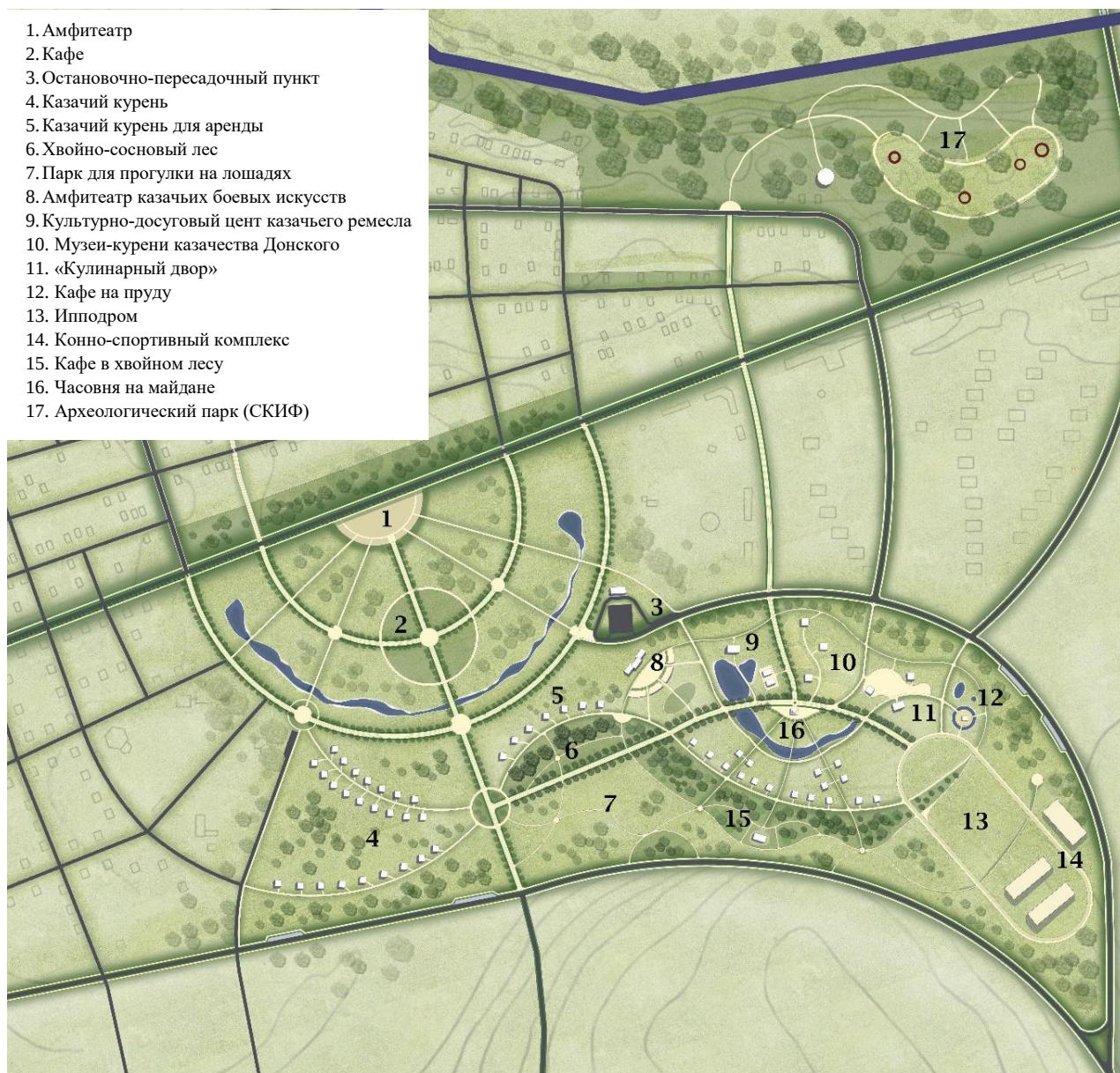


Рис. 7. Концептуальные предложения по развитию архитектурно-планировочной и ландшафтно-рекреационной организации территории этноцентра в г. Семикаракорске (предложения авторов)

Приезжающие туристы также смогут посетить комплекс Семикаракорской керамики, где можно обучиться ремеслу лепки и обжига глиняных изделий и даже попробовать изготовить посуду или фигурку лично в мастерской или посетить музей лучших работ.

Формирование туристического этнографического центра поселения позволит развивать различные отрасли экономики города Семикаракорска, создаст новые рабочие места, привлечет инвесторов, предотвратит утрату традиций и культурной идентификации донских казаков, будет способствовать передаче их из поколения в поколение.

**Обсуждение и заключение.** Результаты исследований различных типов этнографических объектов показали, что независимо от названия (этнографические музеи, музеи, этнографические парки «под открытым небом») идет тенденция их преобразования в связи с изменением потребностей людей, увеличения развлекательных и образовательных услуг, их расширения и трансформации. В практике проектирования и строительства этнографических объектов выявился новый современный тип градостроительных рекреационно-досуговых центров — этнографический центр, в котором на коммерческой основе в окружении природы

размещается ряд различных по функции и назначению архитектурных объектов в соответствующей этнографической тематике, обеспечивающих постоянному и временному населению городских образований всех возрастных категорий полноценное культурно-бытовое обслуживание, подачу разнообразной информации, развлечения в интерактивной форме, контакт с природой.

Особую роль приобретают эти выводы для юга России с благоприятными климатическими условиями, которые позволяют широко использовать этнографические центры для просвещения населения, развлечения и отдыха. Для проектирования и строительства таких центров на юге России были сформулированы основные градостроительные принципы их формирования, что позволит значительно расширить их количество, учитывая потребность туристического бизнеса.

Концептуальные градостроительные предложения по формированию территории этнографических центров в Южном федеральном округе позволят решить вопросы рекреационной и образовательной политики, расширить географию их размещения, привлекут инвесторов, предотвратят утрату традиций и культурной идентификации южных народов, что будет способствовать передаче знаний из поколения в поколение, сохранит архитектурное и историческое наследие юга России.

### Список литературы

1. Vorobyeva A.M. Evolution of Landscape Architecture. *Materials Science Forum*. 2018;931:856–861. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.856>
2. Vorobeveva A.M. The Settlements Public Spaces Formation Basic Concepts in the Southern Russian Region// *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;698:033023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/3/033023>
3. Киреева Ю.А., Ешин С.В. Этнографические центры на территории Российской Федерации и их роль в развитии туризма. *Вестник ассоциации вузов туризма и сервиса*. 2021;1:15–22. URL: <https://globalf5.com/Zhurnaly/Servis-i-turizm/Vestnik-Associacii-VUZOV-turizma-i-servisa/vypusk-2021-1> (дата обращения 23.01.2024).
4. Vorobeveva A.M. The Place History Reading in The Image of the Urban Areas' Formed Public Space. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;913:032004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/913/3/032004>
5. Соболенко В.Е. Этнотуризм в России: современное состояние и ориентиры развития. *Актуальные исследования*. 2020;24(27):66–70. URL: <https://apni.ru/article/1689-etnoturizm-v-rossii-sovremennoe-sostoyanie> (дата обращения 23.01.2024).
6. Калущков В.Н., Латышева А.Ю. «Этническая деревня» — новый тип культурного ландшафта. В: *Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Теория и практика планирования культурного ландшафта»*. Саранск; 2010.

### References

1. Vorobyeva AM. Evolution of Landscape Architecture. *Materials Science Forum*. 2018;931:856–861. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.856>
2. Vorobeveva AM. The Settlements Public Spaces Formation Basic Concepts in the Southern Russian Region. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;698:033023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/3/033023>
3. Kireeva YuA, Eshin SV. Ethnographic Centers on the Territory of the Russian Federation and Their Role in Development of Tourism. *Vestnik assotsiatsii vuzov turizma i servisa*. 2021;15(1):15–22. URL: <https://globalf5.com/Zhurnaly/Servis-i-turizm/Vestnik-Associacii-VUZOV-turizma-i-servisa/vypusk-2021-1> (accessed 23.01.2024). (In Russ.).
4. Vorobeveva AM. The Place History Reading in the Image of the Urban Areas' Formed Public Space. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;913:032004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/913/3/032004>
5. Sobolenko VE. Ethnic Tourism in Russia: History of Development and Modern Significance. *Aktual'nye issledovaniya*. 2020;24(27):66–70. URL: <https://apni.ru/article/1689-etnoturizm-v-rossii-sovremennoe-sostoyanie> (accessed 23.01.2024). (In Russ.).
6. Kalutskov VN, Latysheva AYU. “Ethnic Village” is a New Type of Cultural Landscape. In: *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference “Theory and Practice of Cultural Landscape Planning”*. Saransk; 2010. (In Russ.).

*Об авторах:*

**Валерия Геннадьевна Потапова**, студент группы АШГР51 Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), [valeryk1m@mail.ru](mailto:valeryk1m@mail.ru)

**Александра Максимовна Воробьева**, профессор кафедры «Градостроительство и проектирование зданий» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат архитектуры, профессор, [ORCID](#), [rostland@mail.ru](mailto:rostland@mail.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

В.Г. Потапова — анализ результатов исследований, подготовка текста и графических материалов.

А.М. Воробьева — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, подготовка выводов.

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

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Поступила в редакцию** 20.01.2024

**Поступила после рецензирования** 16.02.2024

**Принята к публикации** 20.02.2024

*About the Authors:*

**Valeriya G. Potapova**, Student of the Group АШГР51, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ORCID](#), [valeryk1m@mail.ru](mailto:valeryk1m@mail.ru)

**Aleksandra M. Vorobyeva**, Cand.Sci. (Architecture), Professor of the Department of Urban Planning and Building Design, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ORCID](#), [rostland@mail.ru](mailto:rostland@mail.ru)

*Claimed contributorship:*

VG Potapova: analysis of the research results, preparing the text and graphic materials.

AM Vorobyeva: formulating the main concept, aim and objectives of the research, scientific supervision, preparing the conclusions.

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

*All authors have read and approved the final manuscript.*

**Received** 20.01.2024

**Revised** 16.02.2024

**Accepted** 20.02.2024

# ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО, ПЛАНИРОВКА СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ URBAN PLANNING, RURAL SETTLEMENTS PLANNING



УДК 004.94;72;69

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-94-103>



EDN: AVIAMV

## Формообразование в архитектуре и строительстве. Анализ макетирования и 3-D моделирования: грани дискурса

М.Е. Дымченко ✉, А.А. Наумов

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

✉ [kapitel1073@yandex.ru](mailto:kapitel1073@yandex.ru)

### Аннотация

**Введение.** Настоящая статья поднимает важный вопрос макетирования — будущее данной сферы деятельности. Макетирование — развивающаяся технология, в области которой работает множество людей, чей результат высоко оценивается в областях науки и строительства. 3-D моделирование также становится популярным в аналогичных областях, имея свои цифровые (инновационные) преимущества. Сделав подробный анализ, можно найти плюсы и минусы в обеих технологиях.

**Материалы и методы.** Методологическая база исследования включает в себя традиционные научные методы, а также анализ современных междисциплинарных подходов в архитектуре и строительстве. Материалом исследования является эволюция технологических концепций архитектурного моделирования объектов капитального строительства, реконструкции на примере 3-D моделирования и макетирования.

**Результаты исследования.** Установлено, что формообразование средствами макетирования и 3-D моделирования широко применяется на разных этапах передового строительства, инновационной реконструкции, актуальной реставрации.

**Обсуждение и заключение.** Исследование макетирования и 3-D моделирования демонстрирует важность и востребованность этих технологических концепций в сферах строительства и архитектуры, а также при реконструкции и реставрации.

**Ключевые слова:** архитектурное формообразование, технологии, макетирование, 3-D моделирование, визуализация, макеты, архитектура, строительство, реконструкция и реставрация

**Для цитирования:** Дымченко М.Е., Наумов А.А. Формообразование в архитектуре и строительстве. Анализ макетирования и 3-D моделирования: грани дискурса. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(1):94–103. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-94-103>

Research article

## Form Making in Architecture and Construction. Analysis of Breadboarding and 3D Modeling: Facets of Discourse

Marina E. Dymchenko ✉, Aleksey A. Naumov

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

✉ [kapitel1073@yandex.ru](mailto:kapitel1073@yandex.ru)

### Abstract

**Introduction.** The present article raises an issue important for breadboarding — the future of this field of activity. Breadboarding is a developing technology, which has become a sphere of occupation for many people, whose work results are highly appreciated in the fields of science and construction. 3D modeling is also becoming popular in the

similar fields, having its own digital (innovative) advantages. The detailed analysis, allows us to find the pros and cons of both technologies.

**Materials and Methods.** The methodological framework of the research includes the conventional scientific methods, as well as the emerging interdisciplinary approaches characteristic for the architecture and construction. The material studied in the present article refers to the evolution of the technological concepts of architectural prototyping the facilities of capital construction and reconstruction by the example of 3D modeling and breadboarding.

**Results.** It has been found that form making by means of breadboarding and 3D modeling is widely used at different stages of the advanced construction, innovative reconstruction and up to date restoration.

**Discussion and Conclusion.** The study of breadboarding and 3D modeling reveals that these technological concepts are getting popular in the fields of construction and architecture.

**Keywords:** architectural form making, technologies, breadboarding, 3D modeling, visualization, breadboards, architecture, construction

**For citation.** Dymchenko ME, Naumov AA. Form Making in Architecture and Construction. Analysis of Breadboarding and 3D Modeling: Facets of Discourse. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(1):94–103. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-94-103>

**Введение.** В современном мире становится все больше доступным пользование 3-D технологиями. Благодаря компьютерной графике можно создать модель любого объекта в объеме. Сторонники данного моделирования считают, что 3-D в скором заменит макетирование — процесс создания уменьшенной копии заданного объекта в масштабе, используя различные материалы. Сможет ли современная виртуальность вытеснить многовековое направление? Или же есть области, в которых невозможно обойтись без физической модели объекта?

В исследовании авторы обращаются к научным методам: индукции, дедукции и сравнительному анализу.

Цель исследования — провести необходимый сравнительный анализ данных технологий, выявить, какая из них больше подходит современным сферам архитектуры, строительства и дизайна, изучить возможность совмещения двух методов моделирования.

**Материалы и методы.** Рассмотрим некоторые примеры 3-D моделирования и опыт применения.

3-D моделирование — это создание виртуальных моделей какого-либо предмета с точной передачей его внешнего вида — формы, материала, размера, цвета. Для визуализации используются сложные программные продукты, популярные из них — SketchUp, 3DS Max, Blender<sup>1</sup>(рис. 1) [1–3].

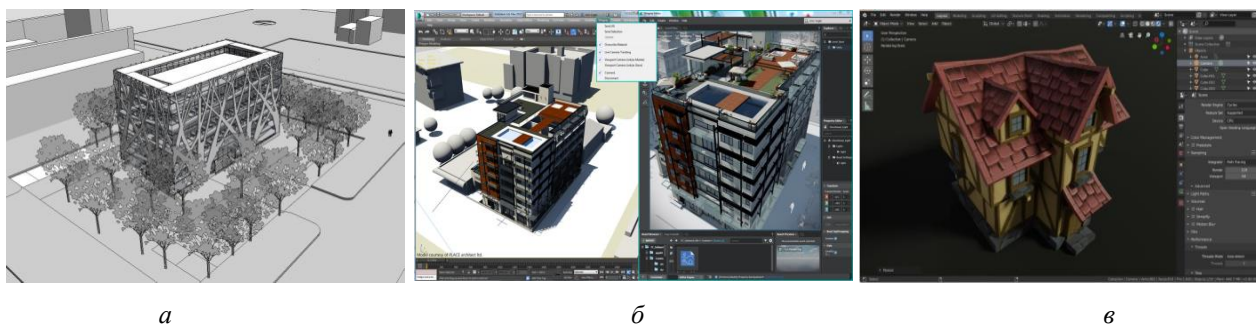


Рис. 1. Моделирование в программных комплексах:  
а — Sketchup 3D Models-Architecture Concept Sketchup Models<sup>2</sup>; б — 3DS Max<sup>3</sup>; в — Blender<sup>4</sup>

С помощью множества функций программ можно полностью воссоздать реальный объект в 3-D модели, максимально точно проработав даже самые мелкие и сложные детали (рис. 2, 3).

<sup>1</sup>Аббасов И.Б. *Основы трехмерного моделирования в 3dsMAX2018*: учеб. пособие. 3-е изд. М.: ДМК Пресс; 2017. 186 с.

<sup>2</sup>Sketchup 3D Models--Architecture Concept Sketchup Models See more about Sketchup 3D Models,AutoCAD. URL: <https://ru.pinterest.com/pin/677017756459883830> (дата обращения 14.02.2024).

<sup>3</sup>Autodesk 3ds Max. URL: <https://fatma.ru/products/2578763/autodesk-3ds-max-2019-licenziya> (дата обращения 14.02.2024).

<sup>4</sup>Rendered textures different to 3D ViewTexturing problemCycles. URL: <https://vjylku.blogspot.com/2019/03/rendered-textures-different-to-3d.html> (дата обращения 14.02.2024).

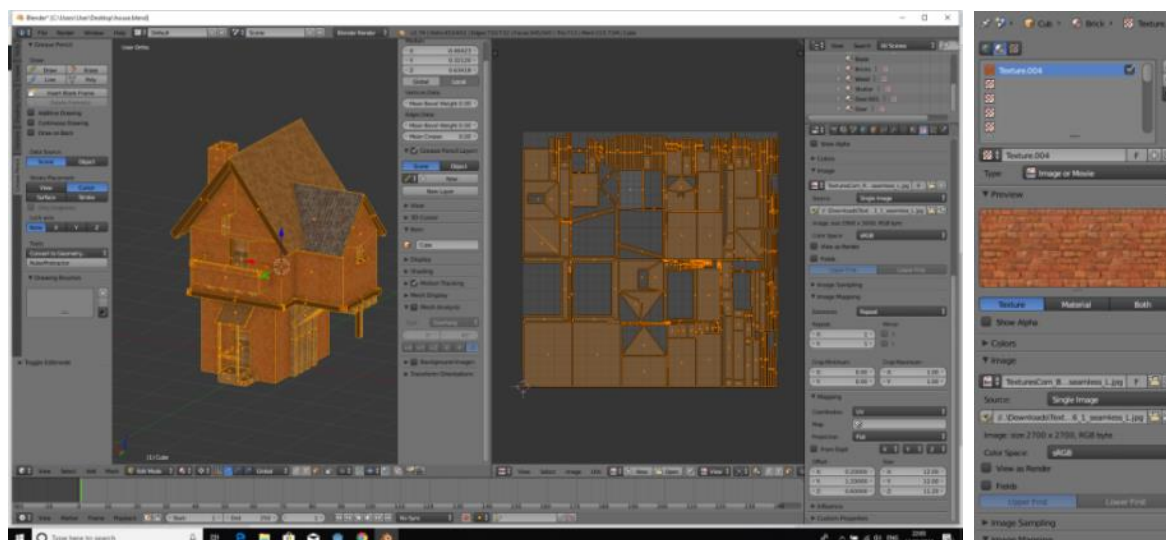


Рис. 2. Процесс применения материала/текстуры в программе Blender (добавляется текстура кирпича к материалу)<sup>5</sup>

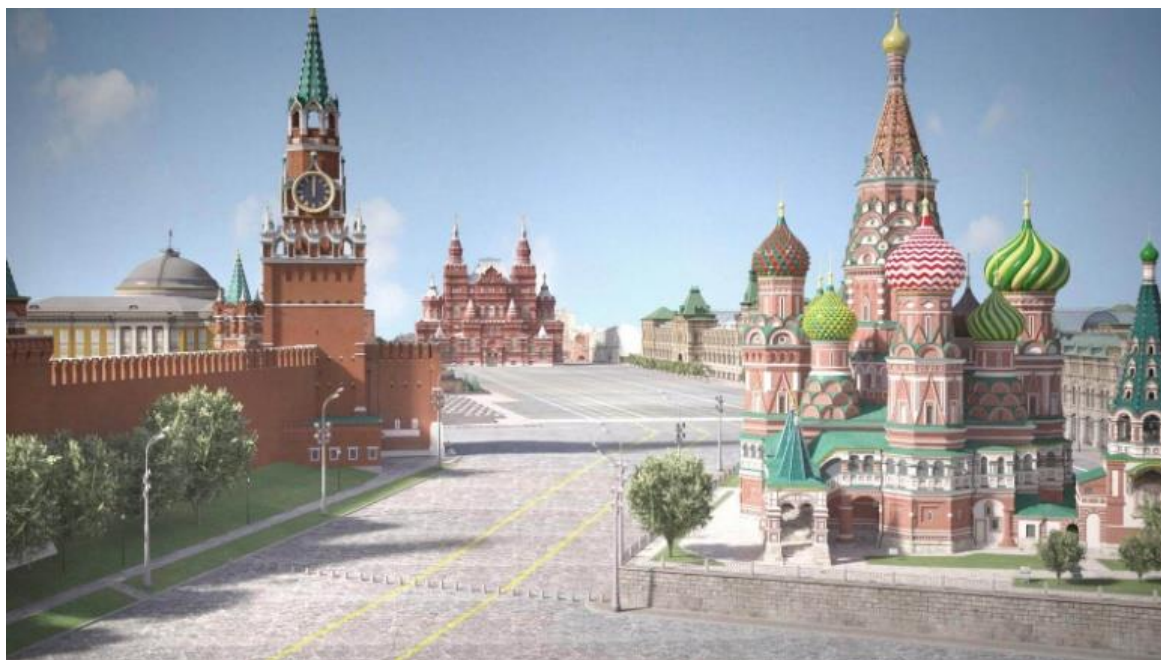


Рис. 3. Текстурированная 3-D модель Красной Площади<sup>6</sup>

Изучение трехмерной графики становится обязательным для специалистов архитектуры, строительства и дизайна. Способности 3-D графики обширны, но для высокого результата в моделировании обязательным становится прохождение сложного пути обучения и получения навыков работы в программах и практического опыта прорисовки деталей.

При моделировании зданий и сооружений для визуализации необходимы чертежи фасадов и планы этажей, чтобы после перевести их в 3-D визуализатор, который сам создаст 3-D вид объекта, а архитектору и инженеру-проектировщику останется подобрать соответствующие материалы и освещение модели здания. Таким образом, внешний вид здания можно увидеть еще на этапе создания чертежей для возможной правки (рис. 4).

<sup>5</sup>Rendered textures different to 3D ViewTexturing problemCycles. URL: <https://vjylku.blogspot.com/2019/03/rendered-textures-different-to-3d.html> (дата обращения 14.02.2024).

<sup>6</sup>Moscow Red Square Russia 3D Model. URL: <https://www.renderhub.com/squir/moscow-red-square-russia> (дата обращения 14.02.2024)

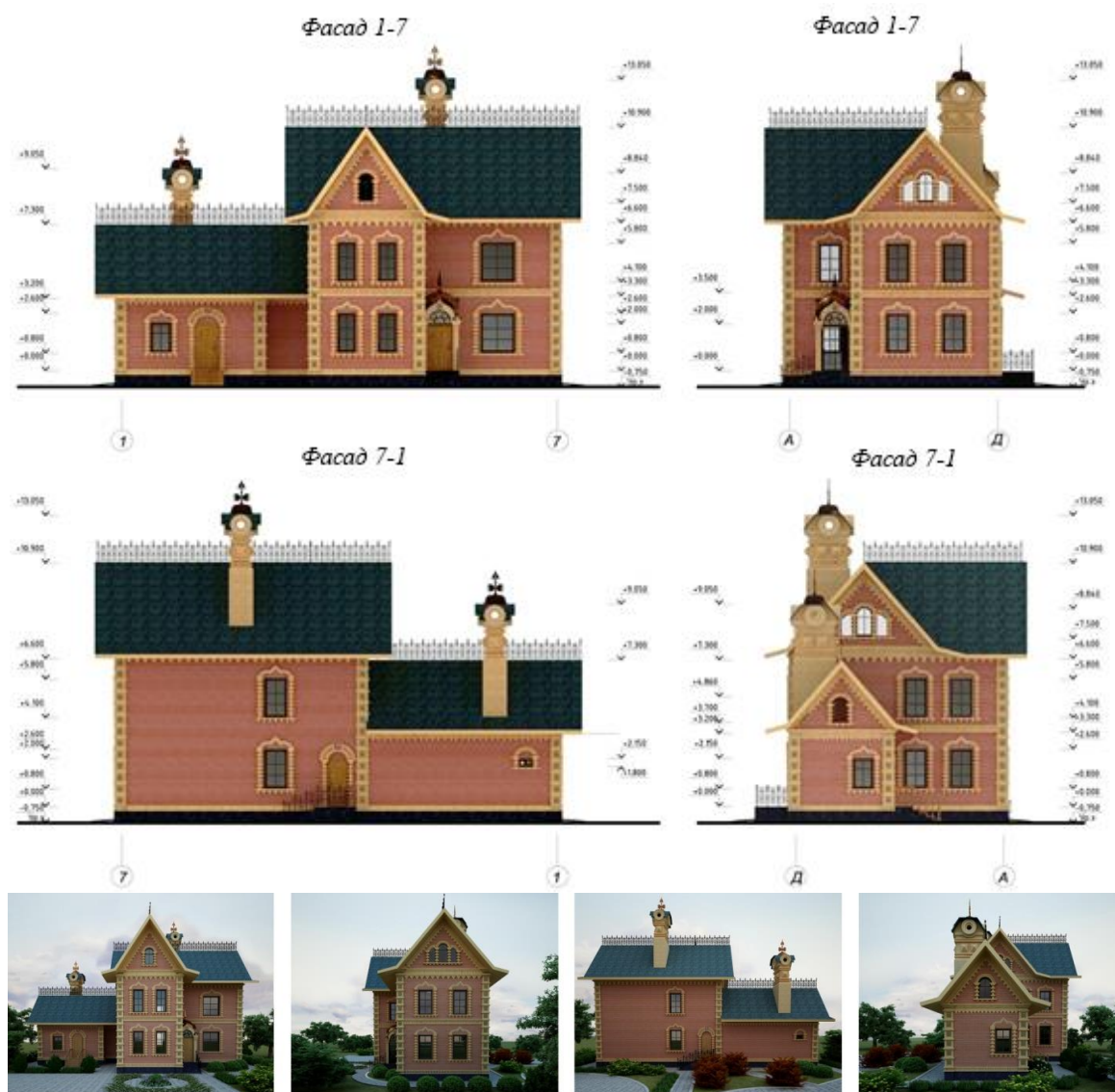


Рис. 4. Индивидуальный жилой дом: фасады, модель

Макет — это объемно-пространственная модель в уменьшенном или укрупненном масштабе объекта, существующего, находящегося на стадии проектирования или создания. Углубившись в историю, можно узнать, что технология макетирования существовала с древних времен (рис. 5) [4].

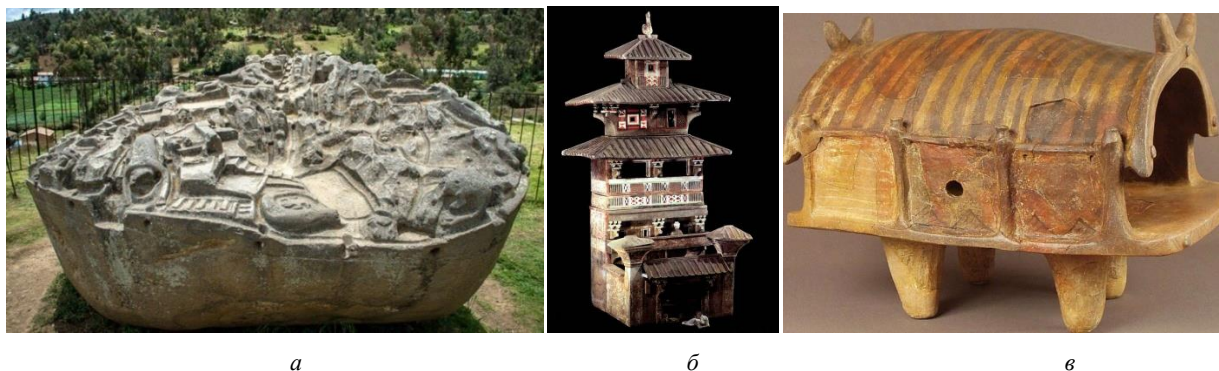


Рис. 5. Макеты древних времен: а — макет города с действующей ирригационной системой (Перу, доколумбовая Америка<sup>7</sup>); б — макет многоэтажного дома из китайского погребального комплекса<sup>8</sup>; в — макет здания из раскопок Триполья

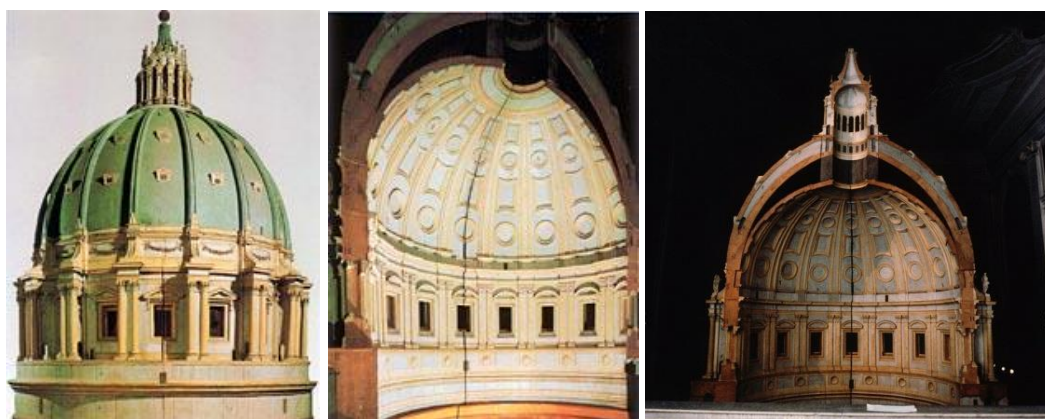
<sup>7</sup>Загадка перуанского камня с макетом города. URL: <https://sozero.livejournal.com/2376075.html> (дата обращения 14.02.2024).

<sup>8</sup>Древний Китай. Погребальные комплексы, Терракотовая армия Цинь Ши-хуанди и Великая стена. URL: <https://dzen.ru/a/XztmPXDZhWhrOmB3> (дата обращения 14.02.2024).

Раньше макеты служили не только для визуального представления объекта, но и для расчета нагрузок или проверки рабочего состояния того или иного предмета (рис. 6 а, б).



а



б

Рис. 6. Исторические макеты, служившие для расчета нагрузок: а — стереоскопическая модель крипты колонии Гуэль, арх. А. Гауди<sup>9</sup>; б — макет барабана и купола собора Святого Петра в Риме, арх-ры Микеланджело, Джакомо делла Порта, Луиджи Ванвителли<sup>10</sup>

В настоящее время эта функция менее актуальна ввиду новейших методов расчета конструкций при BIM-проектировании с помощью компьютерных программ, таких как ЛИРА-САПР, САПФИР-3D (рис. 7).

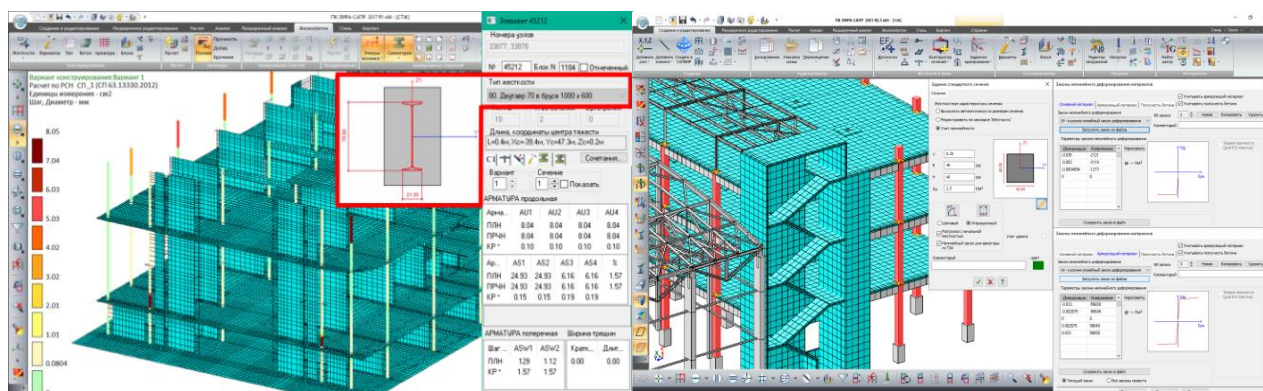


Рис. 7. Примеры расчета армирования стен в ПК «ЛИРА САПР»<sup>11</sup>

<sup>9</sup>Архитектура Гауди, который не умел чертить? URL: <https://dzen.ru/a/WxT6y7zxvPyj-EKb> (дата обращения 14.02.2024)

<sup>10</sup> Царство виртуальной архитектуры. URL: <https://www.maket.ru/article/> (дата обращения 14.02.2024)

Собор святого петра в Риме. URL: <https://bangkokbook.ru/poezdki/sobor-svyatogo-petra-v-rime-mikelandzhelo.html> (дата обращения 14.02.2024)

<sup>11</sup>Армирование стен ЛИРА САПР. 86 фото. URL: <https://stroiteh-msk.ru/materialy/armirovanie-sten-lira-sapr-86-foto.html> (дата обращения 14.02.2024)

Цели современного макетирования:

- максимально точно повторить заданный объект в макете, архитектурный облик здания или сооружения;
- средствами макетирования передать временную эпоху и её особенности;
- выявить историческую связь поколений;
- проверить рабочее состояние строящегося объекта;
- выставочно-демонстрационная презентация коммерческих объектов строительства на рынке недвижимости.

По назначению макеты подразделяются на рабочие и демонстрационные (рис. 8 а, б). Первый вид моделей создается для наиболее наглядного представления будущего объекта и дальнейшего его изменения. Второй выполняет задачу визуального изображения при утверждении проекта или его демонстрации клиентам. В современных сферах архитектуры, строительства и дизайна этот вид макета считается наиболее распространенным.



Рис. 8. Макеты: а — рабочий; б — макет студенческого городка ДГТУ

Макет — это результат долгой и кропотливой работы. При создании макетов используются различные виды материалов — дерево, картон, пластик. Из них изготавливают детали, которые после склеивают друг с другом, создавая объем макета. Макет считается законченным после его художественной отделки — покраски, декорирования элементами. Для выставочно-демонстрационных макетов зданий не обойтись без передачи окружающей среды и освещения (в этом случае используют специальные световые элементы).

Макеты могут изготавливать полностью вручную или частично механизировано: в случае работы с картоном или деревом детали вырезаются на лазерном станке или же из специального пластика детали создаются на 3-D принтере.

**Результаты исследования.** Строительство любого здания или сооружения можно разделить на 3 этапа — проектирование, возведение объекта и сдача его в эксплуатацию, включающие следующие стадии архитектурного моделирования:

1. 3-D модель создается на основе расчетов нагрузок в компьютерных программах, на этапе проектирования, включающего разработку общей концепции объекта, его архитектурно-планировочной, конструктивной и расчетной части. По желанию заказчика, для большей наглядности, на этапе проектирования может быть выполнен и макет будущего здания или сооружения.

Но почему заказчику может быть недостаточно 3-D модели для общей наглядности? Ответ заключается в том, что саму модель, то есть сам файл с трехмерной графикой, заказчик не получает, а получает лишь картинку (рендер) с определенной точки или точек, с которой можно посмотреть на объект или его деталь, но в целом посмотреть со всех сторон на него заказчик не может. Поэтому на помощь приходят рабочие макеты — благодаря этому можно внести изменения в архитектурный проект на стадии его разработки.

2. Стадия возведения объекта — строительство здания или сооружения. На данном этапе могут вноситься незначительные изменения в проект, поэтому применяются только технологии перерасчета конструкций на нагрузки в соответствии с тем, что происходит на строительной площадке.

3. Как выполнение корректировок трехмерной модели здания, так и изготовление демонстрационного макета, с учетом внесенных изменений в проект, осуществляется на завершающем этапе - при подготовке к сдаче здания в эксплуатацию.

Также надо отметить, что 3-D модели чаще используют на сайтах для рекламы или продажи будущего объекта.

**Обсуждение и заключение.** Сравнительный анализ техник архитектурного моделирования (макетирования и 3-D графики) показывает, что и та, и другая востребованы. Но можем ли мы говорить о наибольшей степени востребованности какой-либо из этих техник? В настоящее время обе технологии — макетирование и компьютерное моделирование — являются актуальными в сферах строительства и архитектуры, в каждой свои плюсы (рис. 9–12).



Рис. 9. Примеры 3-D моделей бревенчатого дома<sup>12</sup>



Рис. 10. Макет почтового отделения в г. Бад-Либенштайн, Германия, фахверковая конструкция XVIII в.



Рис. 11. Макеты из цикла «Традиционное народное жилище»



Рис. 12. Макеты церквей

<sup>12</sup>3D-модель бревенчатого дома. URL: <https://stroiteh-msk.ru/materialy/3d-model-brevenchatogo-doma-84-foto.html> (дата обращения 14.02.2024)

Надо подчеркнуть, что:

- накоплен опыт применения 3-D технологий при проектировании вновь возводимых и реконструкции исторических зданий;
- для презентации на архитектурных выставках и приобретения в частные коллекции большая распространенность остается за макетами исторических и уникальных зданий и сооружений.

Актуальным остается вопрос продвижения на рынке недвижимости жилых и общественных помещений. Для наилучшего результата в офисах продаж размещается выставочно-демонстрационный макет (рис. 13–14).

Хотя зачастую рендер модели в рекламных целях здания на интернет-площадке, билборде или баннере, выглядит более детально, чем фотография самого объекта модели<sup>13</sup> [5].



Рис. 13. Выставочно-демонстрационный макет ЖК «Суворовский», Ростов-на-Дону<sup>14</sup>



Рис. 14. Выставочно-демонстрационный макет жилого комплекса в респ. Крым<sup>15</sup>

<sup>13</sup> Зеньковский В.А. 3D моделирование на базе VuxStream: учебное пособие. М.: ИД Форум, НИЦ Инфра-М; 2013. 384 с.

<sup>14</sup> Проект ЖК Суворовский. URL: <https://triptonkosti.ru/2-foto/proekt-zhk-suvorovskij-80-foto.html> (дата обращения 14.02.2024)

<sup>15</sup> Архитектурный макет жилого комплекса в Крыму. URL: <http://www.prosto-maket.ru> (дата обращения 14.02.2024)

На основании вышеизложенного приходим к заключению: в современной архитектурно-строительной отрасли невозможно обойтись как без макетов, так и без новых технологий (трехмерной графики). Каждая из техник архитектурного моделирования востребована, рациональна и применяется на разных этапах строительства, реконструкции, реставрации. Действительно значительный трендовый характер носят и 3-D модели, и макеты в воссоздании и экспонировании объема и фактуры объектов капитального строительства, памятников архитектуры. Эти технологические подходы популярны как в России, так и за рубежом, соответствуют моменту и перспективны в будущем.

#### Список литературы

1. Аббасов И.Б. *Двухмерное и трехмерное моделирование в 3dsMAX*. М.: ДМК; 2012. 176 с.
2. Трубочкина Н.К. *Моделирование 3D-наносхемотехники*. М.: Бином. Лаборатория знаний; 2020. 526 с. URL: <https://znanium.ru/read?id=365954> (дата обращения 14.02.2024).
3. Шукурова А.Н. *Архитектурные модели. Очерки истории и мастерства*. Москва: Индрик; 2016. 394 с. URL: <https://www.litres.ru/book/anna-shukurova/arhitekturnye-modeli-ocherki-istorii-i-masterstva-11084010/chitat-onlayn/> (дата обращения 14.02.2024).
4. Евтюхова Л.А., Левашева В.П. Раскопки китайского дома близ Абакана (Хакасская А.О.). КСИИМК. 1946;12:72–84. URL: <http://kronk.spb.ru/library/evtyukhova-levashova-1946.htm> (дата обращения 14.02.2024)
5. Швембергер С.И., Горончаровский В.А., Щербakov П.П. *3DSMAX. Художественное моделирование и специальные эффекты*. СПб.: BHV; 2006. 320 с.

#### References

1. Abbasov IB. *Two-dimensional and Three-dimensional Modeling in 3DS MAX*. Moscow: DMK Publ.; 2012. 176 p. (In Russ.).
2. Trubochkina NK. *Modeling of 3D Nanocircuits*. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy Publ.; 2020. 526 p. URL: <https://znanium.ru/read?id=365954> (accessed 14. 02.2024). (In Russ.).
3. Shukurova AN. *Architectural Models. Essays on History and Craftsmanship*. Moscow: Indrik Publ.; 2016. 394 p. URL: <https://www.litres.ru/book/anna-shukurova/arhitekturnye-modeli-ocherki-istorii-i-masterstva-11084010/chitat-onlayn/> (accessed 14.02.2024). (In Russ.).
4. Evtyukhova LA, Levashova VP. Excavations of a Chinese House Near Abakan (Khakass Autonomous Region). *Short communications of the Institute of the History of Material Culture*. 1946;12:72–84. URL: <http://kronk.spb.ru/library/evtyukhova-levashova-1946.htm> (accessed 14. 02.2024) (In Russ.).
5. Shvemberger SI, Goroncharovskii VA, Shcherbakov PP. *3DS MAX. Artistic Modeling and Special Effects*. St. Petersburg: BHV Publ.; 2006. 320 p. (In Russ.).

#### Об авторах:

**Марина Евгеньевна Дымченко**, доцент кафедры строительных материалов Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162), кандидат философских наук, [kapitel1073@yandex.ru](mailto:kapitel1073@yandex.ru)

**Алексей Александрович Наумов**, доцент кафедры «Вычислительные системы и информационная безопасность» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162), кандидат технических наук, доцент, [ORCID, alexej\\_naumov@list.ru](https://orcid.org/alexej_naumov@list.ru)

#### Заявленный вклад авторов:

М.Е. Дымченко — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, сбор данных, анализ результатов исследований, подготовка текста, формулирование выводов.

А.А. Наумов — планирование, организация и реализация исследований, анализ результатов исследований, корректировка текста.

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

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Поступила в редакцию** 26.02.2024

**Поступила после рецензирования** 10.03.2024

**Принята к публикации** 14.03.2024

*About the Authors:*

**Marina E. Dymchenko**, Cand.Sci. (Philosophy), Associate Professor of the Building Materials Department, Don State Technical University (162, Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don, 344003, RF), [kapitel1073@yandex.ru](mailto:kapitel1073@yandex.ru)

**Aleksey A. Naumov**, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Computing Systems and Information Security Department, Don State Technical University (162, Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ORCID, alexej\\_naumov@list.ru](https://orcid.org/alexej_naumov@list.ru)

*Claimed contributorship:*

ME Dymchenko — formulating the main concept, aim and objectives of the research, data collection, analysis of the research results, preparing the text, formulating the conclusions.

AA Naumov — planning, organising and carrying out the research, analysis of the research results, refining the text.

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

*All authors have read and approved the final manuscript.*

**Received** 26.02.2024

**Revised** 10.03.2024

**Accepted** 14.03.2024

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

## TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION



УДК 628.511.2

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-104-113>

### Моделирование и прогнозирование концентрации PM2.5 на строительной площадке с использованием искусственного интеллекта

С.Е. Манжилевская  

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

 [smanzhilevskaya@yandex.ru](mailto:smanzhilevskaya@yandex.ru)

EDN: BHCSYU

#### Аннотация

**Введение.** Воздействие на людей высоких концентраций PM2.5 неблагоприятно сказывается на их здоровье. По оценкам исследователей, воздействие твердых частиц, образующихся в результате выбросов строительной пыли, стало причиной 18 % смертей от заболеваний дыхательной системы. В связи с ростом объемов строительного производства и увеличением, соответственно, объемов пылевых выбросов появляется необходимость расширить функционал применения сквозных технологий, а именно технологий искусственного интеллекта, в сфере прогнозирования концентрации пылевых выбросов в атмосферном воздухе частиц мелкодисперсной пыли PM2.5 на строительной площадке.

**Материалы и методы.** Для достижения поставленной цели были проведены замеры концентрации частиц PM2.5 на строительной площадке с помощью счетчика частиц Handheld 3016 IAQ в период с 1 по 6 июля 2023 г., учитывая метеорологические характеристики территории, которые стали в дальнейшем исходными данными для моделирования прогноза концентрации пылевого загрязнения с помощью таких алгоритмов как ARIMA, EMA, XGBoost и т.д., а также ансамблевых моделей, в состав которых вошли рассматриваемые алгоритмы машинного обучения. Определение эффективности применения данных технологий в сфере прогнозирования определялось путем сравнения результатов прогноза и данными натурных измерений.

**Результаты исследования.** Произведен корреляционный анализ посредством программы «Modeltime», что определяет взаимосвязь между концентрацией PM2.5 и метеорологическими переменными. Автокорреляция была проведена при помощи корреляции Пирсона. Произведена оценка на первом этапе четырех одномерных моделей на базе искусственного интеллекта с целью определения точности прогноза средней концентрации. Следующим этапом стала оценка прогнозирования средней концентрации PM2.5 при помощи многомерных моделей, которые учитывают взаимосвязи между независимыми и зависимыми переменными. На заключительном этапе исследования три лучшие модели с точки зрения эффективности прогнозирования были включены для проверки ансамблевой модели.

**Обсуждение и заключение.** Надежные прогнозные модели могут быть полезными инструментами для понимания факторов, которые могут влиять на концентрацию. В настоящем исследовании для прогнозирования концентрации PM2.5 использовались семь алгоритмов машинного обучения. В совокупности это исследование предоставляет доказательства эффективности использования методов комплексного моделирования для прогнозирования загрязнения воздуха.

**Ключевые слова:** пылевые выбросы, мелкодисперсная пыль, сквозные технологии, загрязнение воздушной среды, искусственный интеллект, пылевое загрязнение

**Для цитирования.** Манжилевская С.Е. Моделирование и прогнозирование концентрации PM2.5 на строительной площадке с использованием искусственного интеллекта. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(1):104–113.

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-104-113>

## Modeling and Predicting PM2.5 Concentration at a Construction Site Using the Artificial Intelligence

Svetlana E. Manzhilevskaya  

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

 [smanzhilevskaya@yandex.ru](mailto:smanzhilevskaya@yandex.ru)

### Abstract

**Introduction.** High concentration of PM2.5 has the adverse effect on people's health. According to the evaluations made by the researchers, the impact of the particulate matter from the construction dust emissions resulted in 18% of deaths from respiratory diseases. Due to the growth of construction production volume and consequent increase of dust emission volumes, there arises the need to expand the scope of using the end-to-end technologies, namely the artificial intelligence technologies, for predicting the fine-dispersed dust particles PM2.5 concentration in dust emissions at the construction site.

**Materials and methods.** To achieve this goal, the measurements of PM2.5 concentration at the construction site were carried out using the Handheld 3016 IAQ particle counter in the period from July 1 to July 6, 2023 taking into account the meteorological characteristics of the territory, which then became the input data for modelling the forecast of dust pollution concentration using such algorithms as ARIMA, EMA, XGBoost, etc., and the ensemble models that included the above machine learning algorithms. The efficiency of using these technologies for predicting was determined by comparing the results of the forecast and the field measurements data.

**Results.** A correlation analysis was performed using the Modeltime program, which determined the relationship between PM2.5 concentration and meteorological variables. Autocorrelation was performed using Pearson correlation. At the first stage, four one-dimensional models based on the artificial intelligence were evaluated to determine the accuracy of mean concentration forecast. The next step was to evaluate the capacity of predicting the mean PM2.5 concentration using the multidimensional models that took into account the relationships between the independent and dependent variables. At the final stage of the research, three most efficient predictive models were included to test the ensemble model.

**Discussion and conclusion.** The reliable predictive models can be the useful tools for understanding the concentration impact factors. In the present research, seven machine learning algorithms were used to predict the concentration of PM2.5. The research, as a whole, presents the evidences of the integrated modeling method efficiency for predicting the air pollution.

**Keywords:** dust emissions, fine dust, end-to-end technologies, air pollution, artificial intelligence, dust pollution

**For citation.** Manzhilevskaya SE. Modeling and Predicting PM2.5 Concentration at a Construction Site Using the Artificial Intelligence. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(1):104–113. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-104-113>

**Введение.** В России с каждым годом растет городское население, к 2050 году в городских агломерациях будет проживать до 84 % население страны [1]. Рост населения в городах создает множество экологических проблем, в т. ч. загрязнение воздуха за счет быстро растущего объема строительного производства в городах. Замеры, мониторинг, моделирование и прогнозирование пылевых выбросов доказывают, что строительный процесс является крупным источником пылевого загрязнения в городской среде, что требует разработки мероприятий по сокращению его в воздушную среду города [2].

На сегодняшний день в процессе прогнозирования концентрации пылевых выбросов в воздушной среде применяется метод на основе регрессии, но с возрастанием объемов строительства и, соответственно, объемов пылевого загрязнения для систематизации и повышения точности прогнозирования требуется привлечение новых инструментов, в том числе цифровых технологий.

В сфере прогнозирования концентрации пылевых выбросов возможно внедрить методы машинного обучения, такие как нейронные сети, методы опорных векторов, модели цифровой библиотеки «Prophet» и т. д., хотя они также имеют недостатки и погрешности. В ходе исследований К.Ю. Богачева, применявшего в прогнозировании линейные и нелинейные модели, было установлено, что нелинейные модели (нейронные сети) дают более точный прогноз, что делает их приоритетным цифровым инструментом прогнозирования [3]. Нейронные сети, помимо всего, имеют высокие показатели переобучения и достижения в поиске локальных минимумов [4].

В связи с развитием тенденции внедрения в строительную отрасль сквозных технологий появляется необходимость проверить возможность применения данного инструмента с целью прогнозирования концентрации загрязнения воздушной среды на примере пылевых выбросов частиц мелкодисперсной пыли PM2.5, так как на данный момент частицы данного вида наиболее опасный для здоровья человека [5].

По данным зарубежных исследований в обучении искусственного интеллекта наиболее точные прогнозы дают ансамблевые модели (ensemble models), которые могут комбинировать в своей связке несколько автономных алгоритмов, которые также по отдельности могут осуществить процесс прогнозирования [6].

Цель данного исследования — определить эффективность применения в процессе прогнозирования концентрации пылевого загрязнения PM<sub>2.5</sub> на строительной площадке моделей и алгоритмов обучения искусственного интеллекта, как по отдельности, так и в составе ансамблевых моделей.

Для достижения данной цели были определены следующие задачи:

1. Осуществить процесс моделирования и прогнозирования концентрации пылевого загрязнения частицами PM<sub>2.5</sub> на строительной площадке с использованием следующих алгоритмов:

– авторегрессионная интегрированная модель скользящего среднего (autoregressive integrated moving average, ARIMA);

– экспоненциальное сглаживание (exponential moving average, EMA);

– цифровая библиотека Prophet;

– нейронные сети (neural network, NN);

– алгоритм случайного леса (random forest, RF);

– метод опорных векторов (support-vector machine, SVM);

– цифровая библиотека с открытым исходным кодом XGBoost.

2. Применить метод ансамблевых моделей для прогнозирования концентраций PM<sub>2.5</sub> на строительной площадке станции метрополитена в г. Москва.

Важно определить надежность полученных результатов от применения модели для прогнозирования концентраций PM<sub>2.5</sub> по нескольким причинам:

1. Данные прогноза концентрации загрязняющего вещества, полученные с помощью применения данных моделей, позволят скорректировать расписание работ в зависимости от погодных условий и применить защитные мероприятия, которые позволят снизить концентрацию пылевого загрязнения и уровень воздействия на рабочих и население, проживающее по соседству со строительной площадкой.

2. Модели можно использовать для изучения динамики снижения концентрации загрязняющих веществ, определять, например, зоны или периоды строительного производства с высоким/низким уровнем концентрации загрязняющего вещества в воздушной среде территории города.

3. Применение данных моделей определяют значимые переменные, которые оказывают влияние на концентрацию частиц PM<sub>2.5</sub> при производстве работ на строительной площадке (направление и скорость ветра, влажность, температура и т. д.).

Моделированием и прогнозированием концентрации загрязняющих веществ PM<sub>2.5</sub> и PM<sub>10</sub> занимались многие зарубежные ученые [7, 8]. Загрязненность воздушной среды частицами мелкодисперсной пыли PM<sub>2.5</sub> в строительном производстве является объектом и многих отечественных исследований в связи с высокой степенью их воздействия на здоровье человека [9, 10].

Таким образом, разработка надежных инструментов для прогнозирования содержания PM<sub>2.5</sub> в воздушной среде от строительного производства имеет жизненно важное значение для разработки эффективных стратегий снижения его воздействия.

**Материалы и методы.** Москва является административной столицей Российской Федерации и центром экономической деятельности страны. Высокая плотность населения, рост строительного производства генерируют большие объемы загрязняющих веществ в воздухе, таких как частицы PM<sub>2.5</sub> [11].

Исходными данными для моделирования процессов прогнозирования концентрации PM<sub>2.5</sub> стали результаты замеров, произведенные на строительной площадке станционного комплекса «Улица Новаторов, вестибюль 1, по ул. Новаторов 6, г. Москва». Измерения концентрации частиц мелкодисперсной пыли были произведены при помощи счетчика частиц Handheld 3016 IAQ в период с 1 по 6 июля 2023 г. Для контроля точности прогноза концентрации PM<sub>2.5</sub> путем ее моделирования посредством применения ансамблевых моделей замеры также производились 7 и 8 июля. Точность прогнозирования требовала ввести метеорологические переменные — температуру и относительную влажность, что также измерялось в ходе исследования. Все полученные данные были использованы для обучения одномерных и многомерных моделей, рассматриваемых в данной работе, с целью прогноза концентрации PM<sub>2.5</sub>.

Процесс моделирования прогноза концентрации PM<sub>2.5</sub> включал следующие алгоритмы прогнозирования:

1. Модель ARIMA. Модель не способна фиксировать нелинейные взаимосвязи между переменными, которые включены в процесс обучения. Это требует поочередно включать переменные в моделирование и посредством сравнения полученных данных с реальными значениями концентрации определять точность

прогноза. Данная модель имеет три элемента: модель авторегрессии, модель скользящего среднего и разностную модель [12]. В целом ARIMA для процесса прогнозирования фиксирует информацию в данных после автокорреляции, а затем посредством ввода переменной выдает прогноз. Математическое выражение данной модели имеет следующий вид:

$$y'_t = c + y'_{t-1}\varnothing_1 + \dots + \varnothing_p y'_{t-p} + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где  $y'_t$  — разностные данные временных рядов для концентрации PM2.5;  $c$  — константа;  $\varepsilon$  — значение ошибки;  $d$  — порядок разностных данных временных рядов.

Предикторы в правой части уравнения (1) включают запаздывающие значения концентрации PM2.5 и запаздывающие ошибки. Элементы  $p$ ,  $d$  и  $q$  модели ARIMA определяются автоматически с использованием варианта алгоритма Хайндмана-Хандакара [13].

2. Модель EMA. В отличие от модели ARIMA данный алгоритм применяется для прогнозирования в нескольких областях. Он не только взвешивает одинаково средние значения ряда подмножеств, но и учитывает фактор времени, сглаживая значения и уменьшая их вес с течением времени.

Математическое выражение данной модели имеет следующий вид:

$$y_{t+1} = F_t + \alpha(y_t - F_t), \quad (2)$$

где  $y_{t+1}$  — прогноз концентрации PM2.5 на следующий период времени;  $F_t$  — прогноз концентрации частиц PM2.5 на момент времени ( $t$ );  $y_t$  — фактическое значение концентрации PM2.5 на момент времени ( $t$ );  $\alpha$  — вес, называемый константой экспоненциального сглаживания ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ).

Данная модель присваивает меньше веса более ранним по времени наблюдениям ( $y_{t-6}$ ), чем приближенным к моменту расчета ( $y_{t-1}$ ) [14].

3. Модель Prophet. В данную модель можно включать переменную, которая характеризует показатели «сезонности» концентрации. Например, этот алгоритм можно использовать для прогнозирования пылевыведения от строительных работ в теплое время и холодное время года. Математическое выражение данного алгоритма для расчета концентрации PM2.5 имеет следующий вид:

$$y_t = g(t) + s(t) + h(t) + \varepsilon_t, \quad (3)$$

где  $g(t)$  — кусочно-линейная функция, определяющая динамику;  $s(t)$  — различные сезонные закономерности;  $h(t)$  — эффект «праздничного дня»;  $\varepsilon_t$  — ошибки типа белый шум, не учтены моделью [15].

4. Модель нейросети. Нейронные сети моделируют информацию, имитируя человеческое мышление, и отражают нелинейные взаимосвязи.

В моделировании прогноза концентрации PM2.5 применимы следующие модели:

- модель нелинейной авторегрессии с внешними входами (NARX);
- модель нейронной сети, основанная на нескольких переменных (NNAR).

Для работы с моделями нейросети были использованы следующие данные для переменных, полученные в ходе измерения концентрации PM2.5 на строительной площадке, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Данные измерений со стройплощадки в июле 2023 г.

| Концентрация пылевого загрязнения<br>PM2.5, мкг/м <sup>3</sup> |                   |         | Относительная влажность воздуха |                   |         | Температура |                   |         |
|----------------------------------------------------------------|-------------------|---------|---------------------------------|-------------------|---------|-------------|-------------------|---------|
| Диапазон                                                       | Средн.<br>значен. | Отклон. | Диапазон                        | Средн.<br>значен. | Отклон. | Диапазон    | Средн.<br>значен. | Отклон. |
| 1,73–65,3                                                      | 22,4              | 11,9    | 13,1–19,7                       | 16,7              | 14,3    | 23,1–33,2   | 28,2              | 4,2     |

5. Алгоритм Random forest. Данный алгоритм генерирует большое количество древ решений. Загрузка всех данных, включая переменные, генерирует уникальные древа решений. Результаты прогнозирования посредством данной модели определяются средними значениями выходных данных каждого дерева.

Математическое выражение данного алгоритма для расчета концентрации PM2.5 имеет следующий вид:

$$p = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N N, \quad (4)$$

где  $p$  — прогноз алгоритма случайного древа решений;  $N$  — количество прогонов по деревьям в случайном лесу (случайным выборкам).

6. Модель SVM. Данная модель разработана В.Н. Вапником [16]. Основной целью алгоритма SVM является определение оптимальной гиперплоскости, которая линейно разделяет собранные данные на две группы:

$$w^T x + b = 0, \quad (5)$$

где  $w$  — весовой вектор;  $x$  — входной вектор;  $b$  — смещение.

7. Алгоритм XGBoost. XGBoost — это относительно новый алгоритм машинного обучения, представляющий собой совокупность деревьев решений, использующий градиентный бустинг. Основная идея модели XGBoost заключается в том, что алгоритм объединяет выходные данные большого количества деревьев решений для получения более точных прогнозов. XGBoost — это алгоритм решений с градиентным усилением, т. е. посредством расчета одной модели алгоритм убирает ошибки при создании следующих моделей, что повышает точность прогнозов. Математическое выражение данного алгоритма для расчета концентрации PM2.5 имеет следующий вид:

$$\hat{y} = \sum_{n=1}^n f_n(x_i), \quad (6)$$

где  $x_i$  — тестовая выборка;  $i$  — количество выборок;  $f_n$  —  $n$ -я древовидная модель;  $n$  — количество всех деревьев в модели.

Рассмотренные модели были использованы для получения прогнозов среднесуточной концентраций частиц мелкодисперсной пыли PM2.5.

Процесс прогнозирования был произведен в 4 этапа:

1. Сбор и обработка данных.
2. Подготовка данных к моделированию.
3. Использование расчетной модели для прогнозирования.
4. Оценка прогноза.

Все модели были реализованы с использованием язык программирования для статистической обработки данных и работы с графикой «R» и программного пакета — «Modeltime». Данное программное обеспечение предоставляет платформу для применения статистических моделей.

Замеры концентрации частиц мелкодисперсной пыли PM2.5 и метеорологические данные были объединены и преобразованы в почасовые временные ряды данных о концентрации частиц PM2.5, температуре и относительной влажности с помощью программного пакета «Modeltime». Данные временных рядов о концентрации PM2.5 представлены на рис. 1.

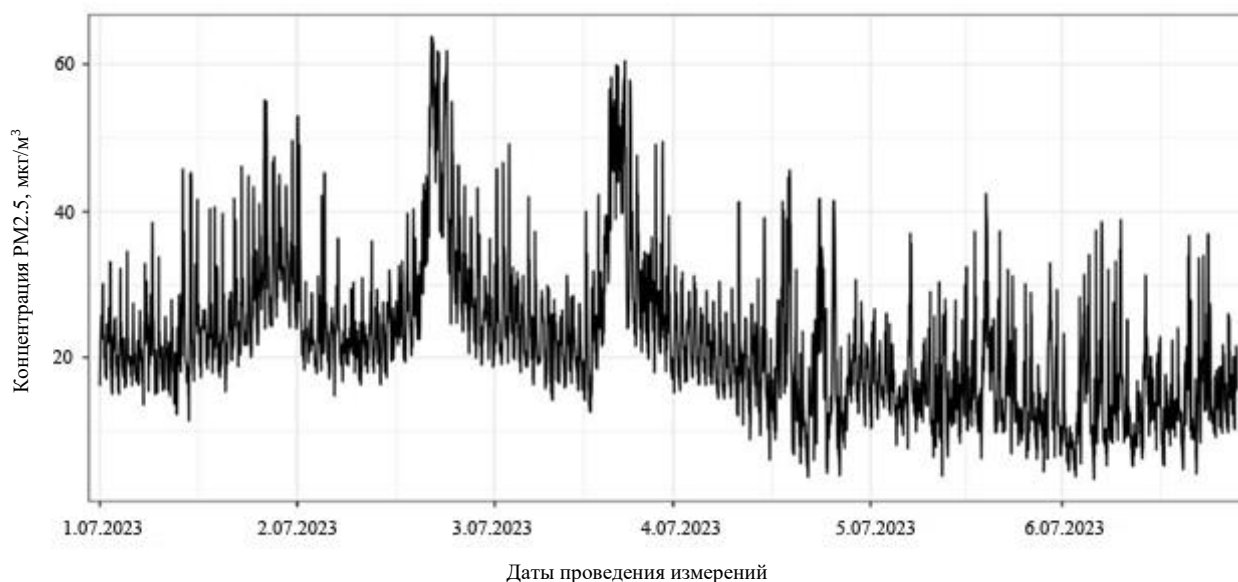


Рис. 1. Показатели концентрации PM2.5 в период исследования

Модели оценивались с использованием обучающего набора данных. Впоследствии данные, охватывающие обученные модели, были использованы для составления прогнозов на предыдущие 24 часа, т. е. для проверки модели. Для моделей прогнозирования были определены ограничения показателей, которые дают объективность оценки:

1. Средняя абсолютная ошибка (mean absolute error, MAE).
2. Средняя абсолютная масштабированная ошибка (mean absolute scaled error, MASE).
3. Среднеквадратичная ошибка (root mean squared logarithmic error, RMSE).

**Результаты исследования.** Был проведен корреляционный анализ посредством программы «Modeltime», что определяет взаимосвязь между концентрацией PM2.5 и метеорологическими переменными. Автокорреляция была проведена при помощи корреляции Пирсона (рис. 2) [17]. Определено, что между концентрацией частиц мелкодисперсной пыли PM2.5 с относительной влажностью и с температурой слабая отрицательная корреляция, коэффициенты — 0,107 и 0,048 соответственно.

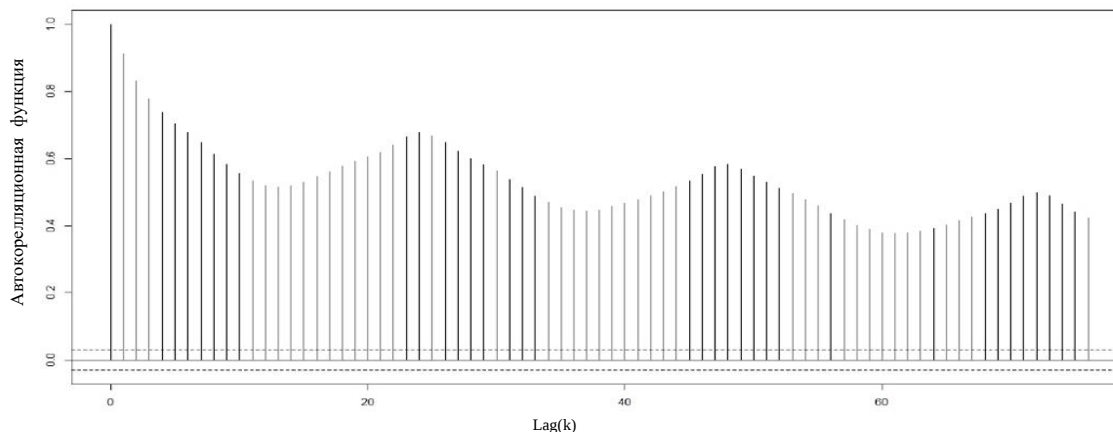


Рис. 2. Автокорреляция концентрации PM2.5

Между относительной влажностью и температурой существует сильная отрицательная корреляция (0,929). В целом все переменные были отрицательно коррелированы друг с другом.

Это наблюдение можно отнести к сезонным закономерностям, присутствующим в данных. Пики, как правило, находятся на расстоянии 24 часов друг от друга. По результатам автокорреляции были использованы одномерные модели, чтобы определить подходящие закономерности для включения в многомерные модели.

Были оценены четыре метода одномерного моделирования (ARIMA, EMA, Prophet и NNAR). Обученные модели использовались для создания 24-часовых прогнозов значений концентрации PM2.5 на строительной площадке. Прогнозы, полученные с помощью одномерных моделей, сравниваются с фактическими значениями концентрации PM2.5 на рис. 3. Кроме того, показатели прогнозной эффективности одномерных моделей обобщены и представлены в таблице 2.

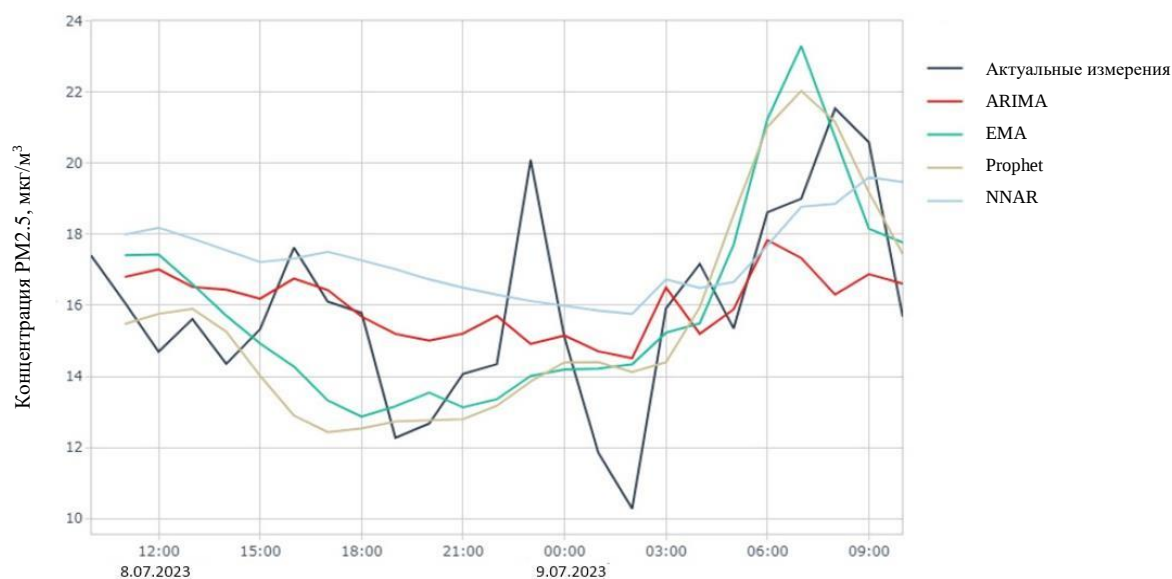


Рис. 3. Прогнозирование концентрации PM2.5 с помощью одномерных моделей

Таблица 2

Показатели ограничений при прогнозировании одномерных моделей

| № п/п | Наименование модели | MAE  | MASE | RMSE   |
|-------|---------------------|------|------|--------|
| 1     | ARIMA               | 1,82 | 0,83 | 2,3518 |
| 2     | Prophet             | 1,96 | 0,89 | 2,4895 |
| 3     | EMA                 | 2,08 | 0,95 | 2,4839 |
| 4     | NNAR                | 2,29 | 1,04 | 2,7129 |

Значения MAE, MASE и RMSE модели ARIMA составили 1,83, 0,83 и 2,3518 соответственно.

По результатам оценки прогнозирования средней концентрации PM<sub>2.5</sub> определено, что модель ARIMA превосходит по точности другие модели.

Следующим этапом стала оценка прогнозирования средней концентрации PM<sub>2.5</sub> при помощи многомерных моделей, которые учитывают взаимосвязи между независимыми и зависимыми переменными. В оценку входили данные в результате применения моделей Prophet, XGBoost, SVM, RF и NN.

Переменными для моделирования прогноза стали:

- данные измерений и результаты корреляционного анализа;
- метеорологические переменные, влияющие на прогнозирование значений концентрации PM<sub>2.5</sub> — влажность и температура.

Показатели, полученные посредством моделирования, сравнивались с натурными измерениями на строительной площадке (рис. 4). Оценка точности прогноза представлена в таблице 3.

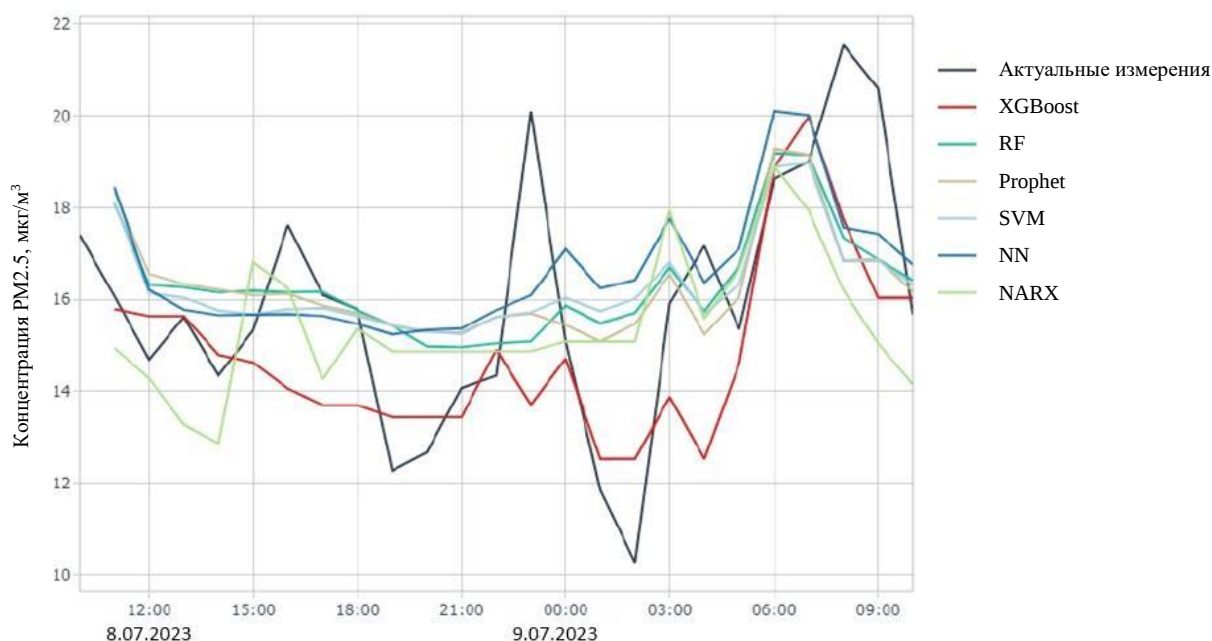
Рис. 4. Прогнозирование концентрации PM<sub>2.5</sub> с помощью многомерных моделей

Таблица 3

Показатели ограничений при прогнозировании многомерных моделей

| № п/п | Наименование модели | MAE  | MASE | RMSE   |
|-------|---------------------|------|------|--------|
| 1     | XGBoost             | 1,69 | 0,77 | 2,3809 |
| 2     | RF                  | 1,81 | 0,82 | 2,3730 |
| 3     | Prophet             | 1,82 | 0,83 | 2,3582 |
| 4     | SVM                 | 1,83 | 0,83 | 2,4226 |
| 5     | NN                  | 2,02 | 0,92 | 2,4825 |
| 6     | NARX                | 2,02 | 0,92 | 2,5920 |

По результатам оценки видно, что значения MAE, MASE и RMSE для XGBoost модели являются самыми низкими по сравнению с другими многомерными моделями — 1,69, 0,77 и 2,3809 соответственно.

Оценка точности прогноза одномерных и многомерных моделей определила, что многомерные модели XGBoost и RF давали более точные прогнозы, чем модель ARIMA, что говорит о необходимости включать в моделирование переменные (температура, временные параметры, влажность).

Ансамблевые методы используют комбинацию алгоритмов машинного обучения для получения более точных прогнозов. На завершающем этапе исследования три лучшие модели с точки зрения эффективности прогнозирования были включены для проверки ансамблевой модели. Тремя лучшими моделями стали XGBoost, RF и ARIMA. Трём типам ансамблевых моделей были присвоен вес на основе эффективных характеристик прогноза: XGBoost (вес — 3), RF (вес — 2) и ARIMA (вес — 1).

Данные и оценка прогноза ансамблевых моделей представлены на рис. 5 и в таблице 4.

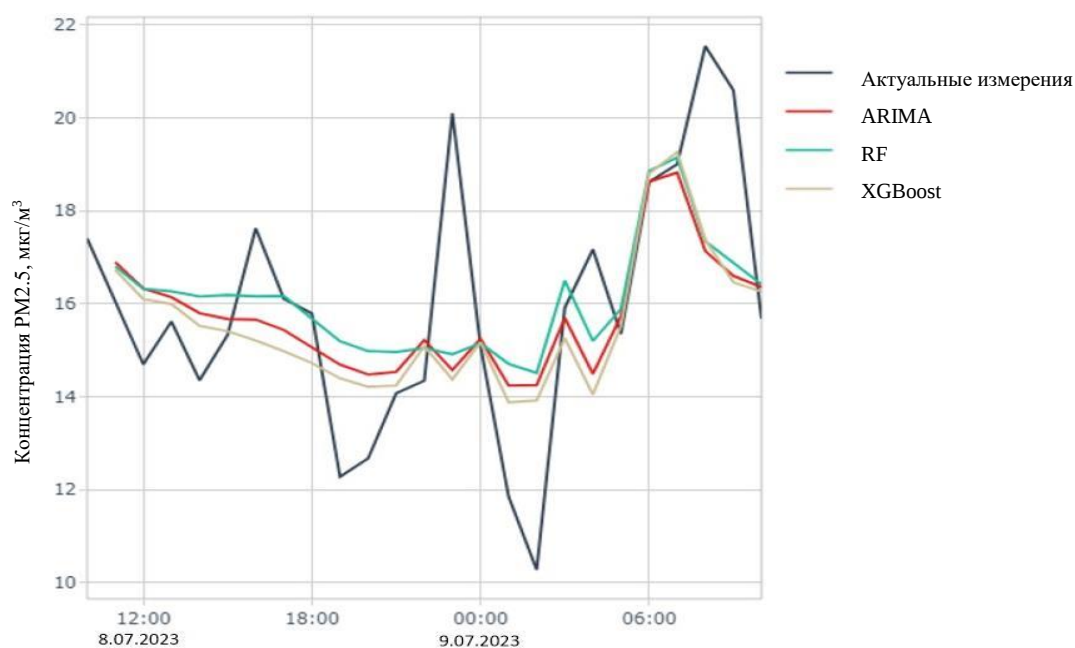


Рис. 5. Прогнозирование концентрации PM2.5 с помощью ансамблевой модели

Таблица 4

Показатели ограничений при прогнозировании ансамблевой модели

| № п/п | Наименование модели | MAE  | MASE | RMSE   |
|-------|---------------------|------|------|--------|
| 1     | XGBoost (3)         | 1,57 | 0,71 | 2,1876 |
| 2     | RF (2)              | 1,60 | 0,73 | 2,1985 |
| 3     | ARIMA (1)           | 1,61 | 0,73 | 2,1830 |

По результатам оценки видно, что модель XGBoost дает наименее точный прогноз.

**Обсуждение и заключение.** Применение ансамблевых моделей в целом дает более точный прогноз средней концентрации пыли PM2.5 на строительной площадке.

Надежные прогнозные модели могут быть полезными инструментами для понимания факторов, которые могут влиять на концентрацию PM2.5. В настоящем исследовании для прогнозирования концентрации PM2.5 использовались семь алгоритмов машинного обучения. В совокупности это исследование предоставляет доказательства эффективности использования методов комплексного моделирования для прогнозирования загрязнения воздуха.

Наиболее важным ограничением этого исследования является тот факт, что метеорологические факторы были единственными переменными, использованными для разработки модели. Несмотря на это ограничение, разработанные модели показали допустимую погрешность. Этот вывод указывает на то, что рассматриваемые модели надежны.

Предлагаемые модели могут быть использованы как для разработки проектных решений, беря за основы данные концентрации объектов аналогов, так и подрядными организациями для прогнозирования уровней концентрации PM2.5 уже в процессе строительного производства.

## Список литературы

1. Nagaraju K., Goyal S. Impact of construction activities on environment. *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*. 2023;10(1):17–24.
2. Menzelintseva N.V., Karapuzova N.Y., Mikhailovskaya Y.S., Redhwan A.M. Efficiency of standards compliance for PM(10) and PM(2,5). *International Review of Civil Engineering*. 2016;7(6):1–8. <https://doi.org/10.15866/irece.v7i6.9750>
3. Bogachev K., Mikhaleva M., Gorelov I. Algebraic multilevel method AMG: Comparison with the method BICGSTAB + ILU and its use in the method CPR. *Moscow University Mathematics Bulletin*. 2010;65:156–160. <https://doi.org/10.3103/S0027132210040042>
4. Rossello J.L., Font-Rosselló J., Frasser C.F., Moran A., Canals V., Roca M. Stochastic Computing Applications to Artificial Neural Networks. In book: *Design and Applications of Emerging Computer Systems* 2023. Pp. 303–330. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-42478-6\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42478-6_12)
5. Азаров В.Н., Кузьмичев А.А., Николенко Д.А., Васильев А.Н., Козловцева Е.Ю. Исследование дисперсного состава пыли городской среды. *Вестник МГСУ*. 2020;15(3):432–442. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.3.432-442>
6. Hasan M., Abedin M., Hájek P., Coussement K., Sultan N., Lucey B. A blending ensemble learning model for crude oil price forecasting. *Annals of Operations Research*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05810-8>
7. Amartey E.L.N., Onibudo O., Anamor S.K., Nkansah B.O. Dust Sources and Impact: A Review. *North American Academic Research*. 2022;5:17–37. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7068922>
8. Ali T.E., Syed Ali M.A.S.E., Sadiq M., Khanam T., Ullah I., Pongpiachan S. et al. Dust Effects and Human Health. In book: *Dust and Health*. 2023. Pp. 1–15. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21209-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21209-3_1)
9. Azarov V.N., Trokhimchyk M.K., Sidelnikova O.E. Research of dust content in the earthworks working area. *Procedia Engineering*. 2016;150:2008–2012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.282>
10. Стреляева А.Б., Калюжина Е.А. Экологическая безопасность при проведении земляных и строительно-отделочных работ. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2017;50(69):321–329. [https://vgasu.ru/upload/files/science/2017\\_50-69.pdf](https://vgasu.ru/upload/files/science/2017_50-69.pdf) (дата обращения 11.03.2024)
11. Сумеркин Ю.А., Теличенко В.И., Оценка экологической безопасности придомовых территорий жилых районов. *Промышленное и гражданское строительство*. 2017;6:75–79.
12. Ridwan M., Sadik K., Afendi F. Comparison of ARIMA and GRU Models for High-Frequency Time Series Forecasting. *Scientific Journal of Informatics*. 2024;10:389–400. <https://doi.org/10.15294/sji.v10i3.45965>
13. Peruvazhuthi K., Kumar D., Chithra N. Performance evaluation of univariate time-series techniques for forecasting monthly rainfall data. *Journal of Water and Climate Change*. 2022;13(12):4151–4176. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.107>
14. Afarini N., Hindarto D. Forecasting Airline Passenger Growth: Comparative Study LSTM VS Prophet VS Neural Prophet. *Sinkron*. 2024;9:505–513. <https://doi.org/10.33395/sinkron.v9i1.13237>
15. Ansari A., Singh P., Ruliana R., Pandey A., Gupta S. Comparison of ARIMA, SutteARIMA, Holt-Winters and NNAR Models to Predict Food Grain in India. *Forecasting*. 2023;5(1):138–152. <https://doi.org/10.3390/forecast5010006>
16. Mouhajir M., Nechba M., Sedjari Y. Computing the Vapnik Chervonenkis Dimension for Non-Discrete Settings. *arXiv*. 2023:2308.10041. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.10041>
17. Gnambis T. A Brief Note on the Standard Error of the Pearson Correlation. *Collabra Psychology*. 2023;9(1):1–8. <https://doi.org/10.1525/collabra.87615>

## References

1. Kaja N, Goyal S. Impact of Construction Activities on Environment. *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*. 2023;10(1):17–24. <https://doi.org/10.29121/ijetmr.v10.i1.2023.1277>
2. Menzelintseva NV, Karapuzova NY, Mikhailovskaya YS, Redhwan AM. Efficiency of Standards Compliance for PM(10) and PM(2,5). *International Review of Civil Engineering*. 2016;7(6):1–8. <https://doi.org/10.15866/irece.v7i6.9750>
3. Bogachev KYu, Mikhaleva MYu, Gorelov IG. Algebraic Multilevel Method AMG: Comparison with the Method BICGSTAB + ILU and Its Use in the Method CPR. *Moscow University Mathematics Bulletin*. 2010;65:156–160. <https://doi.org/10.3103/S0027132210040042>
4. Rossello JL, Font-Rosselló J, Frasser CF, Moran A, Canals V, Roca M. Stochastic Computing Applications to Artificial Neural Networks. In book: *Design and Applications of Emerging Computer Systems*. 2023. P. 303–330. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-42478-6\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42478-6_12)
5. Azarov VN, Kuzmichev AA, Nikolenko DA, Vasilev AN, Kozlovtsseva EYu. The Research of Dust Dispersed Composition of Urban Environment. *Vestnik MGSU*. 2020;15(3):432–442. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.3.432-442> (In Russ.).

6. Hasan M, Abedin M, Hájek P, Coussement K, Sultan N, Lucey B. A Blending Ensemble Learning Model for Crude Oil Price Forecasting. *Annals of Operations Research*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05810-8>
7. Amartey Ernest Nii Laryea, Onibudo Oluwasegun Oluwaseun, Anamor Samuel Kofi, Nkansah Benjamin Oduro. Dust Sources and Impact: A Review. *North American Academic Research*. 2022;5(9):17–37. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7068922>
8. Ali T, Shah Eqani SAMA, Sadiq M, Khanam T, Ullah I, Pongpiachan S, et al. Dust Effects and Human Health. In book: *Dust and Health. Emerging Contaminants and Associated Treatment Technologies*. Cham: Springer; 2023. P. 1–15. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21209-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21209-3_1)
9. Azarov VN, Trokhimchyk MK, Sidelnikova OE. Research of Dust Content in the Earthworks Working Area. *Procedia Engineering*. 2016;150:2008–2012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.282>
10. Strelyaeva AB, Kalyuzhina EA. Environmental Safety of Earthworks and Construction and Decoration Works. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2017;50(69):321–329. URL: [https://vgasu.ru/upload/files/science/2017\\_50-69.pdf](https://vgasu.ru/upload/files/science/2017_50-69.pdf) (accessed: 11.03.2024). (In Russ.).
11. Sumerkin YuA, Telichenko VI. Assessment of Ecological Safety of Territories Adjoining Residential Areas. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2017;(6):75–79. (In Russ.).
12. Ridwan M, Sadik K, Afendi FM. Comparison of ARIMA and GRU Models for High-Frequency Time Series Forecasting. *Scientific Journal of Informatics*. 2023;10(3):389–400. <https://doi.org/10.15294/sji.v10i3.45965>
13. Kabbilawsh P, Sathish Kumar D, Chithra NR. Performance Evaluation of Univariate Time-Series Techniques for Forecasting Monthly Rainfall Data. *Journal of Water and Climate Change*. 2022;13(12):4151–4176. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.107>
14. Afarini N., Hindarto D. Forecasting Airline Passenger Growth: Comparative Study LSTM VS Prophet VS Neural Prophet. *Sinkron*. 2024;9(1):505–513. <https://doi.org/10.33395/sinkron.v9i1.13237>
15. Ahmar AS, Singh PK, Ruliana R, Pandey AK, Gupta S. Comparison of ARIMA, SutteARIMA, and Holt-Winters, and NNAR Models to Predict Food Grain in India. *Forecasting*. 2023;5(1):138–152. <https://doi.org/10.3390/forecast5010006>
16. Nechba M, Mouhajir M, Yassine S. Computing the Vapnik Chervonenkis Dimension for Non-Discrete Settings. *arXiv*. 2023:2308.10041. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.10041>
17. Gnambs T. A Brief Note on the Standard Error of the Pearson Correlation. *Collabra Psychology*. 2023;9(1):87615. <https://doi.org/10.1525/collabra.87615>

Об авторе:

**Светлана Евгеньевна Манжилевская**, доцент кафедры организации строительства Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1000), [ScopusID](https://scopus.org/authors/details/smanzhilevskaya@yandex.ru), [smanzhilevskaya@yandex.ru](mailto:smanzhilevskaya@yandex.ru)

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 30.01.2024

Поступила после рецензирования 08.02.2024

Принята к публикации 09.02.2024

About the Author:

**Svetlana E. Manzhilevskaya**, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Construction Management Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ScopusID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1000), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1000), [smanzhilevskaya@yandex.ru](mailto:smanzhilevskaya@yandex.ru)

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

The author has read and approved the final manuscript.

Received 30.01.2024

Revised 08.02.2024

Accepted 09.02.2024