

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





ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий

Рецензируемый научно-практический журнал

eISSN 2949–1835

Издается с 2022 года

Периодичность – 4 выпуска в год

DOI: 10.23947/2949–1835

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

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

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

*Индексация
и архивация*

РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, Internet Archive

*Наименование
органа,
зарегистрировавшего
издание*

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 83923 от 16 сентября 2022 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

*Учредитель
и издатель*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)

*Адрес учредителя
и издателя*

344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

E-mail

sovtrendstr@gmail.com

Телефон

+7 (863) 2–738–372

Сайт

<http://www.stsg-donstu.ru/>

*Дата выхода
№1, 2025 в свет*

31.03.2025





Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning

Peer-reviewed scientific and practical journal

eISSN 2949–1835

Published since 2022

Periodicity 4 issues per year

DOI: 10.23947/2949–1835

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

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

The journal publishes articles in the following fields of science:

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

*Indexing
and Archiving*

RISC, CyberLeninka, CrossRef, Internet Archive

*Name of the Body
that Registered the
Publication*

Extract from the Register of Registered Mass Media ЭЛ № ФС 77 – 83923 dated September 16, 2022, issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media

*Founder
and Publisher*

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
Don State Technical University (DSTU)

*Address
of the Founder
and Publisher*

1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation

E-mail

sovtrendstr@gmail.com

Telephone

+7 (863) 2–738–372

Website

<http://www.stsg-donstu.ru/>

*Date of Publication
No.1,2025*

31.03.2025



Редакционная коллегия

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Выпускающий редактор

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

Ответственный секретарь

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

Беккиев Мухтар Юсубович, доктор технических наук, профессор, директор Высогогорного 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)

Товмасын Саркис Арисаткакесович, доктор архитектурных наук, доцент, член Палаты архитекторов Армении (Ереван, Республика Армения)

Editorial Board

Editor-in-Chief

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

Deputy Chief Editor

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

Executive Editor

Svetlana S. Studennikova, Head of the Publication Activity Department, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Executive Secretary

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

- Маилян Л.Р., Иванова Т.А., Андреева Н.В., Маггеррамова И.А.* Особенности конструктивных решений объемных блоков из легкого фиброторкретбетона с несъемной опалубкой 7
- Розанцева Н.В., Дроздов А.Д.* Современное технологическое решение перекрытия цилиндрического свода нефа при строительстве храма святителя Тихона в Санкт-Петербурге. 15

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

- Халюшев А.К., Колесниченко Е.А.* Оптимизация лакокрасочного материала для покрытия древесины с добавкой металлического катализатора..... 26
- Вержбовский Г.Б., Залиев А.В.* Прогнозирование свойств многокомпонентных минеральнополимерных композитных материалов 35
- Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Шуть В.В.* Контракционная усадка бетонов из высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей 41

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

- Гайджуров П.П., Исхакова Э.Р., Савельева Н.А.* Примеры тестирования программы моделирования длительного деформирования предварительно напряженных железобетонных балок 54

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

- Лысова Е.П., Парамонова О.Н.* Разработка структуры жизненного цикла системы отопления строительного объекта 68
- Самарская Н.С.* Анализ жизненного цикла объектов строительства на примере ветроэнергетических сооружений 76

CONTENTS

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES

- Mailyan LR, Ivanova TA, Andreeva NV, Maharramova IA** Design Features of Volumetric Blocks Made of Lightweight Fibrotorcrete with Non-removable Formwork 7
- Rozantseva NV, Drozdov AD** Modern Technological Solution for Covering the Cylindrical Vault of the Nave during the Construction of St. Tikhon's Church in St. Petersburg 15

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

- Khalyushev AK, Kolesnichenko EA.** Optimization of the Paintwork Material Modified by Metal Catalyser Additive 26
- Verzhbovsky GB, Zaliy AV** Forecasting the Properties of Multicomponent Mineral Polymer Composite Materials 35
- Nesvetaev GV, Koryanova YuI, Shut VV.** Contractional Shrinkage of Concretes From Highly Mobile and Selfsealing Mixtures 41

CONSTRUCTION MECHANICS

- Gaijurov PP, Iskhakova ER, Savelyeva NA.** Examples of Testing a Program for Modeling Long-Term Deformation of Prestressed Reinforced Concrete Beams 54

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES

- Lysova EP, Paramonova ON.** Development of the Structure of the Life Cycle of the Heating System of a Construction Facility 68
- Samarskaya NS.** Life Cycle Analysis of Construction Facilities Using the Example of Wind Power Facilities ... 76

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 692

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-7-14>

Особенности конструктивных решений объемных блоков из легкого фиброторкретбетона с несъемной опалубкой



EDN: BLPQOV

Л.Р. Маилян¹ , Т.А. Иванова² , Н.В. Андреева³ , И.А. Магеррамова³

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

²Кубанский государственный аграрный университет им. Трубилина, г. Краснодар, Российская Федерация

³Балаковский инженерно-технологический институт, г. Балаково, Российская Федерация

✉ Lrm@aanet.ru

Аннотация

Введение. В данной статье приводятся конструктивные особенности объемных блоков, изготовленных из фиброторкретбетона с использованием опалубки из влагостойкого гипсокартона. Также изложены основные принципы, которые описывают характеристики конструкции с формообразованием данных объемных блоков, реализованных с помощью технологии торкретирования. Это особенно актуально для мало- и среднеэтажного строительства.

Материалы и методы. Для формообразования конструкции фиброторкретбетонных объемных блоков с опалубкой на основе влагостойкого гипсокартона (далее ГКЛВ) предлагается использовать систему базовых принципов, позволяющих повысить энергоэффективность, снизить затраты и способствующих утилизации безопасных отходов промышленности.

Применение базовых принципов, положенных в основу разработки объемного блока из легкого фиброторкретбетона с несъемной опалубкой, позволило осуществить системный подход к конструктивному решению.

Результаты исследования. Внедрение эффективного инновационного метода позволило разработать железобетонный объемный блок с использованием технологии торкретирования. Этот подход позволил уменьшить затраты труда, повысить прочностные характеристики и обеспечить возможность производства объемного блока как в заводских условиях, так и непосредственно на строительной площадке.

Обсуждение и заключение. Созданная авторами многослойная структура объемных блоков нового поколения из фиброторкретбетона основывается на ключевых принципах, которые подчеркивают эффективность их использования при строительстве зданий малой и средней этажности.

Ключевые слова: фиброторкретбетонные объемные блоки, несъемная гипсокартонная опалубка, технология мокрого торкретирования, базовые принципы формообразования

Для цитирования. Маилян Л.Р., Иванова Т.А., Андреева Н.В., Магеррамова И.А. Особенности конструктивных решений объемных блоков из легкого фиброторкретбетона с несъемной опалубкой. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(1):7–14. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-7-14>

Design Features of Volumetric Blocks Made of Lightweight Fibrotorcrete with Non-removable Formwork

Levon R. Mailyan¹ , Tatiana A. Ivanova² , Natalia V. Andreeva³ , Inna A. Magerramova³ 

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

²Cuban State Agrarian University named after Trublina, Krasnodar, Russian Federation

³Balakovo Institute of Engineering and Technology, Balakovo, Russian Federation

✉ Lrm@aaanet.ru

Abstract

Introduction. This article analyzes the design features of volumetric blocks made of fibrobast concrete using a formwork made of moisture-resistant drywall. The basic principles that describe the characteristics of the design with the shaping of these volumetric blocks implemented using shotcrete technology are also outlined. This is especially true for low- and medium-rise buildings.

Materials and methods. To form the construction of fiber-reinforced concrete volumetric blocks with formwork based on moisture-resistant drywall (hereinafter referred to as GCLV), it is suggested that a system of basic principles is used that increases energy efficiency, reduces costs, and promotes the disposal of safe industrial waste.

The application of the basic principles underlying the development of a volumetric block made of lightweight fibrotorcrete with non-removable formwork enabled a systematic approach to a constructive solution to be implemented.

Results. The introduction of an effective innovative method made it possible to develop a reinforced concrete volumetric block created using shotcrete technology. This approach has made it possible to reduce labor costs, increase strength characteristics, and enable the production of bulk blocks both in the factory and directly on the construction site.

Discussion and Conclusion. The multilayer structure of new-generation bulk blocks made of fibrotorcrete created by the authors is based on the key principles that emphasize the effectiveness of their use in the construction of buildings with small and medium storeys.

Keywords: fibrobast concrete volumetric blocks; non-removable gypsum-cardboard formwork; wet shotcrete technology; basic principles of shaping

For citation. Mailyan LR, Ivanova TA, Andreeva NV, Maharramova IA Design Features of Volumetric Blocks Made of Lightweight Fibrotorcrete with Non-removable Formwork. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(1):7–14. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-7-14>

Введение. Современные технологии в строительной отрасли пользуются большим спросом, поскольку для увеличения объемов возведения зданий необходимо снижение затрат на строительство и уменьшение типов производства работ. Ключевым моментом выступает повышенная энергоэффективность проектных решений при одновременном уменьшении материально-энергетических расходов [12].

Инновационные модульные конструкции в настоящее время представлены объемно-модульными зданиями. В отечественной практике стратегический подход к развитию домостроительных комбинатов фокусируется на проектировании быстросборных модульных объектов, что содействует снижению стоимости конечного жилья и уменьшению сроков его возведения [4–11].

Целью данной работы является создание системы проектирования и изготовления объемных блоков, учитывающей особенности и специфику данной отрасли. При разработке таких систем необходимо опираться на принципы, которые учитывают достоинства и эффективность применения объемных блоков в сфере строительства. Важно учитывать, что архитектурные и инженерные решения должны соответствовать уникальным требованиям и условиям, связанным с использованием этих материалов. Эффективное проектирование требует комплексного подхода, учитывающего не только технологические аспекты, но и экономические и экологические факторы. Правильное внедрение методов и технологий поможет повысить качество и снизить затраты на строительство, что в конечном итоге приведет к улучшению общих показателей проектирования и производства. Поэтому ключевым моментом становится гармонизация всех этапов создания, начиная от идеи и заканчивая фактическим строительством, что обеспечит максимальную эффективность и долговечность конечного продукта в строительной практике.

Материалы и методы. Оптимизацию проектирования зданий с использованием объемно-блочного домостроения можно осуществить с внедрением системы ключевых базовых принципов (рис. 1), которые составляют ее основу. Эти принципы помогают структурировать процесс проектирования и учесть все важные аспекты, что в свою очередь повышает общую эффективность строительства. Внедрение таких стандартов позволяет не только

минимизировать временные и финансовые затраты, но и улучшить качество конечного продукта. Предложенная система включает в себя различные элементы, направленные на систематизацию проектных работ и интеграцию современных технологий. В результате, реализуя указанные принципы, возможно достичь гармоничного сочетания функциональности и эстетики, что соответствует современным требованиям к возведению зданий. Это важно для обеспечения долговечности и устойчивости конструкций в будущем, а также для удовлетворения потребностей пользователей и заказчиков, что делает процесс проектирования более эффективным и адаптированным к современным условиям.



Рис. 1. Основные базовые принципы объемно-блочного домостроения

Принцип внедрения *ресурсосберегающих технологий* предполагает использование региональных ресурсов и материалов, полученных из безопасно переработанных промышленных отходов. Такой подход позволяет не только оптимизировать затраты на производство строительных конструкций, но и содействовать утилизации отходов различных производств.

Принцип ресурсосбережения направлен на реализацию государственной «Стратегии развития промышленного сектора в части обработки, обезвреживания и ликвидации отходов производства и потребления до 2030 года» [1].

Создание монолитной пространственной конструкции объемного блока по технологии мокрого торкретирования основывается на *принципе формообразования*. Характерной особенностью данного метода является использование несъемной гипсокартонной односторонней опалубки, что оптимизирует технологический процесс изготовления объемных блоков за счет сокращения трудозатрат.

Формирование функциональной части с дальнейшей компоновкой объемных блоков в различные *объемно-планировочные решения* выполняет *принцип функциональности*.

Принцип мобильности предполагает создание производства объемных блоков не только на заводе, но и непосредственно на строительном объекте. Применение этого подхода, основанного на технологии торкретирования, позволит сократить расходы на перевозку громоздких конструкций к месту строительства и расширить географические рамки объемно-блочного домостроения. Такой метод значительно облегчит процесс строительства в удаленных или труднодоступных районах, где традиционные способы поставки могут оказаться затруднительными и дорогостоящими. В результате использование мобильного производства станет ключевым фактором для повышения эффективности и экономичности в сфере строительства, открывая новые горизонты для реализации объемно-блочных проектов. Это не только ускорит процесс возведения зданий, но и сделает его более доступным для различных регионов, способствуя развитию инфраструктуры в различных уголках страны.

Расширение области использования объемных блоков, созданных при помощи технологии мокрого торкретирования, заключается в том, что их можно производить как на организованном производстве, так и непосредственно на месте строительства. Это подчеркивает особенность принципа мобильности.

Существующие конструктивные решения объемных блоков не эффективны в полной мере, так как не отвечают базовым принципам современного объемно-блочного домостроения, соответствующего стратегии развития государства в области ресурсосбережения. При этом существующие формы объемных блоков не дают возможности расширить композиционное и объемно-планировочное решение таких зданий. Традиционные подходы к

проектированию и технологии их строительства не обеспечивают широкое применение объемно-блочного домостроения в строительной отрасли. Поэтому инновационным подходом для реализации базовых принципов является применение технологии мокрого торкретирования для объемных блоков из легкого фиброторкретбетона.

Предлагаемый блок-коллап из легкого фиброторкретбетона является многослойной конструкцией. Такой блок можно использовать для возведения зданий малой и средней этажности. В отличие от классической заводской технологии изготовления здесь используется метод мокрого торкретирования, что предполагает вывести строительство объемных блоков на новый уровень, так как они будут производиться непосредственно на строительной площадке. Это позволит не только расширить географию строительства, но и разработать новую номенклатуру изделий данного типа, а также снизить затраты на транспортировку готовых заводских изделий.

В основе предлагаемого метода проектирования лежит принцип формообразования, предполагающий одновременное формирование конструкции в условиях проектирования и производства. Данный подход позволяет создавать целостный монолитный пространственный элемент.

Результаты исследования. Основным принципом проектирования пространственных блоков из фиброторкретбетона служит концепция формообразования, направленная на создание нового пространства с функциональными зонами.

Запатентованная конструкция объемного блока включает в себя: поперечные стены, оконные и дверные проемы, П-образную продольную несущую конструкцию. Общий вид объемного блока типа «коллап» представлен на рис. 2 [2].

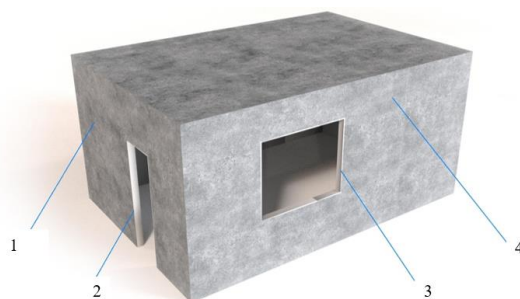


Рис. 2. Конструктивное решение фиброторкретбетонного объемного блока:

1 — поперечная стена; 2 — дверной проем; 3 — оконный проем; 4 — П-образная продольная несущая конструкция [2]

Фиброторкретбетонный объемный блок, смоделированный по основным базовым принципам (рис. 1), характеризуется рядом отличительных особенностей:

- односторонняя гипсокартонная опалубка, которая выступает в качестве внутренней облицовки;
- использование ресурсосберегающих составов бетона с отходами промышленности;
- минимизация технологических этапов в рамках организованного производства способом мокрого торкретирования на стройплощадке.

Высокая эффективность конструктивного решения с использованием легкого фибробетона на основе отходов промышленности для изготовления несущих элементов доказана экспериментальными работами авторов [3]. Подтверждена высокая эффективность их применения, в том числе и для фиброторкретбетонных объемных блоков. Это позволяет на практике реализовать принцип ресурсосбережения в рамках стратегии развития государства.

Особенностью конструктивного решения является применение в качестве несущих стен объемных блоков многослойной конструкции (рис. 3). Величина несущего слоя варьируется в зависимости от региона строительства и энергоэффективности принятого конструктивного решения.

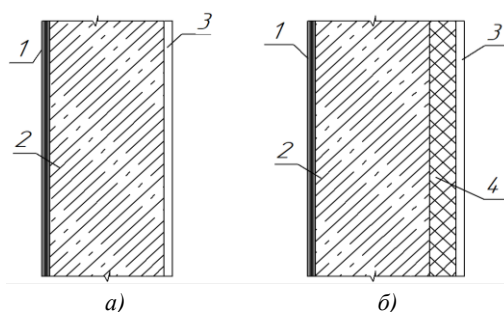


Рис. 3. Несущая конструкция разработанного объемного блока:

а — однослойная, б — двухслойная;

1 — несъемная гипсокартонная опалубка; 2 — несущий фиброторкретбетонный слой;

3 — торкрет-штукатурка; 4 — слой плитного утеплителя

Предложенное проектное решение объемного блока конфигурации по типу «колпак» расширяет возможности планировочных решений для подобных зданий. В частности, предлагается объемный блок-колпак эркерного типа из фиброторкретбетона (рис. 4, а).

Проектное решение конфигурации по типу «колпак» объемного блока нового поколения расширяет возможности планировочных решений для подобных зданий. В статье рассматривается использование фиброторкретбетона для создания объемного блок-колпака эркерного типа, что позволяет улучшить архитектурные и функциональные характеристики зданий. Также учтена эффективность применения данного материала в строительстве и его влияние на устойчивость и долговечность конструкций.

Новый тип объемного железобетонного блока нового поколения (рис. 4, б) — это П-образная несущая конструкция с поперечными стенами, способными воспринимать нагрузки без дополнительной опоры. В этих стенах предусмотрены проемы для окон и дверей. Блок изготовлен из легкого армированного фиброторкретбетона и является монолитным пространственным элементом с пятью гранями. Для увеличения несущей способности зоны сопряжения несущих рам блока по периметру армированы дополнительными сетками. Жёсткость элементов стен с проемами регламентирована их размерами по ширине с учетом угловых участков стен.

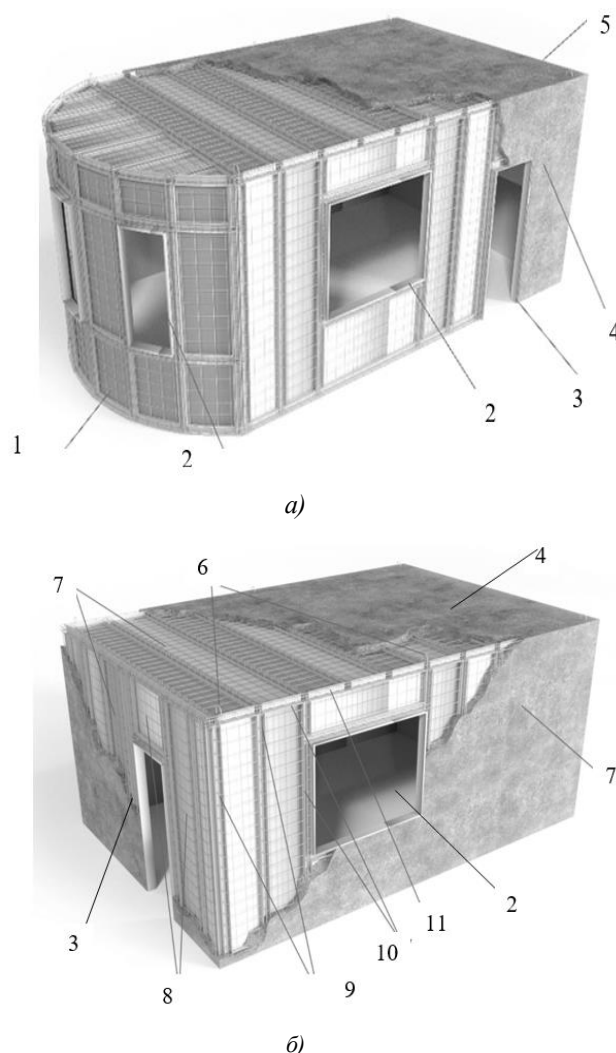


Рис. 4. Конструктивное решение:

а — объемный блок с эркером; б — прямоугольный объемный блок;

- 1 — эркер; 2 — оконный проем; 3 — дверной проем; 4 — П-образная продольная несущая конструкция; 5 — поперечная стена; 6 — монтажные петли; 7 — слой фиброторкретбетона; 8 — арматурная сетка; 9 — рамный арматурный каркас; 10 — металлический профиль; 11 — обвязочный арматурный каркас [2]

Одним из главных преимуществ предложенной конструкции является возможность использования несъемной опалубки из высокопрочного влагостойкого гипсокартона, которая является односторонней. Это позволяет получать ровные поверхности, пригодные для различных отделочных работ.

Влагостойкий гипсокартон согласно нормативной документации способен выдерживать влажность воздуха до 85 %, что в свою очередь допустимо для применения в гражданских зданиях с относительной влажностью воздуха до 60 %. При торкретировании мокрой смеси на опалубку из гипсокартона происходит моментальное сцепление и образование контактного слоя, обеспечивающего целостность опалубки.

Использование гипсокартонной опалубки способствует сокращению трудозатрат, поскольку она предоставляет законченную внутреннюю отделку пространства.

Обсуждение и заключение. Технология торкретирования в составе основных принципов по строительству объемных блоков нового поколения дает возможность использовать нестандартные объемно-планировочные решения и изменять технологическую схему производства таких конструкций в условиях стройплощадки. Включение в состав блоков допустимых видов отходов производства, повышение прочности исходных материалов и получение экономического эффекта от замены традиционных материалов с учетом географических особенностей строительства способствует не только снижению стоимости конструкций, но и ускорению процесса утилизации отходов. Это соответствует принципам рационального природопользования и минимизации негативного воздействия на окружающую среду [1]. Возможность изготовления объемных блоков на строительной площадке позволит сделать более массовым объемно-блочное домостроение.

Список литературы/References

1. *Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года.* Распоряжение Правительства Российской Федерации от 25 января 2018 г. № 84-р.

Industrial Development Strategy for Processing, Disposal and Neutralization of Industrial and Consumer Waste for the Period up to 2030. Decree of the Government of the Russian Federation No. 84-r dated January 25, 2018. (In Russ.).

2. Голова Т.А., Маилян Н.В., Андреева Н.В. Железобетонный объемный блок и способ его изготовления. Патент РФ, № 2781969 С1. 2022.

Golova TA, Mailyan NV, Andreeva NV Reinforced Concrete Volumetric Block and the Method of its Production. Patent of the Russian Federation, No. 2781969 C1. 2022. (In Russ.).

3. Голова Т.А., Андреева Н.В., Маггеррамова И.А. Технология производства неавтоклавных пенобетонов, дисперсно-армированных модифицированными волокнами. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета.* 2020;1(78):126–135.

Golova TA, Andreeva NV, Magerramova IA Production Technology of Non-autoclaved Foam Concrete Dispersed and Reinforced with Modified Fibers. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering.* 2020;1(78):126–135. (In Russ.).

4. Абрамян С.Г., Улановский И.А. Модульное строительство и возможность применения модульных конструкций при надстройке зданий. *Инженерный вестник Дона.* 2018;4(51). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modulnoe-stroitelstvo-i-vozmozhnost-primeneniya-modulnyh-konstruktsiy-pri-nadstroyke-zdaniy/> (дата обращения 19.02.2025).

Abramyan SG, Ulanovsky IA Modular Construction and the Possibility of Using Modular Structures in Building Superstructure. *Don Engineering Bulletin.* 2018;4(51). (In Russ.) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modulnoe-stroitelstvo-i-vozmozhnost-primeneniya-modulnyh-konstruktsiy-pri-nadstroyke-zdaniy/> (accessed: 19.02.2025).

5. Абрамян С.Г., Честнова А.В., Оганесян О.В., Петросян Р.О., Черешнев Л.И., Арутюнян Л.А. Технологичность трансформирующихся и нетрансформирующихся объемных блок-модулей при возведении строительных систем. *Инженерный вестник Дона.* 2023;10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologichnost-transformiruyuschihsya-i-netransformiruyuschihsya-obemnyh-blok-moduley-pri-vozvedenii-stroitelnyh-sistem> (дата обращения 19.02.2025).

Abrahamyan SG, Chestnova AV, Oganessian OV, Petrosyan RO, Chereshev LI, Harutyunyan LA Manufacturability of Transforming and Non-transforming Volumetric Block Modules in the Construction of Building Systems. *Don Engineering Bulletin.* 2023;10. (In Russ.) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologichnost-transformiruyuschihsya-i-netransformiruyuschihsya-obemnyh-blok-moduley-pri-vozvedenii-stroitelnyh-sistem> (accessed: 19.02.2025).

6. Макарычев К. В., Воронин И.С., Тарасова К.Г. Перспективы технологии объемно-блочного строительства. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук.* 2023;12–3(87):118–121. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2023-12-3-118-121>

Makarychev KV, Voronin IS, Tarasova KG Prospects of the Technology of Volumetric Block Construction. *International Journal of Humanities and Natural Sciences.* 2023;12–3(87):118-121. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2023-12-3-118-121>

7. Ferdous W, Yu B, Ngo T, Manalo A, Mendis P New Advancements, Challenges and Opportunities of Multi-storey Modular Buildings — A State-of-the-art Review. *Engineering Structures*. 2019;183:883–893. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.061>
8. Thai H, Ngo T, Uy B A Review on Modular Construction for High-rise Buildings. *Structures*. 2020;28:1265–1290. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.070>
9. Ализаде С.А. Объемно-блочное домостроение: опыт и перспективы развития. *Архитектура и дизайн*. 2017;1:38–52. <https://doi.org/10.7256/2585-7789.2017.1.23079>
- Alizadeh SA Volumetric and Block Housing Construction: Experience and Development Prospects. *Architecture and Design*. 2017;1:38–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.7256/2585-7789.2017.1.23079>
10. Белозерский А.М. Массовое строительство в России из объемных блоков. *Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство*. 2016;9:280–287.
- Belozersky AM Mass Construction from Bulk Blocks in Russia. *Introduction of Modern Structures and Advanced Technologies in the Railway Industry*. 2016;9:280–287. (In Russ.).
11. Кузьмина Т.К., Аветисян Р.Т., Мирзаханова А.Т. Особенности строительства зданий из крупногабаритных модулей (часть 1). *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022;5:95–101. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-5-95-102>
- Kuzmina TK, Avetisyan RT, Mirzakhanova AT Features of Building Construction from Large Modules (Part 1). *Proceedings of Tula State University. Technical Sciences*. 2022;5:95–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-5-95-102>
12. Пахомова М.А., Храмцов А.Б. Малоэтажное строительство в России и за рубежом: обзор практик. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2022;3:20–31. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2022-3-20-31>
- Pakhomova MA, Khramtsov AB Low-rise Construction in Russia and Abroad: a Review of Practices. *Architecture, Construction, Transport*. 2022;3:20-31. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2022-3-20-31>

Об авторах:

Левон Рафаэлович Маилян, доктор технических наук, заслуженный строитель РФ, академик РААСН, профессор кафедры строительства уникальных зданий и сооружений Донского государственного технического университета, (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9146-1000), Lrm@aaanet.ru

Татьяна Александровна Иванова, кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры Кубанского государственного аграрного университета им. Трубилина (350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, 13), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9146-1000), emelyanova-tanya@mail.ru

Наталья Викторовна Андреева, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства Балаковского инженерно-технологического института, (413800, Российская Федерация, Саратовская обл., г. Балаково, ул. Чапаева, 140), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9146-1000), anreevane@list.ru

Инна Александровна Маггеррамова, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства Балаковского инженерно-технологического института, (413800, РФ, Саратовская обл., г. Балаково, ул. Чапаева, 140), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9146-1000), in-namag82@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Л.Р. Маилян: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, корректировка выводов.

Т.А. Голова: научное руководство, анализ результатов исследований, проведение расчетов, формирование заключения и выводов.

Н.В. Андреева: формулировка выводов, подготовка текста и графических материалов.

И.А. Маггеррамова: поиск, анализ и систематизация данных, формирование списка литературы.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

Levon R. Mailyan, Dr.Sci. (Eng.), Honored Builder of the Russian Federation, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor of the Department of Construction of University Buildings and Structures, Don State Technical University, (344003, Russian Federation, Rostov-on-Don, 1 Gagarin Sq.), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9146-1000), Lrm@aaanet.ru

Tatiana A. Ivanova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Architecture at the Kuban State Agrarian University (13 Kalinina St., Krasnodar, 350044, Russian Federation), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9146-1000), emelyanova-tanya@mail.ru

Natalia V. Andreeva, Cand.Sci. (Eng.), Senior Lecturer, Department of Industrial and Civil Engineering, Balakovo Institute of Engineering and Technology, (140 Chapaeva St., Balakovo, Saratov Region, 413800, Russian Federation), [ORCID](#), anreevane@list.ru

Inna A. Magerramova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering at the Balakovo Institute of Engineering and Technology, (140 Chapaeva St., Balakovo, Saratov Region, 413800, Russian Federation), [ORCID](#), in-namag82@mail.ru

Claimed Contributorship:

LR Mailyan: formation of the basic concept, goals and objectives of the study, scientific supervision, correction of the conclusions.

TA Golova: scientific supervision analysis of the research results, performing the calculations, formation of the conclusions and conclusions.

NV Andreeva: formulation of the conclusions, preparation of the manuscript and graphic materials.

IA Magerramova: search, analysis and systematization of the data, formation of the reference list.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 24.02.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 03.03.2025

Принята к публикации / Accepted 10.03.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 624.072.22

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-15-25>

Современное технологическое решение перекрытия цилиндрического свода нефа при строительстве храма святителя Тихона в Санкт-Петербурге

Н.В. Розанцева , А.Д. Дроздов 

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

✉ nrozanceva@lan.spbgasu.ru



EDN: KJZRYO

Аннотация

Введение. Статья посвящена истории разработки и воплощения проекта строительства перекрытия нефа храма святителя Тихона, патриарха Московского и всея России, на улице Коммуны, дом № 17а, в г. Санкт-Петербурге. Храм строился и строится по заказу местной религиозной организации на пожертвования неравнодушных и прихожан. В первоначальном проекте предполагалось возведение арочного цилиндрического свода над нефом из каменной кладки, что требует сложных инженерных решений и значительных затрат труда и средств. К октябрю 2024 года стало понятно, что строительство традиционным способом не позволит освятить храм, выполнив этот проект в сжатые сроки и при ограничении средств. Целью исследования была, разработка альтернативного решения устройству арочной кирпичной кладки с затяжками по короткой стороне нефа храма.

Материалы и методы. После рассмотрения вариантов принято решение использовать арочные балки в качестве ребер жесткости, которые должны были взять на себя часть нагрузки, в том числе и от распора. Выдвинуто предположение о возможности замены преднатяженной арматуры верхнего ряда на комбинированную, позволяющее оптимизировать конструкцию арки. Для определения требуемых параметров произведен сбор нагрузок, и расчет напряженного состояния арки в том числе и в программе SCAD с учетом ее работы на стадии эксплуатации. Снижение зон напряжений достигнуто дополнительным армированием стержнями и хомутами.

Результаты исследования. Проведённые исследования позволили уменьшить расходы сохраняя конструктивную жесткость арки. В соответствии с расчетами разработаны опалубочные чертежи. Процесс переноса параметров с чертежей в реальные размеры и бетонирование был тщательно организован, использовались современные инструменты для контроля качества на каждом этапе. Монтаж готовых железобетонных конструкций оказался более технологичным и быстрым по сравнению с монолитной системой.

Обсуждение и заключение. Проект кирпичного свода был успешно выполнен с минимальными отклонениями. Площадь опирания конструкций и высота подъема арки полностью соответствовали расчетным значениям. Было установлено, что принятое решение позволило значительно сократить нагрузку на основание, повысить общую конструктивную жесткость, при этом освободив пространство под куполом от затяжек, снизить продолжительность строительства, что позволило уложиться в заданные сроки, и уменьшить стоимость работ.

Научная новизна применения арок со смешанной системой армирования заключается в простоте конструкции, отсутствии необходимости увеличения сечения элементов ферм и возможности использования комбинированной арматуры.

Ключевые слова: неф, цилиндрический свод, промежуточные опоры, арочная балка, комбинированная арматура

Благодарности. Авторы благодарят генерального директора ЖБИ-8 за предоставление своих мощностей и изготовление арок для храма святителя Тихона, а также авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Розанцева Н.В., Дроздов А.Д. Современное технологическое решение перекрытия цилиндрического свода нефа при строительстве храма святителя Тихона в Санкт-Петербурге. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(1):15–25. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-15-25>

© Розанцева Н.В., Дроздов А.Д., 2025

Modern Technological Solution for Covering the Cylindrical Vault of the Nave during the Construction of the Church of St. Tikhon in St. Petersburg

Nadezhda V. Rozantseva , Alexander D. Drozdov 

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

 nrozanceva@lan.spbgasu.ru

Abstract

Introduction. The article is dedicated to the history of the development and implementation of the project for the construction of the ceiling of the nave of the church of St. Tikhon, Patriarch of Moscow and All Russia, at 17 Commune Street, St. Petersburg. The church was built and is under construction on an order of a local religious organization with donations from whoever cares to do this and church visitors. The original project envisaged the construction of an arched cylindrical vault above a masonry nave, which called for complex engineering solutions and considerable labor and financial costs. By October 2024, it became clear that construction in the traditional way would not enable the church to be consecrated, having completed this project in a short time and with limited funds. The aim of the study was to develop an alternative solution to the construction of arched brickwork with puffs on the short side of the nave of the temple.

Materials and Methods. Having considered the options available, we decided to make use of arched beams as stiffeners, which were supposed to take on some of the load, including from the strut. It was assumed that it was possible to replace the prestressed reinforcement of the upper row with a combined one making it possible to optimize the arch design. In order to identify the required parameters, loads were collected and the stress strain of the arch was calculated, including in the SCAD program provided it was at the operational stage. The reduction of stress zones is achieved by additional reinforcement with rods and clamps.

Results. The research enabled us to reduce costs while maintaining the structural rigidity of the arch. In accordance with the calculations, the formwork drawings have been developed. The process of transferring parameters from drawings to actual dimensions and concreting was meticulously organized by means of modern quality control tools at each stage. The installation of ready-made reinforced concrete structures turned out to be more technologically advanced and faster than a monolithic system.

Discussion and Conclusion. The brick vault project was successfully completed with minimal deviations involved. The support area of the structures and the height of the arch rise fully corresponded to the calculated values. The solution was found to have made it possible to considerably cut down the load on the base, increase the overall structural rigidity, while freeing the space under the dome from tightening, reduce construction times making it possible to meet the deadlines as well as to reduce the costs. The scientific novelty of using arches with a mixed reinforcement system is the simplicity of the design, the absence of the need to increase the cross-section of the truss elements and the possibility of using combined reinforcement.

Keywords: nave, cylindrical vault, intermediate supports, arched beam, combined reinforcement

Acknowledgements. The authors would like to thank the General Director of ZHBI-8 for providing their facilities and manufacturing arches for the church of St. Tikhon as well as the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and the above comments making it possible to improve its quality.

For citation. Rozantseva NV, Drozdov AD Modern Technological Solution for Covering the Cylindrical Vault of the Nave during the Construction of St. Tikhon's Church in St. Petersburg. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(1):15–25. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-15-25>

Введение. Испокон веков в самые тяжелые времена человечество начинало стремиться соединиться под эгидой сильного государства в единую сплоченную силу. В этот период вера выступает наибольшим подъемным и объединяющим стимулом.

Церковь обладает способностью объединять человеческое общество благодаря своей роли социального института и регулятора экономических и иных отношений. Она формирует мировоззрение людей, устанавливает моральные и этические правила, а также дарит человеку чувство безопасности и защищенности, утраченное под воздействием внешних факторов. Всё это способствует объединению людей на основе общего мировоззрения и вероисповедания, повышению социальной активности, духовному возрождению, сохранению культурного наследия и традиций, что, в свою очередь, формирует положительный имидж страны в целом, повышая ее туристическую привлекательность. Здесь же необходимо отметить и экономическую составляющую, когда возрождение веры и строительство храмов способствует созданию рабочих мест и экономическому развитию регионов.

Храм святителя Тихона, патриарха Московского и всея России, на улице Коммуны, дом 17а — один из первых храмов на территории Северо-Западного округа, посвященный реальному человеку, имеющему непосредственное отношение к Санкт-Петербургу, новомученику первых лет советской власти, который в самые тяжелые для церкви времена возглавил Патриархию. Человеку, совершившему по факту свой небольшой подвиг и посвятившему свою жизнь Русской Православной Церкви и прошедшему «Левашовскую голгофу» [1, 2] после Петроградского процесса 1922 года. В 2025 году мы отметим скорбную дату кончины святителя Тихона, Патриарха Московского и всея России.

Храм строился и строится по заказу местной религиозной организации, на пожертвования неравнодушных и прихожан церкви Курской-Коренной Иконы Божией Матери «Знамение», расположенной на соседнем участке. Строительство началось в конце 2021 года, фактически храм уже возведен, и в начале января 2025 года протоирей Александр Пашков уже провел первое богослужение. В ближайшее время будет установлен иконостас [3].

Строительство каменного храма велось в очень сложных условиях: и стесненность, когда большая часть храма оказалась возведена за пределами участка, отведенного под религиозное использование, и достаточно сложное напластование грунтов основания, и проблемы с финансированием при жестко заданных сроках строительства.

Первоначальный проект пятиглавого храма был разработан компанией ООО «АМЦ-проект»: из красного кирпича, в неоклассическом стиле, в форме корабля, с шатровым завершением колокольни и основного объема. Однако по ряду причин в него пришлось вносить вынужденные изменения. Последние были связаны с необходимостью сокращения продолжительности строительства (при сохранении конструктивной жесткости, архитектурной целостности) и удешевления проекта.

Цель исследования — разработка организации и строительства арочных балок по короткой стороне нефа как альтернативы устройства кирпичного цилиндрического свода с затяжками с учетом сохранения требуемой высоты цилиндрического кирпичного свода и конструктивной жесткости храма в целом.

Научная новизна заключается во включении новой конструкции из железобетона в ранее разработанный классический проект храма с уже поднятыми стенами. Данное решение позволило сохранить конструктивную жесткость, не применяя требуемых затяжек, тем самым освободить внутреннее пространство, снизить трудозатраты и стоимостные показатели.

Материалы и методы. Выполнение купольных и цилиндрических сводов из каменной кладки известно еще со времен Римской империи. Данные своды являются одними из наиболее прочных и способных воспринимать максимальные нагрузки. Существенными недостатками таких конструкций являются: высокая нагрузка на основание; полная невозможность механизации работ в процессе их возведения и тем самым сокращения трудозатрат и продолжительности строительства; необходимость выполнения работ каменщиками очень высокой квалификации; высокая стоимость таких работ.

Кладку арок и сводов необходимо выполнять от пяты к замку одновременно с обеих сторон, используя две бригады каменщиков [4]. Завершается кладка заклиниванием свода замковыми кирпичами. Кладку следует проводить небольшими участками, чтобы избежать обрушения. Все швы кладки должны быть полностью заполнены раствором. Центральная ось каждого кирпича должна быть строго перпендикулярна поверхности свода. При кладке сводов из кирпича или камней необходимо дополнительно заливать швы жидким раствором, не затирая верхнюю поверхность сводов.

Кладку сводов двоякой кривизны следует начинать не ранее чем через неделю после окончания устройства их пяты. Температура наружного воздуха должна быть выше +10 °С. Если температура воздуха составляет от +10 до +5 °С, то срок увеличивается в полтора раза, а при температуре от +5 до +1 °С — в два раза.

Распалубку участка свода можно проводить не ранее чем через 10–20 дней при температуре наружного воздуха не менее +10 °С. При более низких положительных температурах продолжительность выдерживания сводов на опалубке увеличивается.

При кладке сводов со стрелой подъема $f/l < 1/5$ распор обязательно закрепляют затяжками и дополнительно по дуге окружности, как и в нашем случае. В пятах, где грани примыкают, устанавливаются сборные железобетонные элементы из бетона марки не ниже М200, армированные конструктивной арматурой диаметром 6–8 мм. Также можно использовать стальные элементы из уголков, листовой и полосовой стали. Через эти элементы пропускаются концы затяжек. Для повышения устойчивости опорных узлов при действии распора сводов в опорных узлах устанавливаются выносные пяты, которые образуют карниз с внутренней стороны помещения. Выносные пяты также повышают устойчивость опорных узлов. В опорных узлах свода должны быть наклонные поверхности, образуемые путём ступенчатой кладки кирпичей, которые должны быть перпендикулярны оси свода.

Технология практически не изменилась со времен начала строительства каменных храмов. Из всего перечисленного напрашивался вывод, что выполнить качественную кладку, уложиться в сжатые сроки, будучи ограниченными в средствах, достаточно проблематично. На рис. 1 представлены фотографии Храма святителя Тихона и чертеж разреза храма с учетом встраиваемой конструкции.



Рис. 1. Храм святителя Тихона, Патриарха Московского: а — внешний облик храма; б — разрез храма с учетом встраиваемой конструкции арочной балки; в — вид храма в сторону алтаря изнутри

Вопрос об устройстве полностью монолитного купольного покрытия не рассматривался. Сложность или недостаток цельно монолитных конструкций для культовых купольных сооружений заключается в том, что их возведение требует специальных навыков и технологий, они имеют более высокую себестоимость по сравнению с системой применения балочных арок.

Первое выдвинутое предположение. Для того чтобы отказаться от затяжек, сохранив конструктивную жесткость, нужно было усилить с определенным шагом участки конструкции свода, то есть усилить обычный каркас, скрытый в кладке заполнения, и прибегнуть к устройству выступающих из кладки свода балочных арок, которые бы стали своего рода ребрами жесткости.

Второе предположение. В сводах, полностью выполненных из клинкерных кирпичей, обычно возникает дополнительное распорное усилие, и требуются особые устройства для восприятия этого распора [5]. Было принято решение об усилении стены под пяты этих арок пилястрами, которые смогут выдержать давление от веса свода и воспринимать распор. Благодаря такому решению свод на перегруженном участке получает необходимое усиление, хотя в помещении и появляются лишние выступы. Основная задача, которая была поставлена проектировщикам для разработки проекта железобетонных арок, заключалась в создании арок определенной высоты с небольшой массой, т. е. с наименьшим расходом материала, монтаж которых возможен автокранами и кранами небольшой грузоподъемности при сохранении требуемой жесткости и высоты подъема купола. От высот дуги арки зависит ее несущая способность: большая — увеличивает несущую способность, т. к. увеличивается площадь сжатой зоны и момент инерции сечения, т. е. увеличивается сечение арки; слишком большая дуга арки может привести к уменьшению несущей способности из-за снижения жесткости и увеличения прогибов. Следовательно, оптимальная высота должна обеспечивать максимальную несущую способность при минимальных затратах материала и соблюдении требований по жесткости и трещиностойкости [6]. Одним из важных показателей качества и механической безопасности эксплуатации является остаточная несущая способность. Она определяется по нескольким критериям: прочности арматуры и бетона, жесткости, образованию трещин и их ширине раскрытия.

Оптимальная высота назначена исходя из величины изгибающего момента и толщины стенки, что обеспечивает минимальную стоимость арки с точки зрения расхода материала. Ширина нефа храма — длина пролета арки — принята исходя из ранее запроектированных размеров — 8,05 м, требуемый подъем арки — 1150 мм, чтобы с учетом высоты последней войти в предыдущий высотный проект свода нефа. Высота кладки свода 640 мм. Для изначального расчета высоту железобетонной арки, защемленной на двух концах, приняли не менее 1/15 пролета, т. е. приблизительно 400 мм между наружными гранями поясов. Для расчета радиуса кривизны свода арки, которая является частью конструкции, была использована формула для параболической арки. Подставив эти значения, получаем:

$$R = \frac{h^2 + \frac{\omega^2}{4}}{2h} \approx 6,85 \text{ м},$$

где R — искомый радиус кривизны; ω — ширина пролета (в данном случае ширина нефа) — 8,05 м; h — высота подъема свода от центра пролёта до вершины арки $1,15 + 0,4 = 1,55$ м.

Из этого следует, что по 0,6 м будет приходиться на опорный узел с каждой стороны. Ширину для расчета задали из соотношения высоты к ширине — 468 мм, что обусловлено размером верхней площадки опорного элемента. Предполагаемый шаг арматуры — 200 мм. Арки запроектированы из бетона класса В40.

Третье предположение. В большинстве проектов при использовании железобетонных арок подобной конструкции ранее всегда применялась предварительно напряженная арматура, при использовании которой не возникают растягивающие напряжения от эксплуатационных нагрузок. При проектировании таких балочных арок исследования влияния на распределительную способность арматурной пространственной системы в процессе эксплуатации не проводились. Особенности выполнения арматуры для криволинейных пролётных арок включают использование специальной косвенно армируемой спиралью арматуры, такой как отдельные проволоки, пряди и стержни периодического профиля. Также применяются пучки с внутренними анкерами и непрерывное армирование на кассеты. Натяжение арматуры может осуществляться до бетонирования (на упоры) или после бетонирования (на бетон).

Недостатки данного решения:

- такой подход к проектированию приводил к неоправданному расходу арматурной стали;
- усложняется размещение арматуры в соответствии с эпюрами материалов, то есть выполнение обрыва арматуры там, где она не требуется по длине конструкции, становится невозможным;
- необходимо приложить больших усилий на силовые формы при натяжении арматуры и обжиге бетона при передаче усилий от упоров на бетон.

Ранее применяемые конструкции для относительно небольших пролетов были не экономичны по расходу материалов. В нашем случае арочные балки работают как единая пространственная система благодаря объединенному устройству верхнего кирпичного свода. Поэтому было принято решение использовать смешанное армирование путем замены допустимого числа высокопрочных пучков на обычную стержневую арматуру. В нижнем поясе запроектировали напрягаемую арматуру класса А-IV (А600) периодического профиля, в остальных элементах — продольная арматура А400, а для сохранения жесткого в поперечном направлении пролетного строения были предусмотрены элементы поперечной и монтажной арматуры класса А240.

Несущая способность балочной арки зависит от ее геометрических размеров, материалов изготовления и условий эксплуатации. Ключевым фактором, влияющим на этот показатель, является максимальная нагрузка, которую конструкция может выдержать без деформации или разрушения [7].

Произведен сбор нагрузок. Учитывая плотность кирпича $\rho \approx 1800 \text{ кг/м}^3$ и объем кладки свода¹:

$$V = L * \omega * H = 24 \text{ м} * 8,05 * 0,64 = 122,88 \text{ м}^3,$$

где ω — ширина свода (равна ширине нефа).

Соответственно вес свода:

$$P = \rho * V = 221,184 \text{ т}.$$

При расчете свода была учтена возможность увеличения постоянной нагрузки, распределенной по горизонтальной проекции свода, при направлении от центра к опорам по кривой:

$$g_x = g * \left(\frac{1}{\cos \varphi} - 1 \right),$$

где g_x — дополнительная постоянная нагрузка, вызываемая уклоном покрытия в сечениях, отстоящих на расстоянии от x опоры, кгс/м; g — постоянная нагрузка в центре свода кг/м; φ — угол наклона к горизонту касательной к оси свода в рассматриваемом сечении.

Была поставлена задача рассчитать допустимость замены верхнего ряда пучков предварительно напряженной арматуры на стержневую арматуру² [8] с учетом дальнейшего её отгиба в опорную сжатую зону бетона. Для подтверждения выдвинутого предположения были произведены теоретические расчеты верхнего пояса по поперечному сечению арматуры:

$$A_{\text{тр}} = \frac{N_2}{R_b + 0,01 R_{sc}},$$

где $R_{sc} = 355 \text{ МПа}$ — расчетное сопротивление продольного профиля рабочей арматуры класса А400. $A_{\text{тр}}$ — требуемая площадь продольного сечения одного стержня арматуры верхнего пояса; N_2 — усилие в продольной арматуре; R_b — расчетное сопротивление бетона В40 — 51,37 МПа.

При ранее назначенной ширине элементов арки (468 мм) требуемая высота поперечного сечения верхнего пояса $h_{\text{тр}} = A_{\text{тр}}/b$; h — 12 мм. Площадь продольной рабочей арматуры при усредненном коэффициенте продольного изгиба $\varphi = 0,9$. Принимается 8 стержней диаметром 16 мм.

¹ СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия.

² Крылов С.Б., Чистяков Е.А., Зенин С.А., Соколов Б.С., Шарипов Р.Ш., Кулинов О.В. Конструкции железобетонные монолитные с напрягаемой арматурой без сцепления с бетоном, правила проектирования: методическое пособие. Москва; 2017. 206 с.

Результаты исследования. Для подтверждения проведенных исследований и получения более детального ответа выполнен расчет напряженного состояния балочной арки в программном комплексе SCAD с учетом работы арки на стадии эксплуатации, соответственно нагрузки от внешних сил были заданы для этой стадии. Принятый класс бетона — В40.

Изначальной задачей было сократить количество применяемой преднапрягаемой арматуры и заменить верхний ряд предварительно напряженной арматуры на стержневую арматуру с дальнейшим отгибом её по эпюре материалов в сжатую зону бетона, что должно было уменьшить потери в расходе материала и сохранить работоспособность конструкции. По изополям видно, что аналитический расчет в целом проведен верно, и замена на арматуру класса А400 не оказывает влияния на несущую способность арки по изгибающему моменту в отличие от опорного участка, где по изополям на плане видно напряжения в опорной зоне. Полученные результаты изополей представлены на рис. 2. Было принято решение уменьшить такие зоны напряжений путем применения дополнительного армирования обычной стержневой арматурой и хомутами, т. е. применить смешанное армирование.

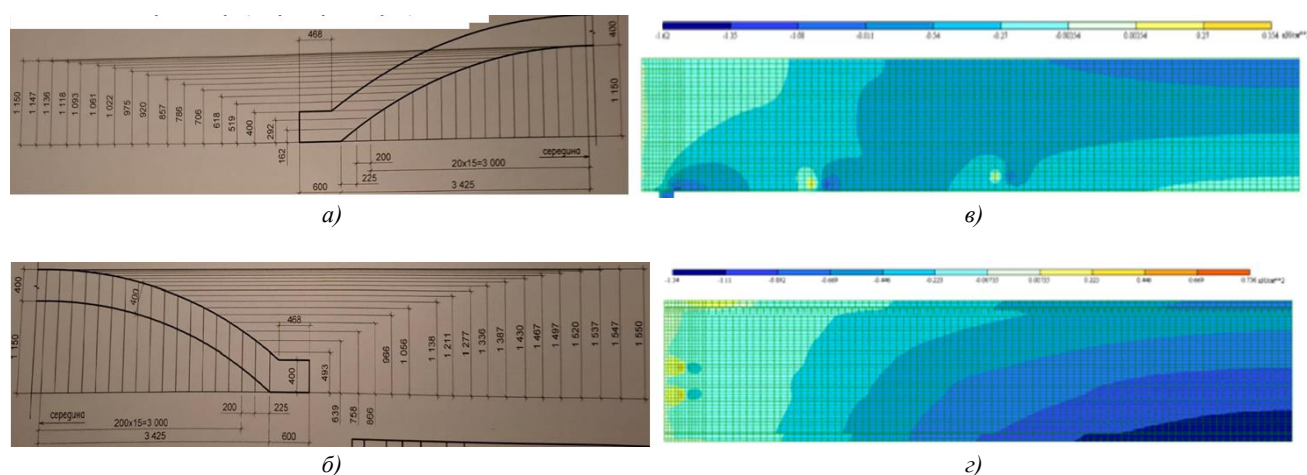


Рис. 2. Эскиз для расчета и проведение расчета балочной арки в программе SCAD: а — схема опалубки, разбивочный чертеж (левая сторона); б — опалубочный чертеж (правая сторона); в — изополя нормальных напряжений арки (продольный разрез по оси); г — изополя нормальных напряжений арки в плане

Окаймляющие стержни выполнены цельногнутыми со стыковкой их в верхней зоне опорных узлов и в нижней зоне фермы. Площадь продольных верхних стержней не менее 0,05 % от площади поперечного сечения опорных узлов, диаметр — 16 мм, при этом в местах перегибов у опорных узлов устанавливаются пространственные каркасы и дополнительная поперечная арматура в виде хомутов из стали А240, что обеспечит надежность анкеровки растянутой арматуры нижнего пояса.

В пролетной зоне принято 15 стержней поперечной арматуры с шагом 200 мм, при этом дополнительные элементы установлены с шагом 100 мм на нижнем поясе и не менее 200 мм от торца опорного узла.

Наиболее сложным вопросом при производстве подобных железобетонных конструкций стендовым способом является точность переноса параметров с чертежей в реальные размеры — это сложная и ответственная задача, требующая высокого уровня профессионализма. Даже малейшие отклонения от заданных параметров могут иметь серьезные последствия, может быть искажена геометрия готового изделия, арочная балка не будет точно соответствовать реальным требуемым параметрам. К примеру, недостаток арматуры снижает несущую способность конструкции, тогда как излишек арматуры ведет к увеличению веса и стоимости изделия.

Чтобы избежать подобных проблем, был тщательно организован процесс переноса размеров с чертежа в реальную конструкцию, принято решение формировать арку на ребре, как наиболее оптимальном положении для бетонирования и транспортировки³, произведены разбивочные работы по устройству геодезической подосновы. Чтобы минимизировать риски, связанные с возможными ошибками в процессе производства, работы выполнялись с применением построителя лазерных плоскостей «ADA 3D Liner 4V» и тахеометра «GeoMax Zoom50 1 A5 Polar», в процессе выполнения работ непрерывно выполнялся ряд действий⁴ для соблюдения непрерывного контроля⁵ [9].

³ СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции.

⁴ СП 126.13330.2012 Геодезические работы в строительстве.

⁵ Летчфорд А.Н., Шинкевич В.А. *Руководство по проведению строительного контроля*. СПб.; 2016. 592 с. (ISBN 978-5-904362-07-2)

Опалубка обязана обладать прочностью, стабильностью, герметичностью, бетон должен не просачиваться, точно воспроизводить форму будущего изделия и обладать удобством в установке и снятии, чтобы минимизировать временные и трудовые затраты. Ошибки при сборке опалубки могут спровоцировать появление трещин, щелей и прочих дефектов. Т. к. опалубка была для единичного заказа, и требовалось только восемь подобных арок, плоскость выполнили из гнутой фанеры. Чтобы выдержать давление свежеслитого бетона и предотвратить деформацию и смещение, произведено раскрепление брусками.

Арматурный каркас гнули по месту с небольшим нагревом, учитывая требования к прочности и жёсткости конструкции. Все компоненты выполнены по разработанному проекту с учетом строительных норм и правил. После проверки арматурного каркаса на соответствие палубочной форме он был перенесен во внутрь опалубки и закреплён с соблюдением размеров защитного слоя. Применена бетонная смесь марки В40, работы выполнены с обеспечением равномерной заливки бетона и предотвращением появления пустот. Визуализация процесса представлена на рис. 3.

Кантовали готовое изделие в проектное положение уже на стройке.



Рис. 3. Визуализация процесса создания железобетонной конструкции:
а — арматурный каркас; б — единичная опалубка; в — готовая арочная балка на ребре

Контроль качества работ выполнялся на каждом этапе. Дополнительным бонусом можно считать, что принятое решение позволило значительно сократить нагрузку на основание, в том числе за счет сокращения высоты кладки с 1 м до 0,64 м, повысить общую конструктивную жесткость, при этом освободив пространство под куполом от затяжек.

Обсуждение и заключение. Проект был разработан с минимальными отклонениями и не потребовал корректировок в процессе монтажа, площадь опирания конструкций и высота подъема арки полностью соответствовала расчетным значениям. К началу монтажа арок были закончены все работы по возведению стен, приняты по акту опорные пилястры, переставные поддерживающие леса, изготовлены шаблон опалубки («кружала») и шаблон угольников для кирпичной кладки. Работы велись автомобильным краном (рис. 4). Передвижка шаблонов опалубки под кирпичную кладку свода осуществлялась лебедкой. Для создания поточного метода производства работ и сокращения продолжительности строительства работы по кладке купола нефа начаты с отступом в один день с монтажом арок. Все передвижения осуществлялись по поддерживающим лесам.



а)

б)

Рис. 4. Процесс монтажа арочных балок: а — установленная на опорную пилястру балка; б — крановый монтаж с наводкой

Кладка купольного свода выполнялась с установкой кирпичей «на ребро» одновременно двумя бригадами кладчиков с двух сторон нефа от пят к вершине с тщательной перевязкой швов, что позволило значительно сократить трудозатраты и при этом повысить устойчивость свода. В процессе кладки велся постоянный контроль выполнения работ. Для подтверждения правильности выбранного метода производства работ проведена калькуляция затрат на кирпичную кладку свода нефа по «Единым нормам и расценкам на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы»⁶ с учетом устройства закладных деталей и затяжек свода и монтажа арок в качестве ребер жесткости. Результаты расчетов представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Калькуляция затрат труда и машинного времени на кирпичную кладку свода

№ п/п	Обоснование (ЕНиР)	Наименование технологических процессов	Ед. изм.	Объем работ	Норма времени		Затраты труда	
					рабочие, чел.-ч.	машины, маш.-ч.	рабочие, чел.-см.	машины, маш.-см.
1	ЕЗ-20А	Подача и установка подмостей автомобильным краном	10 м ³	4,33	1,44	0,48	0,78	0,26
2	Е15-35	Установка шаблона опалубки в рабочее положение	м ²	1135,68	0,37	0	52,53	0
3	Е1-6	Подача раствора к месту работы	м ³	174,44	0,84	0,42	18,32	9,16
4	Е1-6	Подача кирпича к месту работы	1000 шт.	37,472	0,36	0,18	1,69	0,84
5	ЕЗ-10	Кладка свода из кирпича на цементном растворе	м ³	726,84	3,8	0	345,25	0
6	ЕЗ-9	Устройство опорных парапетов	м ³	10,56	3,5	0	4,62	0
7	ЕЗ-18	Укладка в стены стальных элементов и деталей	100 кг	6,8	1,1	0,33	0,94	0,28
8	Е25-7	Разматывание и перемещение стального каната	100 м каната	0,736	2,6	0	0,24	0
9	ЕЗ-18	Установка затяжек из стальных элементов	100 шт.	0,16	24,5	1,24	0,5	0,03
10	Е25-7	Наматывание и перемещение	100 м каната	0,736	2,9	0	0,27	0
11	Е25-7	Добавлять на каждый дополнительный перерез сверх одного	100 м каната	0,736	0,69	0	0,07	0
12	Е4-1-28	Конопатка, зачеканка и расшивка швов	10 м.	4,8	1,4	0,56	0,84	0,34
13	ЕЗ-10	Опускание опалубки на клинья	м ²	1135,68	0,55	0	78,08	0
14	Е1-6	Перестановка подмостей краном	100 т	0,33	23	11,5	0,95	0,47
15	Е25-20	Перемещение шаблона опалубки ручной лебедкой	шт.	20	0,76	0	1,90	0
							506,93	11,39

*Примечание: посчитанные затраты не учитывают изготовление и разборку шаблона опалубки для свода.

⁶ ЕНиР. Единые нормы и расценки на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы. Сборник Е 1. Внутривозвездные транспортные работы: <https://docs.cntd.ru/document/1200000897>

ЕНиР. Сборник Е 3. Каменные работы: <https://docs.cntd.ru/document/1200001038>

ЕНиР. Сборник 4. Монтаж сборных и устройство монолитных конструкций: https://www.ects.ru/images/1685/Image/enir_7_vypusk_1_betonnye_i.pdf

ЕНиР. Сборник 25. Такелажные работы: <https://docs.cntd.ru/document/1200001092>

Таблица 2

Калькуляция затрат труда и машинного времени на устройство кирпичной кладки свода по железобетонным балкам

№ п/п	Обоснование (ЕНиР)	Наименование технологических процессов	Ед. изм.	Объем работ	Норма времени		Затраты труда	
					рабочие, чел.-ч.	машины, маш.-ч.	рабочие, чел.-см.	машины, маш.-см.
1	ЕЗ-20А	Подача и установка подмостей автомобильным краном	10 м ³	4,33	1,44	0,48	0,78	0,26
2	Е4-1-29	Устройство бетонной постели	м ²	4,656	0,22	0	0,13	0,00
3	Е4-1-6	Установка арок	1 шт.	8	1,7	0,16	1,7	0,16
4	Е15-35	Установка шаблона опалубки в рабочее положение	м ²	1135,68	0,37	0	52,53	0
5	Е1-6	Подача раствора к месту работы	м ³	174,44	0,84	0,42	18,32	9,16
6	Е1-6	Подача кирпича к месту работы	1000 шт.	37,472	0,36	0,18	1,69	0,84
7	ЕЗ-10	Кладка свода из кирпича на цементном растворе	м ³	726,84	3,8	0	345,25	0
8	Е1-6	Перестановка подмостей краном	100 т.	0,33	23	11,5	0,95	0,47
9	Е25-20	Перемещение шаблона-опалубки ручной лебедкой	шт.	20	0,76	0	1,90	0
							423,23	10,90

*Примечание: посчитанные затраты не учитывают изготовление и разборку шаблона опалубки для свода.

В соответствии с проведенными расчетами составлена таблица технико-экономических показателей (таблица 3).

Таблица 3

Технико-экономические показатели

Наименование показателя	Для кирпичного свода	Для свода, обустроенного по ж/б аркам
Затраты труда, чел.-см.	506,93	423,23
Затраты машинного времени автокрана, маш.-см.	11,39	10,9
Количество операций	15	9
Общая продолжительность работ с учетом формирования бригад, чел.-см.	156,6	111,9
Продолжительность в месяцах	7,2	5,08

На основе полученных данных и результатов строительства была подтверждена правильность принятого решения. Балочные арки явились ребрами жесткости. Они обладают рядом преимуществ:

– экономичность — благодаря использованию меньшего количества материалов затраты на строительство снижаются;

– арки отличаются меньшей массой и объемом по сравнению с традиционными решениями, что ведёт к уменьшению транспортных издержек.

Также было выдвинуто предположение о возможности применения комбинированного арматурного каркаса. Балочные арки отличаются высокой устойчивостью к различным видам нагрузок. С целью минимизации рисков расчеты были перепроверены в программе SCAD, проведение подобных проверочных расчетов позволяет повысить качество работ при строительстве ответственных элементов конструкций и создать трехмерную модель будущего изделия. Тестовое испытание конструкции еще до начала монтажного цикла на этапе расчета помогло выявить с помощью изополей напряжения в опорной зоне, что позволило исправить допущенные недочеты на этапе проектирования.

Монтаж готовых железобетонных конструкций обладает высокой технологичностью; практически не зависит от погодных условий в отличие от монолитной системы; не требует длительной выдержки в опалубке, т. к. применяются изделия, изготовленные в заводских условиях, обладающие многосерийностью, когда опалубка может использоваться на нескольких серийных элементах, снижая затраты на производство. Хорошо отработанный и стандартизированный процесс упростил строительство, позволил снизить продолжительность работ и уложиться в заданные сроки, снизив стоимость работ.

Современное строительство сталкивается с необходимостью постоянного поиска путей оптимизации процессов, направленных на сокращение сроков возведения различных объектов, в том числе и культовых сооружений.

Традиционные подходы, основанные на использовании кирпичных сводов со сложными системами закладок и тяжелей, требуют больших временных затрат.

Применение арочных балок позволило проявить принцип разумной экономии материалов и трудозатрат.

Эффективная организация процесса переноса размеров и контроль на всех стадиях строительства позволили минимизировать ошибки и расхождения между проектной документацией и реальной конструкцией. Современные технологии и геодезическое оборудование повысили качество, надежность и эффективность строительного процесса с учетом использования доступных ресурсов.

Использование арочных балок взамен традиционного подхода с применением закладных деталей и затяжек представляет собой перспективное направление в современной технологии строительства культовых сооружений. Такой метод позволит существенно сократить сроки строительства: в нашем случае разница в продолжительности строительства составила около двух месяцев, что обеспечило и экономию финансовых средств, сохранив при этом высокий уровень качества и безопасность. С учётом всех перечисленных преимуществ можно прогнозировать дальнейшее увеличение востребованности предложенного метода в строительстве культовых сооружений.

Научная новизна применения арок со смешанной системой армирования, в том числе и вместо ферм, заключается в следующем:

- простая конструкция узлов и технология изготовления по сравнению с сегментными фермами или устройством затяжек;
- нет необходимости увеличения сечения элементов ферм и их армирования по сравнению с раскосными фермами из-за жёстких узлов;
- при изготовлении цельных форм возможно использовать комбинированную арматуру только с предварительно напряжённым нижним поясом: было подтверждено, что использование ненапряженной арматуры в комплекте с предварительно напряженной в данных железобетонных конструкциях не нарушает ее несущей способности;
- возможность изготовления балочных арок в простой опалубке без применения вкладышей.

Также балочные арки могут найти применение при реставрации исторических сооружений, где крайне важно сохранить оригинальный архитектурный стиль, одновременно улучшив технические характеристики строения.

Список литературы/References

1. Дамаскин (Орловский). *Мученики, исповедники и подвижники благочестия Русской Православной Церкви XX столетия. Жизнеописания и материалы к ним*. Тверь: Булат; 2002.
Damaskin (Orlovsky). *Martyrs, Confessors and Ascetics of Piety of the Russian Orthodox Church of the 20th century. Biographies and Materials for them*. Book 6. Tver: Bulat, 2002. (In Russ.).
2. Цыпин В. *История Русской Церкви. 1917–1997*. М.: Издательство Спасо-Преображенского Валаамского монастыря; 1997. 831 с.
Tsy-pin V. *History of the Russian Church. 1917–1997*. Moscow: Publishing House of the Spaso-Preobrazhensky Valaam Monastery, 1997: 831 p. (In Russ.).
3. *Храм святителя Тихона патриарха Московского и всея России*. URL: <https://globus.aquaviva.ru/khram-svyatitelya-tikhona-patriarkha-moskovskogo-i-vseya-rossii-na-ulitse-kommuny> (дата обращения 11.02.2025).
Church of St. Tikhon, Patriarch of Moscow and All Russia (In Russ.) URL: <https://globus.aquaviva.ru/khram-svyatitelya-tikhona-patriarkha-moskovskogo-i-vseya-rossii-na-ulitse-kommuny> (accessed: 11.02.2025).
4. Юдина А.Ф., Верстов В.В., Бадьин Г.М. *Технологические процессы в строительстве*. М.: Издательский центр «Академия»; 2013. 304 с.
Yudina A.F., Verstov V.V., Badin G.M. *Technological Processes in Construction*. M.: Publishing Center "Academy", 2013: 304 p. (In Russ.).
5. Орлович Р.Б., Чакалиди В.Х. Способы усиления цилиндрических каменных сводов. *Строительство и реконструкция*. 2017;1(69):50–55. URL: <https://construction.elpub.ru/jour/article/view/8> (дата обращения 11.02.2025).
Orlovich R.B., Chakalidi V.X. Ways of Strengthening Cylindrical Stone Vaults. *Construction and Reconstruction*. 2017. №1(69):50–55. (in Russ.) URL: <https://construction.elpub.ru/jour/article/view/8> (accessed: 11.02.2025)
6. Шаннат И. *Напряженно-деформированное состояние железобетонных монолитных многоволновых оболочек с контурными элементами в виде сборных безраскосных ферм*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва; 1992. 19 с. URL: <https://tekhnosfera.com/napryazhenno-deformirovannoe-sostoyanie-zhelezobetonnyh-monolitnyh-mnogovolnovykh-obolochek-s-konturnymi-elementami-v-vidе> (дата обращения 11.02.2025).
Shannat I. *Stress-strain of Reinforced Concrete Monolithic Multi-wave Shells with Contoured Elements in the Form of Prefabricated Bevel-free Trusses*. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Mos-

cow, 1992:19p. URL: <https://tekhnosfera.com/napryazhenno-deformirovannoe-sostoyanie-zhelezobetonnyh-monolitnyh-mnogovolnovykh-obolochek-s-konturnymi-elementami-v-vide> (accessed: 11.02.2025).

7. Коянкин А.А., Митасов В.М. Напряжённо-деформированное состояние сборно-монолитного элемента с учётом загрузки сборной части. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021;23(3):129–142. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2021-23-3-129-142>

Koyankin A.A., Mitsov V.M. Stress-strain of a Prefabricated Monolithic Element Considering Loading of the Assembled Part. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2021;23(3):129–142. (In Russ.) <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2021-23-3-129-142>

8. Осипенко Ю.Г., Кузнецов В.С., Шапошникова Ю.А. Влияние применения высокопрочной арматуры без сцепления с бетоном на прочность монолитных безбалочных перекрытий. *Вестник МГСУ*. 2017;12(8(107)):885–891. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.8.885-891>

Osipenko Yu.G., Kuznetsov V.S., Shaposhnikova Yu.A. Effect of Using High-strength Reinforcement without Adhesion to Concrete on the Strength of Monolithic Girderless Floors. *Bulletin of MGSU*, 2017, vol. 12(8(107)):885–891 <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.8.885-891> (In Russ.).

Об авторах:

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

Дроздов Александр Данилович, кандидат технических наук, доцент кафедры организации строительства Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4), [ScopusID](#), [ORCID](#), drosdov@list.ru

Заявленный вклад авторов:

Н.В. Розанцева: разработка идеи, цели и задачи исследования, проведение расчетов, анализ и формирование выводов подготовка текста, доработка текста.

А.Д. Дроздов: научное руководство, формирование основной концепции.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

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

Alexander D. Drozdov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Construction Organization at St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4 2nd Krasnoarmeyskaya St., 190005, St. Petersburg), [ScopusID](#), [ORCID](#), drosdov@list.ru

Claimed Contributorship:

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

AD Drozdov: scientific guidance, formation of the basic concept.

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

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

Поступила в редакцию / Received 14.02.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 28.02.2025

Принята к публикации / Accepted 10.03.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS



УДК 667.6

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-26-34>

Оптимизация лакокрасочного материала для покрытия древесины с добавкой металлического катализатора

А.К. Халюшев , Е.А. Колесниченко 

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

✉ khaljushev@mail.ru



EDN: GTWFIR

Аннотация

Введение. Современные тенденции в отрасли производства лакокрасочных материалов идут в направлении экологичности и многофункциональности придавая деревянным изделиям хорошие эстетические и защитные свойства. Структура древесины, как натурального материала постоянно подвергается интенсивным и прогрессирующим процессам окислительного разрушения в условиях воздействия окружающей среды, что влияет на прочность древесины и вызывает значительные структурные изменения. В этой связи интерес к улучшению стойкости лакокрасочных покрытий при воздействии факторов окружающей среды на их эксплуатационные характеристики, оправдывает активизацию исследований в разработке новых эффективных решений. Одним из эффективных способов предотвращения разрушения структуры древесины является нанесение защитного слоя лакокрасочного материала путем его химической модификации поверхности и прежде всего за счет введения сиккативов. Введение сиккативов позволяет обеспечить равномерную скорость высыхания по всему объему и дополнительно диспергировать пигмент, что улучшает физико-механические свойства лакокрасочного покрытия и повышает его долговечность.

Цель научно-исследовательской работы — установить влияние добавки металлического катализатора в виде высокодисперсного отхода осаждения от электродуговой печи на физико-механические свойства лакокрасочного материала.

Материалы и методы. В качестве исходных компонентов для получения масляных составов красок при проведении экспериментов применяли: связующее вещество — натуральная олифа, пигмент — охра, наполнитель — мел. Для ускорения процесса высыхания добавляли металлический катализатор, являющийся высокодисперсным отходом осаждения от электродуговой печи (далее — пыль). Гранулометрический состав мела оценивали с помощью сканирующей электронной микроскопии, а пыли — с помощью лазерного анализатора Microsizer 201c.

Результаты исследования. По результатам оптимизации были получены уравнения регрессии, представленные в виде полинома второй степени и оптимальный вещественный состав лакокрасочного материала. Для решения проблемы высыхания в оптимальный разработанный состав масляной краски вводили добавку металлического катализатора в количестве 0,05 % от массы связующего.

Сравнение полученных результатов нормативных испытаний физико-механических свойств двух составов контрольного (без добавки) и модифицированного с добавкой металлического катализатора в виде пыли говорят о перспективности её применения в качестве сиккатива.

Обсуждение и заключение. Введение в лакокрасочный материал на масляной основе сиккатива в виде побочного продукта высокодисперсного отхода осаждения от электродуговой печи ускорило процесс полимеризации и улучшило физико-механические свойства модифицированного состава в сравнении с контрольным. Улучшение физико-механических характеристик масляной краски позволит повысить стойкость покрытий к воздействию факторов окружающей среды и таким образом повысить его долговечность.

Ключевые слова: адгезия, условная вязкость, лакокрасочный материал, металлический катализатор, наполнитель, связующее

Для цитирования. Халюшев А.К., Колесниченко Е.А. Оптимизация лакокрасочного материала для покрытия древесины с добавкой металлического катализатора. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(1):26–34. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-26-34>

Original Empirical Research

Optimization of the Paintwork Material Modified by Metal Catalyser Additive

Alexander K. Khalyushev , Elena A. Kolesnichenko 

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

✉ khaljushev@mail.ru

Abstract

Introduction. Current trends in the paint and varnish materials industry are embracing environmental friendliness and versatility lending wooden products good aesthetic and protective properties. The structure of wood, as a natural material, is constantly undergoing intensive and progressive processes of oxidative degradation under environmental conditions affecting the strength of wood and causes significant structural changes. Therefore the interest in improving the durability of paint coatings under the influence of environmental factors on their performance justifies the intensification of research in the development of new effective solutions. One of the effective ways to prevent the destruction of the wood structure is to apply a protective layer of paint and varnish material by chemically modifying the surface and, above all, by introducing siccatives. The introduction of siccatives makes it possible to ensure a uniform drying rate throughout the entire volume and additionally disperse the pigment, which improves the physical and mechanical properties of the paintwork and increases its durability.

The purpose of the research work is to establish the effect of the addition of a metallic catalyst in the form of highly dispersed precipitation waste from an electric arc furnace on the physical and mechanical properties of paint and varnish materials.

Materials and Methods. The initial components for obtaining oil paint compositions (paintwork material) were used in the experiments as: binder-natural olifa, pigment-ochre, fine aggregate-chalk. To the intensification of the drying process, the addition of metal catalyser, which is a highly dispersed waste of deposition from electric arc furnace, was introduced. The granulometric composition of chalk was evaluated using scanning electron microscopy, and dust using a microsizer 201c laser analyzer.

Results. According to the results of the optimisation, regression equations represented as a polynomial of the second degree and the optimal material composition of the paint material were obtained. In order to solve the problem of drying, a metal catalyser was added to the optimal composition in the amount of 0.05 % of the binder weight. A comparison of the obtained results of regulatory tests of the physical and mechanical properties of the two formulations, the control (without additives) and the modified with the addition of a metal catalyst in the form of dust, indicate the prospects of its use as a siccativ.

Discussion and Conclusion. The introduction of a siccativ into the oil-based paint and varnish material in the form of a by-product of highly dispersed precipitation waste from an electric furnace accelerated the polymerization process and improved the physical and mechanical properties of the modified composition in comparison with the control one. Improving the physical and mechanical characteristics of oil paint will increase the resistance of coatings to environmental factors and thus increase its durability.

Keywords: paintwork material, adhesion, nominal viscosity, metal catalyser, fine aggregate, binder

For citation. Khalyushev AK, Kolesnichenko EA. Optimization of the Paintwork Material Modified by Metal Catalyser Additive. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(1):26–34. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-26-34>

Введение. Рост потребления на мировом рынке лакокрасочных материалов обусловлен тенденцией в гражданском строительстве «зелёных» зданий, что создает высокий спрос на создание эффективных «зеленых» лакокрасочных материалов.

В настоящее время отрасль масляных лакокрасочных материалов движется по двум актуальным направлениям, представляющим большой практический интерес — биоресурсы и возобновляемые ресурсы. Фактически, в то время как отрасль все больше фокусируется на экологических и многофункциональных синтетических наполнителях [1, 2], производство которых обычно не учитывает характеристики экологической устойчивости [3], научные исследования направлены на применение натуральных добавок в покрытиях [4, 5]. С этой целью ученые недавно

изучили результаты применения льняного масла [6], пигментов, полученных из древесных отходов [7], микробного окрашивания [8], пигментов, извлеченных из грибов [9] и целлюлозных волокон [10] в покрытиях для древесины.

Лакокрасочный материал, придающий деревянным изделиям определенные эстетические эффекты, с новыми пигментами [11] и отличительными показателями блеска [12] отражает тенденцию, которая набирает обороты на рынке защитных покрытий для древесины. С одной стороны, при применении инновационных пигментов они должны обеспечивать уникальные эстетические эффекты и обладать устойчивостью к атмосферным воздействиям, не ухудшая защитные качества органического покрытия [13]. С другой стороны, сочетание красок для дерева с различными типами пигментов может вызвать серьезные проблемы, поскольку это может снизить защитную эффективность органического покрытия, внося разрыв в полимерную матрицу и показывая низкий уровень присущей пигменту долговечности [14, 15].

Применение маслянистых составов защищает деревянные изделия и конструкции от периодического увлажнения, которое может привести к загниванию с потерей целостности и несущей способности. Образующим пленку веществом в масляных составах являются олифы, которые по содержанию в них полимеров и обработанных растительных масел делятся на:

- 1) натуральные олифы;
- 2) полунатуральные олифы;
- 3) искусственные олифы.

Натуральные олифы получают нагреванием в среднем до 150 °С льняного, конопляного или других растительных масел. При этом вводят добавку ускорителей отвердевания (сиккативов) в количестве 2–4 %. Благодаря такой обработке олифа приобретает свойство быстро «высыхать» на воздухе, образуя эластичную пленку.

Масляные красочные составы получают методом тщательного растирания в машинах олифы с пигментами, нерастворимыми в маслах. При растирании красочных составов должны получиться однородные суспензии, в которых каждая частица пигмента или наполнителя имеет оболочку из связующего, адсорбированного на поверхности частиц.

Смачиваемость пигментов связующим, прочность получаемых оболочек и, следовательно, свойства красочных составов зависят от свойств как пигмента, так и смачиваемой жидкости. Пигменты бывают гидрофильные (железный сурик, охра) и гидрофобные (графит, сажа, свинцовые белила).

При смешивании гидрофильных пигментов с масляными связующими, не содержащими поверхностно-активных веществ, получается лишь механическая смесь, обладающая пониженными малярными свойствами. Наличие в составе поверхностно-активных веществ улучшает смачиваемость пигмента маслами.

Один из недостатков олиф связан с относительно длительным временем высыхания. Хотя применение металлических катализаторов могут значительно сократить время высыхания, несмотря на их недостатки [16].

Схема смачиваемости пигмента ПАВ в присутствии металлического катализатора представленная на рисунке 1 состоит в следующем. ПАВ присоединяются полярной группой к поверхности пигмента и образуют гидрофобную оболочку, хорошо смачиваемую масляным связующим, а внутренняя поверхность этой оболочки прочно связывается с пигментом и металлическим катализатором.

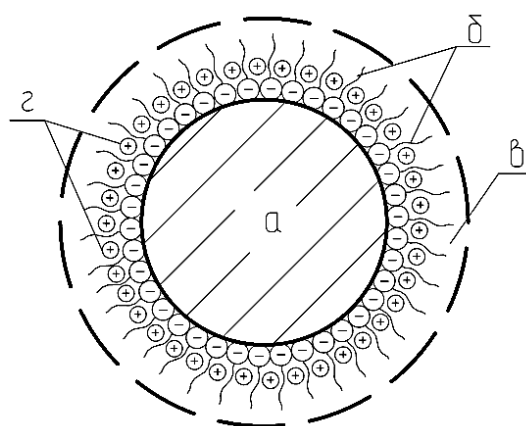


Рис. 1. Схема смачиваемости пигмента ПАВ в присутствии металлического катализатора:

a — пигмент; *b* — ориентированные молекулы ПАВ; *в* — масляное связующее; *z* — металлический катализатор

Цель научно-исследовательской работы — установить влияние добавки металлического катализатора в виде высокодисперсного отхода осаждения от электродуговой печи на физико-механические свойства масляной краски

Материалы и методы. Исходными компонентами для получения масляных составов красок при проведении экспериментов являлись: связующее вещество — натуральная олифа, пигмент — охра, наполнитель — мел (CaO — 50,90 %; ППП — 41,50 %) с удельной поверхностью 420–436,5 $\text{м}^2/\text{кг}$. Экспериментальные исследования, выполненные с помощью сканирующей электронной микроскопии (рис. 2), свидетельствуют о том, что частицы мела характеризуются в основном округлой формой размером в диапазоне от 2 до 20 $\mu\text{м}$.

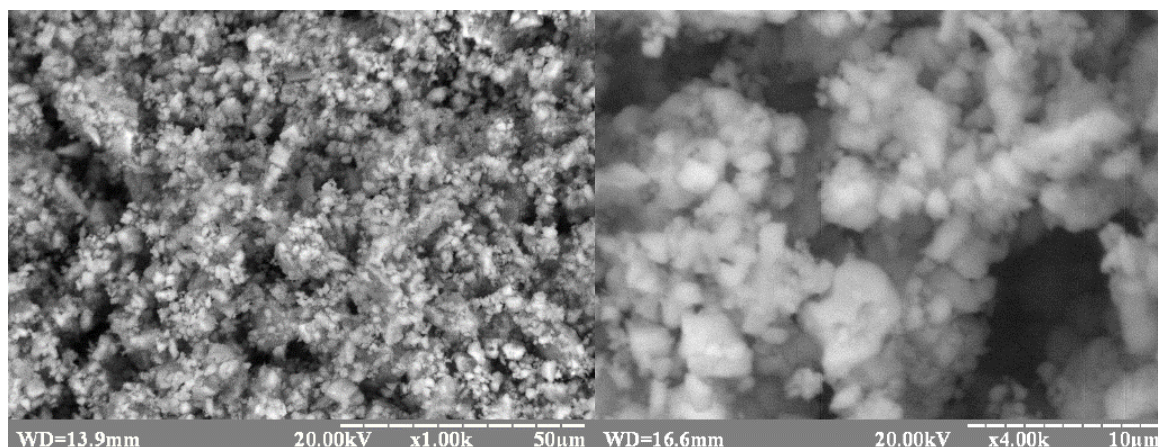


Рис. 2. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

Для ускорения процесса высыхания вводили добавку металлического катализатора, являющегося высокодисперсным отходом осаждения от электродуговой печи. Химический состав металлического катализатора в основном состоит из оксидов металла (ZnO — 46,7 %; Fe_2O_3 — 32,4 % и др.). Гранулометрический состав пыли, выполненный с помощью лазерного анализатора Microsizer 201c, представлен на рис. 3.

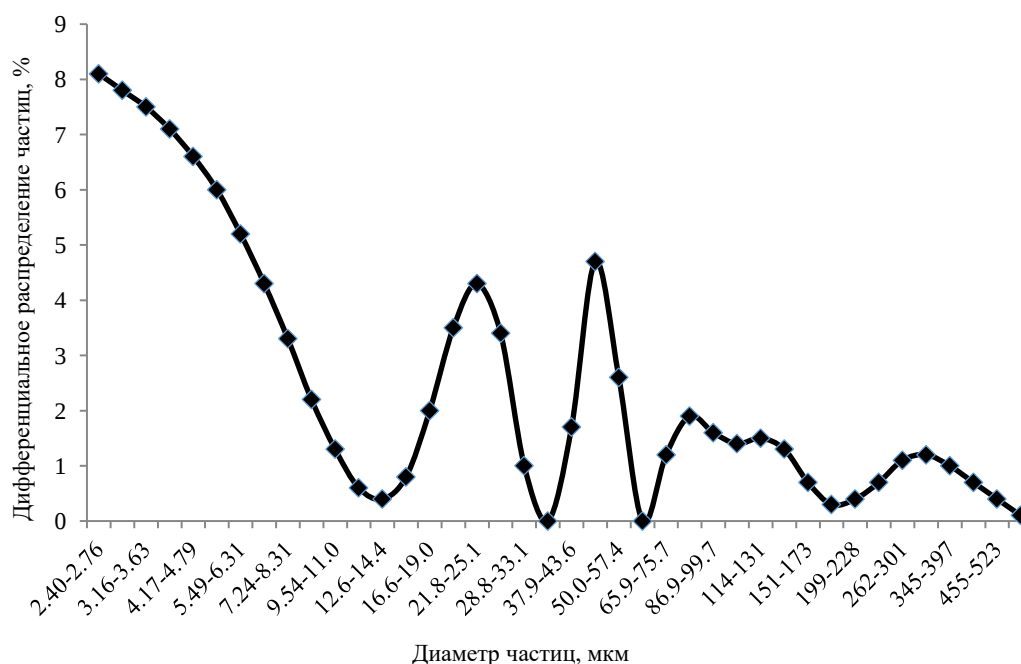


Рис. 3. Гранулометрический состав металлического катализатора

Основные свойства масляных красок зависят от количества и вида пигмента, а количество связующего компонента изменяется в широких пределах. По результатам литературного обзора принимаем количество связующего в пределах 20–40 %, наполнителя — 15–40 % и пигмента — 15–35 %.

Оптимизация. Разработку состава эффективного лакокрасочного материала для покрытия древесины находили путем определения оптимального соотношения между составляющими компонентами. Обработка экспериментальных данных проводилась методом наименьших квадратов в матричной форме. Переменными факторами служили: x_1 — содержание пигмента, %; x_2 — содержание наполнителя, %. Функцией выходных параметров были приняты следующие: y_1 — адгезия к лакокрасочному покрытию, МПа; и y_2 — условная вязкость, с. Значения факторов варьирования и их физический смысл представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значение факторов варьирования в полном факторном эксперименте (ПФЭ) 2^k

№ п/п	Код фактора	Физический смысл фактора	Ед. изм.	Интервал варьирования	Уровни фактора		
					-1	0	+1
1	x_1	содержание пигмента	%	± 5	15	25	35
2	x_2	содержание наполнителя	%	± 10	17,5	27,5	37,5

Определение времени высыхания. На подготовленные пластинки из стали размером 70×150 мм наносили тонким слоем лакокрасочный материал не оставляя просветов. Легким прикосновением пальцев устанавливали исчезновение липкости и только после этого на поверхность пластин в один слой насыпали 0,5 г стеклянных шариков Ballotini (с фракцией от 100 до 355 мкм) с высоты 50 мм на площадь диаметром 22 мм. Спустя 60 с пластинку наклоняют под углом примерно 20 ° относительно горизонтали и сметают мягкой кистью. Степень высыхания достигнута, если все шарики Ballotini удаляются, не вызывая повреждения поверхностного слоя. Фиксируют время, соответствующее достижению степени высыхания.

Определение условной вязкости по вискозиметру типа ВЗ-246. Лакокрасочный материал объемом 150 см³ для устранения посторонних включений отфильтровывали через сито. Перед проведением испытания на вискозиметре ВЗ-246 сопло тщательно очищали растворителем. Закрыли сопло резервуара штоком и налили разрабатываемый состав до горизонтальной отметки на его внутренней поверхности. Под сопло вискозиметра подставили стеклянный мерный стакан. После наливания лакокрасочного материала шток подняли. Одновременно с появлением испытываемого лакокрасочного материала из сопла включили секундомер и определили условную вязкость по времени.

Определение массовой доли нелетучих веществ. Для проведения испытания взяли металлическую чашку с внутренним диаметром дна (75 ± 5) мм и высотой бортика не менее 5 мм. Путем взвешивания определили массу пустой сухой чашки m_0 на аналитических весах с точностью до 1 мг. Затем добавили пробу лакокрасочного материала и определили массу в чашке (m_1), при этом равномерно распределяя ее по диаметру чашки. После определения массы образцы с чашкой поместили в сушильный шкаф с температурой 105–110 °С и высушили до постоянной массы. По окончании высушивания и охлаждения при комнатной температуре повторно определили массу чашки с высушенным остатком (m_2).

Массовую долю нелетучих веществ $НВ$, %, вычислили по формуле:

$$НВ = \frac{(m_2 - m_0)}{(m_1 - m_0)} 100\%, \quad (1)$$

где m_2 — масса чашки с остатком, г; m_0 — масса пустой чашки, г; m_1 — масса чашки с пробой до испытаний, г.

Определение адгезии лакокрасочного покрытия по силе отрыва. На выбранную металлическую подготовленную поверхность, предварительно обработанную грунтом в несколько слоев, наносили лакокрасочный материал. После выдержки лакокрасочного покрытия к образцам наклеивали металлические диски, а остатки клея удалили и выдержали таким образом до полного его застывания. Далее образцы закрепили в приборе — адгезиметре, а металлические диски, наклеенные на образцы, соединили шарнирно с захватным устройством адгезиметра, как представлено на рис. 4. По визуальной оценке адгезионной прочности $R_{ад} = 1,8$ МПа зафиксировали зону и характер отрыва диска от металлического основания.



Рис. 4. Адгезиметр ОНИКС-1.АП.020

Определение адгезии методом решетчатых надрезов. На подготовленные пластины размером 60×150×1 мм нанесли оптимальный масляный состав в два слоя. Проводили испытания бритвенным лезвием и делали не менее шести параллельных надрезов по линейке длиной не менее 20 мм на расстоянии 1–3 мм друг от друга. После нанесения надрезов и удаления отслоившихся кусочков покрытия провели мягкой кистью по поверхности решетки в диагональном направлении.

Результаты исследования. По результатам эксперимента были получены уравнения (2) и (3) регрессии, представленные в виде полинома второй степени. Уравнения регрессии, обработанные по методу наименьших квадратов, подвергались статистическому анализу, основанному на оценках дисперсий. Расчет коэффициентов регрессии и статистических критериев показан в таблицах 2, 3. Графическая интерпретация полученных уравнений представлена на рис. 5, 6.

$$y_1(x_1, x_2) = 2,09 - 0,235 \cdot x_1 + 0,18 \cdot x_2 - 0,55 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,335 \cdot x_1^2 + 0,02 \cdot x_2^2 \quad (2)$$

$$y_2(x_1, x_2) = 15,59 - 3,94 \cdot x_1 + 2,94 \cdot x_2 + 0,278 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,278 \cdot x_1^2 - 0,667 \cdot x_2^2 \quad (3)$$

Таблица 2

Расчетные коэффициенты уравнений

Наименование выходного параметра уравнения	Коэффициенты уравнений					
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
y_1	2,09	-0,235	0,18	-0,55	-0,335	0,02*
y_2	15,59	-3,944	2,94	0,278*	0,278*	-0,67*

* — незначимые коэффициенты

Таблица 3

Статистические критерии оптимизации

Наименование выходного параметра уравнения	Статистические критерии			
	F	D^2_0	S_0	ζ
y_1	6,242	4,107	0,064	0,111
y_2	3,035	0,87	0,933	1,618

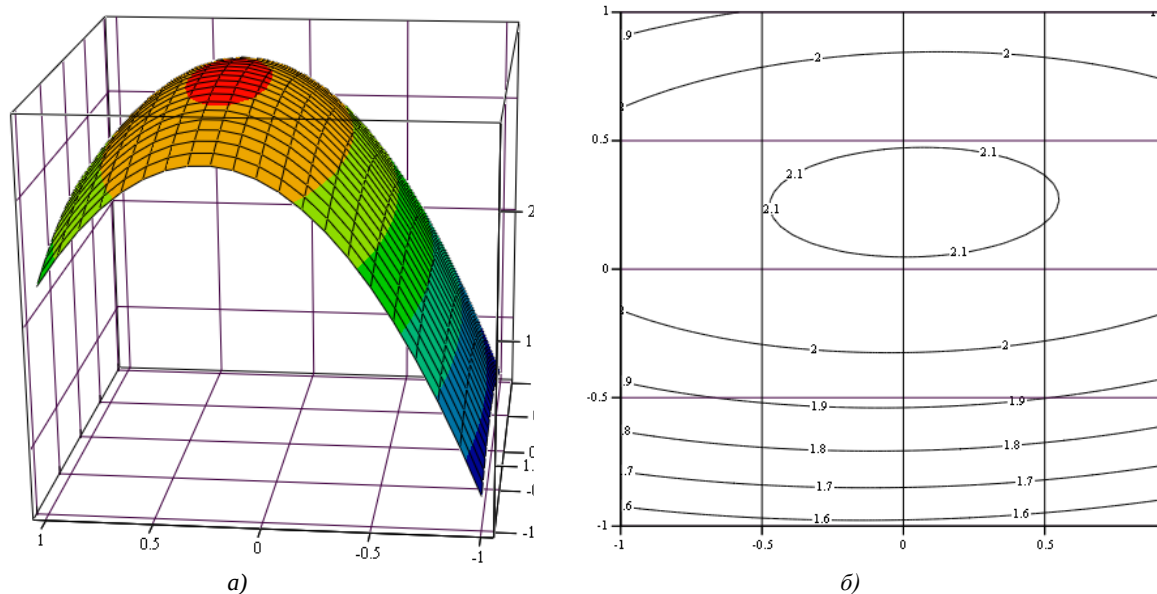


Рис. 5. Зависимость адгезии от количества пигмента x_1 и наполнителя x_2 : а — в пространстве; б — на плоскости

Анализ результатов полученной модели, представленной в виде уравнений регрессии, показывает, что коэффициент b_1 при факторе x_1 (количество пигмента) оказывает отрицательное воздействие на оба выходных параметра (y_1 ; y_2). Причем в большей степени количество пигмента влияет на условную вязкость лакокрасочного материала ($b_1 = -3,944$), чем на адгезию к лакокрасочному покрытию ($b_1 = -0,235$). Вместе с тем положительное значение коэффициента b_2 при факторе x_2 (количество наполнителя) говорит о том, что увеличение концентрации наполнителя приводит к положительному влиянию как на адгезию к лакокрасочному покрытию ($b_2 = 0,18$), так и на условную вязкость ($b_2 = 2,944$). Совместное взаимодействие данных факторов (x_1 ; x_2) незначительно, но отрицательно

влияет, в первом случае, на адгезию ($b_3 = -0,55$) и положительно влияет на условную вязкость во втором случае ($b_3 = 0,278$). Остальными коэффициентами можно пренебречь, так как они являются незначимыми по условной вязкости ($b_4; b_5$) и по адгезии (b_5), потому что меньше, чем среднеквадратичная ошибка в определении коэффициентов.

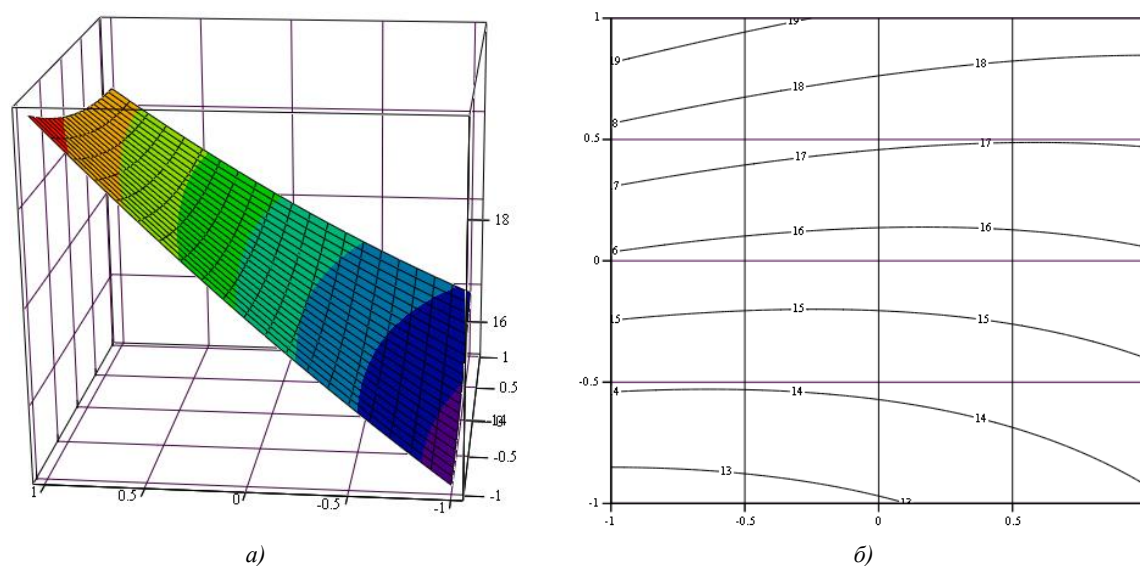


Рис. 6. Зависимость условной вязкости от количества пигмента x_1 и наполнителя x_2 : а — в пространстве; б — на плоскости

В целом, исходя из неравенства $F < qF$, с вероятностью 0,95 предлагаемые модели являются адекватными, и они могут применяться для описания процесса оптимизации в пределах 0,5. В результате был определен оптимальный состав лакокрасочного материала на основе олифы и пигмента в виде охры. Вещественный состав лакокрасочного материала представлен в таблице 4.

Таблица 4

Оптимальный вещественный состав масляной краски

Наименование состава	Содержание компонентов, %			Показатель	
	Связующее	Пигмент (охра)	Наполнитель (мел)	адгезия к покрытию, МПа	условная вязкость, с
С№ 3	45	17,5	37,5	1,8	120

Для решения проблемы высыхания в оптимальный состав лакокрасочного материала (таблица 4) вводили добавку металлического катализатора в количестве 0,05 % от массы связующего. Применение данной добавки в качестве сиккатива было обусловлено необходимым влиянием ее по двум направлениям. Первое направление заключалось в качестве диспергирующего агента пигментов, а другое — в улучшении проникновения кислорода в объем пленки и, как следствие, ускорении процесса высыхания покрытия. Это должно привести к уменьшению образования матового эффекта и позволит сохранить высокую глянцевую поверхность. Результаты сравнения физико-механических свойств составов с добавкой металлического катализатора (С№ 4) и без добавки представлены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты сравнения физико-механических свойств составов масляной краски

№	Наименование показателя	Наименование состава	
		Контрольный (С№ 3)	Рабочий (С№ 4)
1	Условная вязкость по вискозиметру типа ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм при температуре $(20,0 \pm 0,5)$ °С, с	120	110
2	Время высыхания до степени 1, не более, при температуре (20 ± 2) °С, мин	20	15,5
3	Массовая доля нелетучих веществ, %	88,5	90,4
4	Адгезия покрытия, баллы	2	1
5	Адгезия покрытия, МПа	1,8	2,15

Обсуждение и заключение. По результатам оптимизации были получены уравнения регрессии, представленные в виде полинома второй степени и оптимальный вещественный состав лакокрасочного материала. С целью решения проблемы высыхания в оптимальный состав вводили высокодисперсный побочный продукт осаждения от электродуговой печи в качестве металлического катализатора в количестве 0,05 % от массы связующего. Установлено, что время высыхания до степени 1 рабочего состава (С№ 4) ниже на 22,5 % в сравнении с контрольным составом (С№ 3), массовая доля нелетучих веществ ниже на 19,8 %, а адгезия лакокрасочного покрытия, соответственно, выше на 19,4 %.

Разработан состав эффективной масляной краски на основе олифы, охры, мела и добавки сиккатива в виде металлического катализатора, который вводили для ускорения процесса высыхания и дополнительного диспергирования пигмента тем самым улучшая устойчивость покрытия к атмосферным воздействиям. Полученные сравнительные данные нормативных испытаний физико-механических свойств масляной краски с применением побочного продукта осаждения от электродуговой печи говорят о перспективности его применения в качестве сиккатива для лакокрасочных материалов.

Список литературы/References

1. Binoj J, Raj RE, Daniel B. Comprehensive Characterization of Industrially Discarded Fruit Fiber, *Tamarindus Indica* L. as a Potential Eco-Friendly Bioreinforcement for Polymer Composite. *Journal of Cleaner Production*. 2017;142:1321–1331. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.179>
2. Kumar P, Duhan S, Duhan JS. Agro-Industrial Wastes and their Utilization Using Solid State Fermentation: a review. *Bioresources and Bioprocessing*. 2018;5:1–15. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0187-z>
3. Sanjay M, Madhu P, Jawaid M, Senthamaraikannan P, Senthil S, Pradeep S. Characterization and Properties of Natural Fiber Polymer Composites: a Comprehensive Review. *Journal of Cleaner Production*. 2018;172:566–581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.101>.
4. Richard S, Rajadurai JS, Manikandan V. Influence of Particle Size and Particle Loading on Mechanical and Dielectric Properties of Biochar Particulate-Reinforced Polymer Nanocomposites. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. 2016;21:462–477. <http://dx.doi.org/10.1080/1023666X.2016.1168602>
5. Mustapha R, Rahmat AR, Majid RA, Mustapha SNH. Vegetable Oil-Based Epoxy Resins and their Composites with Bio-Based Hardener: a Short Review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2019;58:1311–1326. <https://doi.org/10.1080/25740881.2018.1563119>.
6. Sansonetti E, Cirule D, Kuka E, Andersone I, Andersons B. Investigation of Linseed Oil-Based Wood Coatings: Effect of Artificial Weathering. *Key Engineering Materials*. 2019;800:223–227. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.800.223>
7. Calovi M, Rossi S. From Wood wWaste to Wood Protection: New Application of Black Biorenewable Water-Based Dispersions as Pigment for Bio-Based Wood Paint. *Progress in Organic Coatings*. 2023;180:10757. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107577>
8. Liu Y, Yu Z, Zhang Y, Wang H. Microbial Dyeing for Inoculation and Pigment Used in Wood Processing: Opportunities and Challenges. *Dyes Pigments*. 2021;186:109021. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2020.109021>
9. Vega Gutierrez SM, Stone DW, He R, Vega Gutierrez PT, Walsh ZM, Robinson SC. Potential Use of the Pigments from *Scytalidium Cuboideum* and *Chlorociboria Aeruginosa* to Prevent ‘Greying’ Decking and Other Outdoor Wood Products. *Coatings*. 2021;11:511. <http://dx.doi.org/10.3390/coatings11050511>
10. Calovi M, Rossi S. Impact of High Concentrations of Cellulose Fibres on the Morphology, Durability and Protective Properties of Wood Paint. *Coatings*. 2023;13:721. <https://doi.org/10.3390/coatings13040721>
11. Yan X, Chang Y, Qian X. Effect of the Concentration of Pigment Slurry on the Film Performances of Waterborne Wood Coatings. *Coatings*. 2019;9:635. <http://dx.doi.org/10.3390/coatings9100635>
12. Yan X, Wang L, Qian X. Influence of Thermochromic Pigment Powder on Properties of Waterborne Primer Film for Chinese Fir. *Coatings*. 2019;9:742. <http://dx.doi.org/10.3390/coatings9110742>
13. Kaestner D, Petutschnigg A, Schnabel T, Illy A, Taylor A. Influence of Wood Surface Color on the Performance of Luminescent Pigments. *Forest Products Journal*. 2016;66:211–213. <http://dx.doi.org/10.13073/FPJ-D-15-00036>
14. Reinprecht L, P’aneek M. Effects of Wood Roughness, Light Pigments, and Water Repellent on the Color Stability of Painted Spruce Subjected to Natural and Accelerated Weathering. *BioResources*. 2015;10(4):7203–7219. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.10.4.7203-7219>.
15. Zhang Z-M, Du H, Wang W-H, Wang Q-W. Property Changes of Wood-Fiber/HDPE Composites Colored by Iron Oxide Pigments after Accelerated UV Weathering. *Journal of Forestry Research*. 2010;21:59–62. <https://doi.org/10.1007/s11676-010-0009-z>
16. Hubmann M, Curtis JM. A Biobased Reactive Accelerant and Diluent for Solvent-Free Drying Oils. *Progress in Organic Coatings*. 2021;157:106024. <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.106024>

Об авторах:

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

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

Заявленный вклад авторов:

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

Е.А. Колесниченко: проведение расчетов, оформление рисунков, доработка текста, формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

Alexander K. Khalyushev, Cand. Sci.(Eng.), Associate Professor of the Department of Technological Engineering and Expertise in the Construction Industry, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, RF), [ORCID](#), khaljushev@mail.ru

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

Claimed Contributorship:

AK Khalyushev: scientific supervision, basic concept and research objective formulation, working with the text of the manuscript, analysis and generalization of the research results, revisiting the conclusions.

EA Kolesnichenko: performing the calculations, editing the figures, proofreading the manuscript, analysis and generalization of the research results.

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

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

Поступила в редакцию / Received 14.01.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 28.01.2025

Принята к публикации / Accepted 12.02.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS



УДК 624

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-35-40>

Прогнозирование свойств многокомпонентных минерально-полимерных композитных материалов



EDN: XFIONK

Г.Б. Вержбовский , А.В. Залиев 

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

 alan-zaliev@mail.ru

Аннотация

Введение. Прогресс строительной индустрии приводит к возникновению новых композитных материалов. Этому предшествуют экспериментальные исследования, в частности, аналитические приемы прогнозирования свойств новых материалов. В строительстве широкое распространение получили полимерные композитные материалы (ПКМ), которые хорошо зарекомендовали себя и в других отраслях промышленности. ПКМ имеют ряд особенностей, которые следует принимать во внимание в процессе разработки аналитических методик. Рассмотрение ПКМ происходит при условии изотропии конечного материала и подчинения правилу смеси при его изготовлении. Целью настоящего исследования является аналитическое определение прогнозируемых пределов прочности многокомпонентных композитных материалов с минеральными наполнителями.

Материалы и методы. Существуют различные методики определения характеристик полимерных композитов. Предложена интегральная методика определения модуля упругости и коэффициента Пуассона бинарного полимерного композитного материала, основанная на предположении, что между упругими потенциалами составных частей композита существует связь. Также показан переход аналитического прогнозирования характеристик от бинарного к многокомпонентному полимерному композитному материалу.

Результаты исследования. Важнейшей характеристикой строительных полимерных композитов является их прочность. Получена формула для аналитического определения прогнозируемого предела прочности бинарного полимерного композитного материала, также на основе данных формул получен прогнозируемый предел прочности для некоторых многокомпонентных полимерных композитных материалов.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при формировании состава многокомпонентного полимерного композитного материала целесообразно сочетать наполнители с близкими по величине характеристиками, в частности, модулями упругости.

Ключевые слова: многокомпонентный полимерный композит, бинарный полимерный композит, полимерная матрица, порошковый наполнитель, правило смеси, модуль упругости, коэффициент Пуассона, модуль деформации, модуль сдвига, объемная доля, предел прочности

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их совершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

Для цитирования. Вержбовский Г.Б., Залиев А.В. Прогнозирование свойств многокомпонентных минерально-полимерных композитных материалов. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(1):35–40. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-35-40>

Forecasting the Properties of Multicomponent Mineral Polymer Composite Materials

Gennady B. Verzhbovskiy , Alan V. Zaliev 

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

✉ alan-zaliev@mail.ru

Abstract

Introduction. Advances in the construction industry are causing new composite materials to emerge. This is preceded by experimental studies, particularly analytical techniques for predicting the properties of new materials. Polymer composite materials (PCMs) which have proved to be efficient in other industries are commonly utilized in construction as well. PCMs have a number of features that should be taken into consideration while developing analytical techniques. PCM is considered under the condition of isotropy of the final material and compliance with the mixture rule during its manufacture. The objective of the study is to analytically determine the predicted strength limits of multicomponent composite materials with mineral fillers.

Materials and Methods. There are diverse methods for identifying the characteristics of polymer composites. An integral method for determining the modulus of elasticity and the Poisson's ratio of a binary polymer composite material is set forth, based on the assumption that there is a relationship between the elastic potentials of the composite components. The transition of analytical forecasting of characteristics from binary to multicomponent polymer composite material is also shown.

Results. The major characteristic of building polymer composites is their strength. A formula has been obtained for the analytical determination of the predicted tensile strength of a binary polymer composite material, and the predicted tensile strength for some multicomponent polymer composite materials has been obtained based on these formulas as well.

Discussion and Conclusion. The results enable us to conclude that while forming the composition of a multicomponent polymer composite material, it is recommended that fillers with similar characteristics, in particular, elasticity modules are combined.

Keywords: multicomponent polymer composite, binary polymer composite, polymer matrix, powder filler, mixture rule, modulus of elasticity, Poisson's ratio, modulus of deformation, shear modulus, volume fraction, tensile strength

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

For citation. Verzhbovsky GB, Zaliev AV Forecasting the properties of multicomponent mineral polymer composite materials. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(1):35–40. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-35-40>

Введение. Развитие строительной индустрии приводит к возникновению всё новых и новых материалов, как правило, композитных. Этому предшествует этап экспериментальных исследований, при которых производится подбор рационального состава, а также испытания опытных образцов. Исследования могут оказаться продолжительными и затратными, поэтому интерес представляют аналитические приемы прогнозирования свойств новых материалов.

Композитные материалы с полимерной матрицей (ПКМ) нашли широкое применение в различных областях, в том числе, и в строительстве. Условимся рассматривать далее материалы с полимерной матрицей и одним или несколькими порошковыми наполнителями, образующимися при простом перемешивании указанных составляющих без каких-либо химических реакций между ними. В таком случае ПКМ подчиняются правилу смеси [1]. Также предположим, что композит в целом и его отдельные составляющие являются изотропными и подчиняются закону Гука.

Для указанных материалов необходимо получить аналитические выражения, позволяющие установить пределы прочности композита в зависимости от прочности его составляющих.

Материалы и методы. Существуют различные методики определения характеристик полимерных композитов, в которых предполагается, что все части материала испытывают одинаковые деформации [2] или равные напряжения [3], поэтому разработчики новых материалов пользуются обоими подходами, получают интервальную оценку свойств, которая впоследствии сужается по методикам Хашина–Штрикмана [4] или Мори–Танака [5].

В работе [6] предложена интегральная методика определения модуля упругости и коэффициента Пуассона бинарного материала с полимерной матрицей и порошковым наполнителем, основанная на предположении, что между упругими потенциалами составных частей композита существует связь (1).

$$s\sigma_1\varepsilon_1 = \sigma_2\varepsilon_2, \quad (1)$$

где индексы «1» и «2» относятся к матрице и наполнителю соответственно, а параметр s представляет собой отношение модулей упругости составляющих $s = E_1/E_2$.

В [6] получены формулы для определения модулей упругости и коэффициента Пуассона бинарного композита (2), выражаемые через объемные модули деформации и модули сдвига:

$$E_\Sigma = \frac{9K_\Sigma G_\Sigma}{3K_\Sigma + G_\Sigma}, \quad \nu_\Sigma = \frac{3K_\Sigma - 2G_\Sigma}{2(3K_\Sigma + G_\Sigma)}. \quad (2)$$

Величины, входящие в правые части выражений (2), определяются равенствами (3) и (4):

$$K_\Sigma = (K_1 K_2)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{m_1 K_1^{\frac{1}{2}} + m_2 K_2^{\frac{1}{2}} s^{\frac{1}{2}}}{m_1 K_1^{\frac{1}{2}} + m_2 K_2^{\frac{1}{2}} s^{\frac{1}{2}}}, \quad (3)$$

$$G_\Sigma = (G_1 G_2)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{m_1 G_1^{\frac{1}{2}} + m_2 G_2^{\frac{1}{2}} s^{\frac{1}{2}}}{m_1 G_1^{\frac{1}{2}} + m_2 G_2^{\frac{1}{2}} s^{\frac{1}{2}}}. \quad (4)$$

В последних выражениях индекс « Σ » относится к композиту в целом, а m_1 и m_2 — объемные доли матрицы и наполнителя соответственно, причем $m_1 + m_2 = 1$.

Приведенные в [6] примеры бинарных композитов с полипропиленовой матрицей и различными наполнителями показали хорошее совпадение теоретических результатов с указанными в [7] экспериментальными значениями — расхождение не превышает 10 %.

Составы ПКМ становятся все более и более сложными, появились материалы с двумя и более наполнителями [8], для которых также желательно иметь аналогичные методики прогнозирования их характеристик. В [9] показано, каким образом зависимости (2) могут быть распространены и на композиты более сложного состава. Для ПКМ, состоящего из n компонентов, выражения (2) необходимо применить $(n - 1)$ раз, последовательно добавляя к бинарному композиту новые составляющие. На каждом шаге сумма объемных долей бинарного материала принимается за единицу.

Результаты исследования. В [9] в качестве примера определены модуль упругости и коэффициент Пуассона для трехкомпонентного ПКМ с полипропиленовой матрицей (40 %) и наполнителями из древесной муки (50 %) и мела (10 %). При этом рассмотрены два варианта «начального материала» — бинарного композита для оценки зависимости итоговых результатов от порядка учета наполнителей (таблица 1). Все значения в таблице, за исключением безразмерных, приведены в МПа.

Таблица 1

Модули объемной деформации композитов с полипропиленовой матрицей

Композит	Матрица			Наполнитель			K_Σ	G_Σ	s	E_Σ	ν_Σ
	m_1	K_1	G_1	m_2	K_2	G_2					
«Начальный материал» — полипропилен (ПП) и древесная мука (Д)											
ПП + Д	0,44	2917	493	0,56	8333	3846	4091	974	0,14	2707	0,39
Итог	0,9	4091	974	0,1	7500	3462	4237	1052	0,3	2914	0,385
«Начальный материал» — полипропилен (ПП) и мел (М)											
ПП + М	0,8	2917	493	0,2	7500	3462	3182	599	0,16	1692	0,41
Итог	0,5	3182	599	0,5	8333	3846	4226	1053	0,17	2917	0,385

Из таблицы 1 видно, что выделенные итоговые искомые значения не зависят от порядка учета наполнителей.

Наполнителями для строительных композитов с полимерной матрицей могут быть самые разнообразные материалы. Обычно для этой цели применяется древесная мука — древесно-полимерный композит (ДПК). Известны попытки использовать в качестве наполнителя мел, тальк, мраморную муку и иные порошкообразные материалы — минерально-полимерные композиты (МПК) [7, 10, 11].

Факторами, сдерживающими широкое применение упомянутых композитов в строительстве, являются сложная технология изготовления изделий с применением сложного экструзионного оборудования и высокая стоимость конечных изделий. Тем не менее организовать недорогое массовое производство композитных изделий возможно в случае перехода от экструзионной технологии к литьевой. Последняя в настоящее время используется при изготовлении минерально-полимерной тротуарной плитки. Снизить стоимость изделий возможно также за счет использо-

вания в качестве наполнителя мелкозернистого боя строительных конструкций или отходов предприятий стройиндустрии, которые в большинстве случаев просто утилизируются. Также возможно использовать пыль, образующуюся на заводах стройиндустрии и в большинстве случаев просто утилизирующуюся.

Рассмотрим несколько материалов, стоимость и свойства которых, взятые из открытых источников, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики возможных наполнителей

ПКМНаполнитель	Средняя цена за тонну, руб.	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность ρ , кг/м ³	K_2
древесная мука	11000	10000	0,3	450	0,909
аэросил	9900	6500	0,15	2450	0,657
барит	11750	6000	0,28	4480	0,511
гипс	20000	1400	0,16	2300	0,070
каолин	5500	5000	0,25	2600	0,909
кварц	5750	7400	0,11	2600	1,287
мел	2050	8500	0,29	1800	4,146
мрамор	2000	30000	0,15	2650	15,000
мусковит (слюда)	22500	250	0,3	2700	0,011
тальк	3050	3500	0,25	2800	1,148
цементная пыль	950	19000	0,14	1400	20,000
щебень мелкий	550	20000	0,18	2600	36,364

Заметим, что величина коэффициента Пуассона для древесной муки в таблице 2 отличается от известного значения для древесины. Отличие объясняется тем, что мелкие частицы древесной муки становятся изотропными, так как при таких размерах частиц пропадает влияние на этот коэффициент особенностей строения исходного материала.

Относительная дороговизна композитных изделий может быть уменьшена за счет использования более дешевых наполнителей, поэтому в последнем столбце таблицы 2 приведены отношения модуля упругости наполнителя к его стоимости — коэффициент экономичности наполнителя. Очевидно, что чем выше значение K_2 , тем композит дешевле. Если принять древесную муку за базовый материал, то интерес будут представлять наполнители, K_2 которых не менее 0,909. Эти материалы выделены в таблице 2.

Важнейшей характеристикой строительных полимерных композитов является их прочность. В [6] получена формула для аналитического определения прогнозируемого предела прочности бинарного ПКМ:

$$\sigma_{сж\Sigma} = \frac{3K_i - 2G_i}{3K_i t_i - 2G_i r_i} \sigma_i. \quad (5)$$

причем

$$t_1 = \frac{G_1^{1/2}}{m_1 G_1^{1/2} + s^{1/2} m_2 G_2^{1/2}}, t_2 = \frac{s^{1/2} G_2^{1/2}}{m_1 G_1^{1/2} + s^{1/2} m_2 G_2^{1/2}}, \quad (6)$$

$$r_1 = \frac{K_1^{1/2}}{m_1 K_1^{1/2} + s^{1/2} m_2 K_2^{1/2}}, t_2 = \frac{s^{1/2} K_2^{1/2}}{m_1 K_1^{1/2} + s^{1/2} m_2 K_2^{1/2}}. \quad (7)$$

Предел прочности композита принимается минимальным из двух расчетов, выполненных для i , равного 1 и 2.

(5) возможно использовать и для прогнозирования свойств многокомпонентных материалов, что доказывают результаты, представленные в таблице 3, где также рассмотрена комбинация наполнителей мел и древесная мука (таблица 1).

Таблица 3

Предел прочности композита при сжатии, МПа

Композит	Матрица			Наполнитель			K_{Σ}	G_{Σ}	s	$\sigma_{сж1}$	$\sigma_{сж2}$
	m_1	K_1	G_1	m_2	K_2	G_2					
«Начальный материал» — полипропилен (ПП) и древесная мука (Д)											
ПП + Д	0,44	2917	493	0,56	8333	3846	4091	974	0,14	31,1	26,8
Итог	0,9	4091	974	0,1	7500	3462	4237	1052	0,3	27,0	17,4
«Начальный материал» — полипропилен (ПП) и мел (М)											
ПП + М	0,8	2917	493	0,2	7500	3462	3182	599	0,16	29,9	16,8
Итог	0,5	3182	599	0,5	8333	3846	4226	1053	0,17	17,7	26,8

Обсуждение и заключение. Таким образом, получены аналитические формулы для прогнозирования прочности многокомпонентных композитных материалов с полимерной матрицей и минеральными наполнителями, позволяющие существенно сократить время, затрачиваемое на разработку новых материалов, за счет уменьшения количества физических экспериментов. Численные результаты, приведенные в таблице 3, позволяют сделать вывод о том, что при формировании состава многокомпонентного ПКМ целесообразно сочетать наполнители с близкими по величине модулями упругости. Из материалов, перечисленных в таблице 2, предпочтение следует отдать мрамору, цементной пыли и мелкому щебню. Эти наполнители могут быть получены в результате переработки сносимых зданий и сооружений, в том числе, в районах боевых действий. Прочность многокомпонентных ПКМ, рассмотренных в статье, оказывается достаточной для изготовления из них стеновых блоков, которые могут производиться непосредственно в районах строительства и использоваться в качестве материала для возведения стен и перегородок строений различного назначения.

Список литературы/References

1. Бартенев Г.В., Зеленов Ю.В. *Физика полимеров*. М.: Высшая школа; 1982. 280 с.
Bartenev GV, Zelenev YuV. *Physics of Polymers*. Moscow: Higher School; 1982. 280 p. (In Russ.).
2. Voigt V. *Lehrbuch der Kristallphysik*. Berlin: Teubner; 1928. 962 p.
3. Reuss A. Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1929;9(1):49–58. <http://dx.doi.org/10.1002/zamm.19290090104>
4. Hashin Z, Shtrikman S. A variational approach to the elastic behavior of multiphase materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1963;11:127–140. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(63\)90060-7](https://doi.org/10.1016/0022-5096(63)90060-7)
5. Klusemann B. Homogenization methods for multi-phase elastic composites: Comparisons and benchmarks. *Technische Mechanik*. 2010;30(4):374–386. URL: https://www.researchgate.net/publication/256374208_Homogenization_methods_for_multi-phase_elastic_composites_Comparisons_and_benchmarks (дата обращения 15.01.2025).
6. Вержбовский Г.Б. *Малоэтажные быстровозводимые здания и сооружения из композитных материалов*. Ростов-на-Дону: П-Пресс; 2015. 280 с.
Verzhbovsky GB. *Low-rise Prefabricated Buildings and Structures Made of Composite Materials*. Rostov-on-Don: P-Press; 2015. 280 p. (In Russ.).
7. Клесов А.А. *Древесно-полимерные композиты*. СПб.: HOT; 2010. 735 с.
Klesov AA. *Wood-polymer Composites*. St. Petersburg: NOT; 2010. 735 p. (In Russ.).
8. Саввинова М.Е., Петухова Е.С. Выбор перспективных наполнителей для полиэтиленов ПЭ80Б и ПЭ2НТ11. *Инженерный вестник Дона*. 2013;1. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1518> (дата обращения 15.01.2025).
Savvinova ME, Petukhova ES. Choice of Promising Fillers for Polyethylene PE80B and PE2HT11. *Don Engineering Bulletin*. 2013;1. (In Russ.) URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1518> (accessed: 15.01.2025).
9. Вержбовский Г.Б. Прогнозирование физических свойств многокомпонентных композитных материалов с полимерной матрицей. *Инженерный вестник Дона*. 2022;7. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7829> (дата обращения 15.02.2025).
Verzhbovsky GB. Forecasting the Physical Properties of Multicomponent Composite Materials with a Polymer Matrix. *Don Engineering Bulletin*. 2022;7, (In Russ.) URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7829> (accessed: 15.01.2025).
10. Михайлин Ю.А. *Конструкционные полимерные композиционные материалы*. СПб.: HOT; 2013. 822 с.
Mikhailin YuA. *Structural Polymer Composite Materials*. St. Petersburg: NOT; 2013. 822 p. (In Russ.).
11. Ochsner A, Silva LFM, Altenbach H. *Mechanics and Properties of Composed Materials and Structures*. Berlin Heidelberg: SpringerVerlag; 2012. 195 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31497>

Об авторах:

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

Залиев Алан Витальевич, аспирант кафедры металлических, деревянных и пластмассовых конструкций Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), alan-zaliev@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Г.Б. Вержбовский: научное руководство, формирование концепции, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

А.В. Залиев: проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

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

Alan V. Zaliiev: Postgraduate student of the Department of Metal, Wood and Plastic Structures at the Don State Technical University (344003, Russian Federation, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), [ORCID](#), alan-zaliiev@mail.ru

Claimed Contributorship:

GB Verzhbovskiy: scientific supervision, concept formation, analysis of research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

AV Zaliiev: performing the calculations, preparing the manuscript, forming the conclusions.

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

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

Поступила в редакцию / Received 24.01.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 05.02.2025

Принята к публикации / Accepted 20.02.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS



УДК 693.557

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-41-53>

Контракционная усадка бетонов из высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей

Г.В. Несветаев , Ю.И. Корянова , В.В. Шуть 

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

✉ nesgrin@yandex.ru



EDN: TWGDIA

Аннотация

Введение. Выявлено влияние особенностей химико-минералогического состава портландцементов и химической основы суперпластификаторов на величину и кинетику аутогенной (контракционной) усадки бетонов из высокоподвижных и самоуплотняющихся бетонных смесей. Актуальность вопроса обусловлена часто игнорируемой ролью аутогенной усадки в формировании поля температурно-усадочных напряжений в ранний период твердения массивных монолитных конструкций. Для расчета собственных напряжений требуются данные о величине и кинетике аутогенной усадки, а недостаточность и некоторая противоречивость данных о влиянии суперпластифицирующих добавок на величину и кинетику аутогенной усадки в зависимости от вещественного состава цемента и химико-минералогического состава клинкера предопределяют целесообразность получения новых данных по данному вопросу. Цель работы состоит в развитии научных представлений о влиянии рецептурных факторов и свойств материалов на количественные и качественные параметры аутогенной усадки на примере широко применяемыми при производстве монолитных железобетонных конструкций в Ростовской области материалов.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования выполнены с использованием шести быстротвердеющих по классификации ГОСТ 31108-2020 портландцементов четырех производителей. Использованы суперпластифицирующие добавки на основе эфиров поликарбоксилатов и нафталинформальдегидов в дозировке 0,5 % по товарному продукту. Свойства цемента определены по ГОСТ 30744-2001 и ГОСТ 310.5-88. Деформации твердеющего цементного теста (камня) определялись по методу Ле-Шателье. Величина аутогенной усадки бетона определялась расчетным методом по величине аутогенной усадки цемента с учетом истинного значения В/Ц бетона и концентрации заполнителя в бетоне.

Результаты исследования. Соотношение «аутогенная усадка/общая контракция» исследованных цементов с добавками в возрасте 5 сут. составило 0,37–0,74, количественные значения общей контракции исследованных цементов в сочетании с добавками в возрасте 5 сут. составили от 2,93 до 3,43 мл/100 г цемента, что не противоречит известным данным. Изменение величины аутогенной усадки при наличии добавок в возрасте 5 сут. составило от 0,64 до 1,65 относительно бездобавочного эталона. Влияние добавок на кинетику аутогенной усадки проявилось как в ускорении либо замедлении, так и в отсутствии влияния. Расчетная величина аутогенной усадки бетонов классов В25–В35 из высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей в возрасте 5 сут. составила от 0,36 до 1,18 мм/м.

Обсуждение и заключение. Развита научные представления о кинетике аутогенной усадки в зависимости от вида цемента и добавок. Для описания изменения аутогенной усадки во времени предложена формула, подобная формуле EN 1992-1-1 изменения прочности бетона во времени. Предложена классификация бетонов по кинетике аутогенной усадки. Уточнены закономерности изменения величины аутогенной усадки бетонов из высокоподвижных и самоуплотняющихся бетонных смесей с учетом влияния состава и свойств цемента в сочетании с некоторыми суперпластифицирующими добавками. Определено наиболее вероятное значение показателя показателя степени $d = 1,6 - 1,8$ в известной формуле для расчета аутогенной усадки бетона.

Ключевые слова: общая контракция, контракционная усадка, аутогенная усадка, суперпластифицирующие добавки, высокоподвижные бетонные смеси

Для цитирования. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Шуть В.В. Контракционная усадка бетонов из высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(1):41–53. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-41-53>

Original Empirical Research

Autogenous Shrinkage of Concretes from Highly Mobile and Self-Compacting Mixtures

Grigory V. Nesvetaev , Yulia I. Koryanova , Vladimir V. Shut 

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

✉ nesgrin@yandex.ru

Abstract

Introduction. The influence of the chemical and mineralogical composition of Portland cements and the chemical base of superplasticizers on the magnitude and kinetics of autogenic (contractional) shrinkage of concretes from highly mobile and self-compacting concrete mixtures has been revealed. The relevance of the issue is due to the commonly overlooked role of autogenic shrinkage in the formation of the field of temperature-shrinkage stresses in the early hardening period of massive monolithic structures. In order to calculate intrinsic stresses, data on the magnitude and kinetics of autogenic shrinkage are required, and the insufficiency and some inconsistency of data on the effect of superplasticizing additives on the magnitude and kinetics of autogenic shrinkage, depending on the material composition of cement and the chemical and mineralogical composition of clinker, are critical to the expediency of obtaining new data on the issue. The objective of the work is to develop scientific ideas about the influence of prescription factors and material properties on the quantitative and qualitative parameters of autogenic shrinkage using the example of materials commonly used in the production of monolithic reinforced concrete structures in the Rostov region.

Materials and methods. Experimental studies were conducted using six Portland cements from four manufacturers that are fast-hardening according to GOST 31108-2020 classification. Superplasticizing additives based on polycarboxylate esters and naphthalene formaldehydes in a dosage of 0.5% of the commercial product were employed. The properties of cements are identified according to GOST 30744-2001 and GOST 310.5-88. Deformations of the hardening cement paste (stone) were determined by means of the Le Chatelier method. The amount of autogenic shrinkage of concrete was determined by the calculation method based on the amount of autogenic shrinkage of cement, taking into account the true value of the I/C of concrete and the concentration of aggregate in concrete.

Results. The ratio of "autogenic shrinkage/total contraction" of the investigated cements with additives at the age of 5 days was 0.37–0.74, the quantitative values of the total contraction of the studied cements in combination with additives at the age of 5 days ranged from 2.93 to 3.43 ml/100 g of cement, which does not contradict the available data. Change in the amount of autogenic shrinkage in the presence of additives at the age of 5 days was from 0.64 to 1.65 relative to the non-additive standard. The effect of additives on the kinetics of autogenic shrinkage was manifested both in acceleration or deceleration, and in the absence of any effect. The calculated value of autogenic shrinkage of concretes of classes B25–B35 from highly mobile and self-sealing mixtures at the age of 5 days ranged from 0.36 to 1.18 mm/m.

Discussion and Conclusion. Scientific ideas about the kinetics of autogenic shrinkage have been developed depending on the type of cements and additives. In order to describe the change in autogenic shrinkage over time, a formula similar to the formula EN 1992-1-1 for the change in concrete strength over time is set forth. The classification of concretes according to the kinetics of autogenic shrinkage is suggested. The patterns of changes in the amount of autogenic shrinkage of concretes from highly mobile and self-compacting concrete mixtures have been clarified considering the influence of the composition and properties of cements in combination with several superplasticizing additives. The most probable value of the indicator of the degree $d = 1.6 - 1.8$ is determined in the well-known formula for calculating the autogenic shrinkage of concrete.

Keywords: general contraction, contractional shrinkage, autogenic shrinkage, superplasticizing additives, highly mobile concrete mixtures

For citation. Nesvetaev GV, Koryanova YuI, Shut VV. Contractional shrinkage of concretes from highly mobile and self-sealing mixtures. *Current Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(1):41–53. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-41-53>

Введение. Риск раннего трещинообразования массивных монолитных железобетонных конструкций обусловлен возникающими вследствие температурных и усадочных деформаций растягивающими напряжениями [1, 2], причем при оценке уровня растягивающих напряжений усадочные деформации достаточно часто игнорируются [3, 4]. Усадочные деформации, как правило, не являются доминирующим фактором в риске раннего трещинообразования массивных монолитных железобетонных конструкций, но их учет позволяет более достоверно оценить

уровень возникающих напряжений [5], особенно при значительном времени перекрытия слоев и в случае поставок бетонной смеси с разных бетоносмесительных заводов, поскольку при возможном использовании производителями разных цементов и добавок бетоны одного класса могут иметь значительные различия усадочных деформаций в ранний период твердения. Для достоверной оценки роли усадочных деформаций необходимо учитывать их природу, величины и закономерности развития. Как известно, гидратация и твердение портландцемента сопровождается, в том числе, собственными деформациями, обусловленными массообменными процессами с внешней средой (усадка при высыхании или «drying shrinkage», которая включает и карбонизационную усадку — далее ВУ) и изменениями объема твердеющей системы вследствие гидратации, которые происходят в результате уменьшения объема новообразований в процессе гидратации относительно суммарного объема вступающих в реакцию веществ. Это явление исторически известно как «контракция» или «общая контракция» (от лат. — la contraddizione, далее — ОК) и состоит из контракционной пористости (КП) и контракционной усадки (КУ) [6]. Среди отечественных исследователей первым обстоятельно изучал ОК Некрасов В.В. [7]. В зарубежной литературе уже более 30 лет в основном используются термины «chemical shrinkage» для обозначения ОК и «autogenous shrinkage» для обозначения КУ [5, 8–10]. Одно из ранних упоминаний термина «autogenous shrinkage» имело место в [11]. В отечественной литературе встречаются термины «общая» и «внешняя» контракция или химическая усадка для обозначения ОК и КУ соответственно [12]. В настоящей работе далее будут использоваться термины ОК (общая контракция = «chemical shrinkage») и КУ («autogenous shrinkage»).

Первые упоминания о КУ относятся к 1933 г. (Нилендер Ю.А.), а по данным [9] — к 1934 г. (Lyma), при этом в [9] отмечается, что величина КУ зависит от типа цемента и может изменяться до 3 раз. Некоторые сведения об изменении представлений о роли КУ в процессе раннего трещинообразования бетона иллюстрирует таблица 1.

Таблица 1

Некоторые представления о роли КУ в формировании структуры бетона

Данные	КУ
Нилендер Ю.А. (1933)	В 5-10 раз меньше ВУ
Шпиндель М. (1936)	Значительно превосходит ВУ
Александровский С.В. (1962)	Мала по сравнению с ВУ и не играет роли в трещинообразовании
Михайлов В.В. (1974)	Весьма значительна (1 мм/м в 1 сутки)
Баженов Ю.М. (1987)	Не столько изменяет размеры, сколько изменяет поровую структуру
Холмянский М.М. (1997)	Мала по сравнению с ВУ и не оказывает существенного влияния на трещинообразование
Larrard Roy (1993)	ВУ 0,42, КУ 0,58 от полной
Tazawa, Miyazawa (1997)	ВУ 0,17–0,5, КУ 0,83–0,5 от полной ¹
Persson (1998)	ВУ 0,49–0,54, КУ 0,32–0,38 от полной
Несветаев Г.В., Тимонов С.А. (2001)	ВУ 0,27–0,87; КУ 0,72–0,13 ^{1, 2} от полной

Примечания: 1 — в зависимости от В/Ц; 2 — 8 партий цемента 6 производителей.

Величина КУ зависит от свойств цемента, прочности бетона, наличия добавок. Согласно EN 1992-1-1 величина КУ (по EN $\varepsilon_{ca}(\infty)$) определяется по формулам в зависимости от прочности бетона f_{ck} и времени t :

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10)10^{-6}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty), \quad (2)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2t^{0,5}). \quad (3)$$

Поскольку, как известно, прочность бетона зависит от величины В/Ц, закономерно КУ зависит от величины В/Ц:

$$\frac{\varepsilon_{ку, В/Ц}}{\varepsilon_{ку, В/Ц=0,27}} = k \cdot \exp(b \frac{В}{Ц}), \quad (4)$$

где $k = 3,6$ и $2,9$ соответственно по усредненным данным EN 1992-1-1 и по некоторым экспериментальным данным (Малинина Л.А., Несветаев Г.В. и Тимонов С.А., Persson В.), при этом $b = -4,7$ и $-4,0$, а показатель достоверности аппроксимации R^2 соответственно 0,99 и 0,54, что свидетельствует о сильном влиянии на зависимость (4) по экспериментальным данным, помимо величины В/Ц, других факторов — в первую очередь свойств цемента и наличия добавок.

Зола-уноса практически не влияет на величину КУ, а влияние микрокремнезема зависит от дозировки — возможно как повышение, так и понижение КУ. По данным [13] в возрасте 4 сут шлак повышает КУ до 1,5 раза. По данным [14] 10 % микрокремнезема повышает усадку до 1,33 раза, а в зависимости от дозы суперпластификатора КУ изменяется от 0,75 до 1,25. Ускоритель твердения снижает КУ примерно на 13 %, а замедлитель схватывания — повышает до 1,5 раза. Воздухововлекающая добавка сильно снижает КУ.

Наибольший разброс мнений в литературе относится к величине КУ. Некоторые данные представлены в таблице 2. Следует иметь в виду, что величины КУ, представленные в таблице 2, получены по различным методикам.

Таблица 2

Некоторые литературные данные о величине КУ

Данные	КУ, мм/м						
	цементное тесто (камень)			бетон или раствор			
	72 ч	120 ч	нет данных	24/48 ч	72 ч	120 ч	нет данных
[15]	1,2	1,47			0,12–0,24	0,147–0,295	
[16]	0,6 0,3	0,75 0,39			0,060–0,120 0,030–0,060	0,075–0,15 0,039–0,078	
[17]					0,8–1,0 0,44–0,55 0,238–0,475 0,18–0,225		
[18]	0,25	0,275			0,025–0,050	0,0275–0,055	
[19]							0,1–0,5
[13]			0,75–1,2				
[14]							0,4–1,05
[20]							0,35–1,25
[21]					0,071–0,817		
[22]						0,14–0,53	
[23]				0,203/0,235			
[24]					0,4–0,62		

По данным [13], соотношение КУ/КП в возрасте 10 ч составило 0,3. По данным [6] при исследовании 5 партий цемента 4 производителей соотношение КУ/КП составило 0,32–0,5, а при введении СП — от 0,3 до 0,8.

По нашему мнению, большой разброс значений величины КУ по некоторым литературным данным связан в первую очередь с отсутствием единой методики измерения величины КУ [19, 20, 25]. Ключевым моментом является, безусловно, время начала измерения КУ, поскольку развитие контракции происходит сразу с начала гидратации цемента, а начало измерения КУ по различным методикам существенно различается. По данным [19] со ссылкой на рекомендации RILEM и DIN 1045-1 измерение КУ начинается в возрасте 1 сут, но в исследованиях встречается и начало измерения сразу после схватывания. Кроме того, могут применяться образцы разной формы и размеров [19, 25].

На рис. 1 схематично представлено развитие ОК, КУ и КП во времени [6]. На первом этапе (1 на рис. 1) до формирования кристаллического сростка имеют место деформации цементного теста в пластической стадии, до схватывания. В некоторых зарубежных источниках [14] отмечается, что это индукционный период и период начала интенсивного процесса гидратации, при этом на первом этапе $ОК = КУ$. Далее в связи с началом формирования кристаллического сростка (каркаса) деформации неизолированной (ОК) и изолированной (КУ) смеси начинают различаться, и $ОК = КУ + КП$. Именно с этого момента следует начинать отсчет при измерении КУ, т. е. после схватывания, что отмечается, например, в [8], причем изменение сроков начала формирования кристаллического сростка влияет на соотношение КУ/ОК [6].

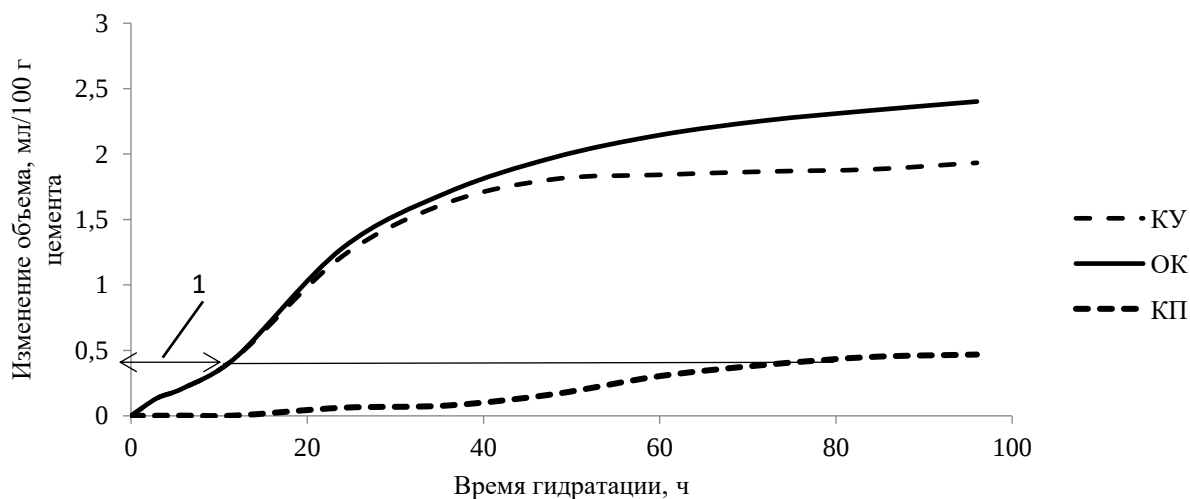


Рис. 1. Схема развития ОК, КУ и КП во времени

Широко применяемые для производства массивных монолитных железобетонных конструкций высокоподвижные и самоуплотняющиеся бетонные смеси характеризуются повышенным содержанием вяжущего теста и наличием современных эффективных добавок-разжижителей [26, 27]. Существенные различия в оценке величин КУ и недостаточность данных о влиянии суперпластифицирующих добавок (СП) на величину и кинетику КУ с учетом химико-минералогического состава клинкера и вещественного состава цемента предопределяют актуальность исследований в этой области.

В связи с вышеизложенным целью настоящего исследования является уточнение закономерностей изменения величины и кинетики КУ бетонов из высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей с учетом влияния состава и свойств цементов в сочетании с некоторыми СП, широко применяемыми при производстве монолитных железобетонных конструкций в Ростовской области.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования выполнены с использованием шести портландцементов четырех производителей (таблица 3).

Таблица 3

Некоторые свойства исследованных цементов

№	ПЦ	Свойства цементов			
		Прочность, Мпа, в возрасте		НГ, %	НС, мин.
		2 сут	28 сут		
1	ЦЕМ I 42,5Н ^{1,5}	22,4	51,5	22,75	115
2	ЦЕМ II/A-III 42,5Н ^{1,5}	23,4	55,3	25,0	150
3	ЦЕМ I 42,5Н ^{2,5}	28,5	50,9	26,5	150
4	ЦЕМ 0 52,5Н ^{3,5}	35,9	62,9	30,0	180
5	ЦЕМ I 42,5Н ^{3,5}	30,1	55,6	26,25	170
6	ЦЕМ II/A-II 42,5Н СС ^{4,6}	23,5	54,6	27,25	150

Примечания: 1–4 — производители; 5 — ГОСТ 31108-2020; 6 — ГОСТ 22266-2013

Все исследованные цементы по классификации ГОСТ 31108-2020 относятся к быстротвердеющим. Использованы СП в дозировке 0,5 % от массы цемента по товарному продукту:

- «ПОЛИПЛАСТ СП-4» по ТУ 5745-026-58042865-2007 — смесь сополимеров на основе нафталинсульфокислоты;
- «ЛИНАМИКС ПК» тип 2 по ТУ 5745-033-58042865-2008 — на основе полиоксиэтиленовых производных поликарбоновых кислот и полиэтиленгликоля.

Определение свойств цементов произведено по ГОСТ 30744-2001 и ГОСТ 310.5-88. Деформации твердеющего цементного теста (камня) определялись по методу Ле-Шателье по неизолированной схеме при определении величины ОК и по изолированной схеме (в эластичной оболочке) при определении величины КУ [12]. Измерения КУ продолжались 120 ч (5 сут), поскольку именно этот период представляет наибольшую опасность раннего трещинообразования многих массивных монолитных конструкций. Для перехода от объемных деформаций цементного камня ΔV , %, к линейным $\varepsilon_{КУ}$, мм/м, при измерении по изолированной схеме ввиду малости величин использовалась зависимость:

$$\varepsilon_{КУ} = 3,33\Delta V. \quad (5)$$

Величина КУ бетона ε_B определялась расчетным методом по величине КУ цемента $\varepsilon_{Ц}$ с учетом истинного значения В/Ц бетона и содержания заполнителя V_a в бетоне по формуле [28]:

$$\varepsilon_B = \varepsilon_{Ц}(1 - V_a)^d, \quad (6)$$

где $d = 1,2-1,7$ — по данным Шейкина А.Е.; $d = 1,4-1,8$ — по данным Щербакова Е.Н. [29]; $d = 1,7$ — по данным [8, 10, 30]; значение V_a принято 0,7 в соответствии с рекомендациями [8, 28].

Результаты исследования. В таблице 4 представлены данные о соотношении КУ/ОК исследованных цементов с добавками.

Таблица 4

Соотношение КУ/ОК исследованных цементов с добавками

Состав	Соотношение КУ/ОК в 120 ч для ПЦ по таблице 3					
	1	2	3	4	5	6
ПЦ	0,37	0,53	0,48	0,59	0,54	0,56
ПЦ + Линамикс	0,61	0,49	0,48	0,4	0,6	0,7
ПЦ + СП-4	0,49	0,68	0,34	0,57	0,61	0,74

Практически все результаты укладываются в ранее указанный диапазон 0,3–0,8. Значения величины ОК представлены в таблице 5.

Таблица 5

Величина ОК исследованных цементов с добавками

Состав	Величина ОК, мл/100 г цемента, в 120 ч для ПЦ по таблице 3					
	1	2	3	4	5	6
ПЦ	2,93	3,43	3,0	3,24	3,32	3,42
ПЦ + Линамикс	2,98	2,3	4,3	3,5	3,35	3,06
ПЦ + СП-4	3,35	3,46	3,61	4,17	3,75	3,95

Известны формулы, позволяющие определить величину ОК по минералогическому составу клинкера и вещественному составу цемента [20, 29]:

$$OK = aC_3S + bC_2S + cC_3A + dC_4AF + eSO_3. \quad (7)$$

Для ПЦ № 1 по таблице 3, по которому были известны все необходимые данные для расчета, в таблице 6 приведены расчетные значения по различным формулам.

Таблица 6

Расчетные и измеренные значения величины ОК в 120 ч

Значение	Формула					
	Данюшевский В.С.	Волженский А.В.	Пауэрс Т.С.	Некрасов В.В.	Несветаев Г.В. ²	Паулини П.
Расчетное	<u>2,73</u> 0,93 ¹	<u>4,17</u> 1,42	<u>3,52</u> 1,2	<u>5,1</u> 1,74	<u>2,99</u> 1,02	<u>4,17</u> 1,42
Измеренное	2,93					

Примечания: 1 — относительно измеренного; 2 — по (8).

Лучшее соответствие расчетных и измеренных значений получено по формуле Несветаева Г.В. [29]:

$$OK = 0,0364C_3S + 0,021C_2S + 0,1474(C_3A - 2,67SO_3) + 0,1C_4AF + 0,433SO_3 \quad (8)$$

Для описания изменения КУ во времени использована зависимость, подобная формуле изменения прочности бетона во времени по EN 1992-1-1:

$$R_{\tau}(KY_{\tau}) = R_{[t]}(KY_{[t]}) \cdot \exp(k \cdot (1 - \left(\frac{[t]}{\tau}\right)^d), \quad (9)$$

где R_{τ} , KY_{τ} — соответственно предел прочности при сжатии и КУ в момент времени τ , сут; $R_{[t]}$, $KY_{[t]}$ — соответственно предел прочности при сжатии и КУ в 28 (R) и 5 (KY) сут; k , d — коэффициенты, значения которых представлены в таблице 7.

Таблица 7

Коэффициенты k и d (9)

Свойства бетона (Y)	Коэффициенты (9)	Темп твердения бетонов — критерий R_2/R_{28} по EN 206.1			
		быстрый > 0,5	нормальный 0,3–0,5	медленный 0,15–0,3	очень медленный < 0,15
Предел прочности при сжатии, R	k	< 0,25	0,25–0,43	0,43–0,7	$\geq 0,7$
	d	0,5			
	$[\tau]$	28 сут.			
Аутогенная усадка, $\epsilon_{ку}$	k	$\leq 0,33$	0,3–0,4	> 0,4	—
	d	$\leq 0,65$	0,66–0,9	> 0,9	—
	$[\tau]$	5 сут			

Поскольку и предел прочности бетона при сжатии, и КУ зависят от степени гидратации цемента, закономерно эти величины во времени изменяются по подобным законам, что позволяет предложить классификацию бетонов по кинетике КУ, представленную в таблице 7, в дополнение к известной классификации бетонов по темпу твердения по EN 206.1.

На рис. 2–7 представлены результаты измерения величины КУ цементного камня цемента по таблице 1 в течение 120 ч, в т. ч. с СП.

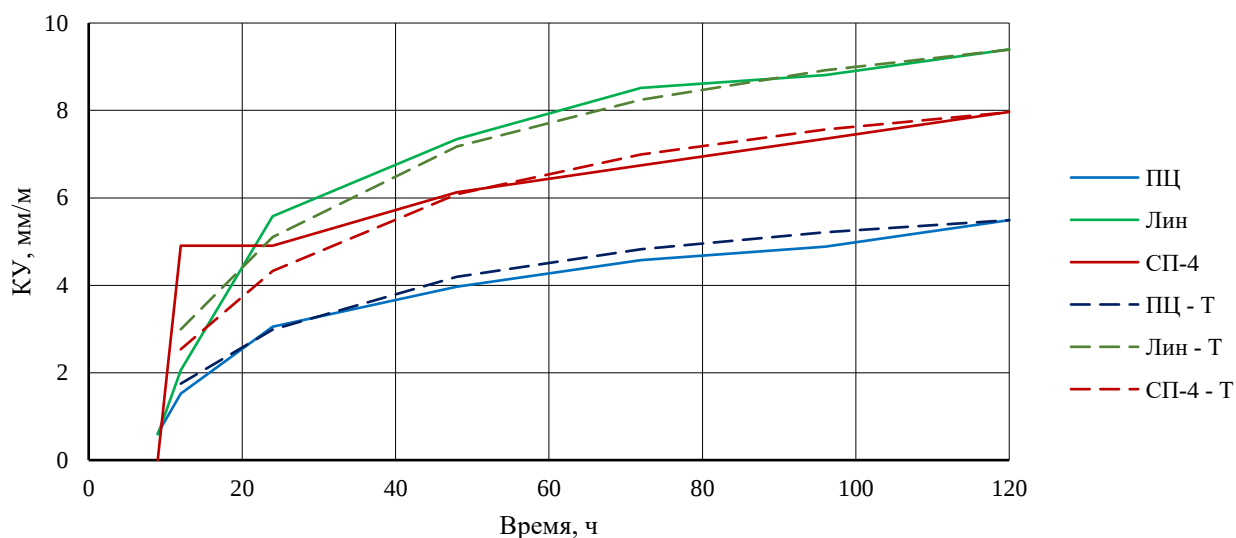


Рис. 2. Изменение во времени КУ ПЦ № 1 по таблице 3:

ПЦ, Лин, СП-4 — соответственно бездобавочный эталон, с добавками Линамикс и СП-4; с индексом Т (9) — для быстрого темпа твердения по таблице 7 ($k = 0,33$; $d = 0,65$)

Из представленных на рис. 2 результатов очевидно, что:

- кинетика КУ ПЦ № 1 практически идеально описывается ф. (9) при $k = 0,33$, $d = 0,65$ (таблица 7);
- в присутствии СП Линамикс величина КУ в возрасте 5 сут возрастает в 1,71 раза, а при СП-4 — в 1,45 раза;
- СП практически не влияют на кинетику КУ, значения $k = 0,33/0,33$, $d = 0,65/0,65$ соответственно СП Линамикс/СП-4.

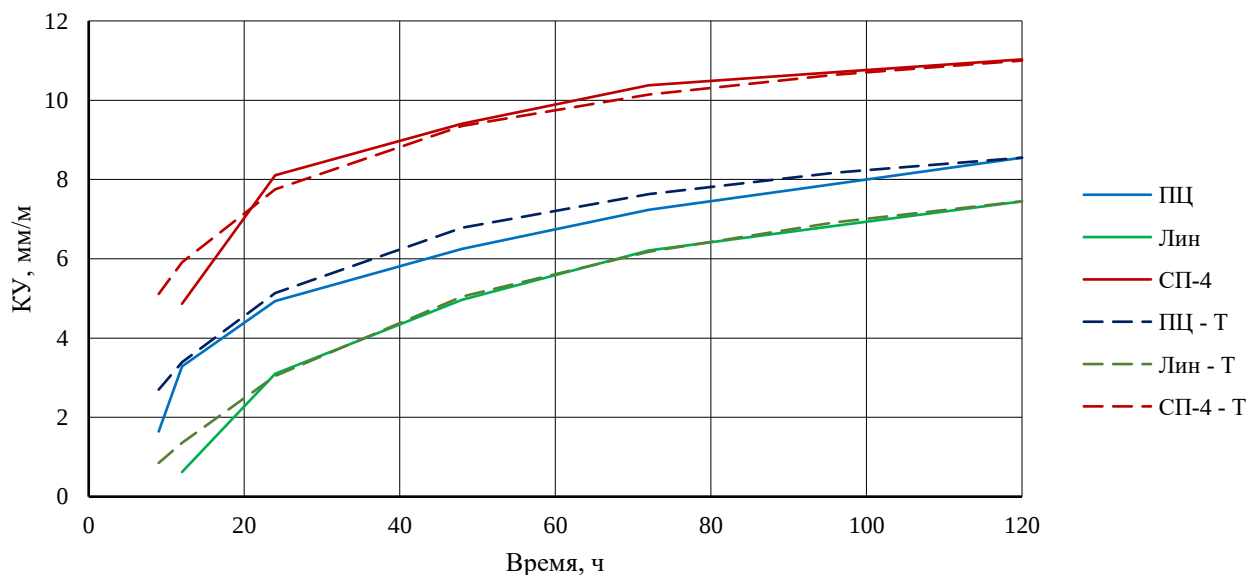


Рис. 3. Изменение во времени КУ ПЦ № 2 по таблице 3:

обозначения те же, что и на рис. 2

Из представленных на рис. 3 результатов очевидно, что:

- кинетика КУ ПЦ № 2 (содержит в качестве минеральной добавки шлак) достаточно хорошо описывается ф. (9) при $k = 0,33$, $d = 0,65$ (таблица 7);
- в присутствии СП Линамикс величина КУ в возрасте 5 сут составляет 0,87 от эталона, а при СП-4 — 1,29;
- СП-4 несколько повышает кинетику КУ значения $k = 0,26$, $d = 0,53$, СП Линамикс замедляет кинетику КУ, значения $k = 0,45$, $d = 0,68$.

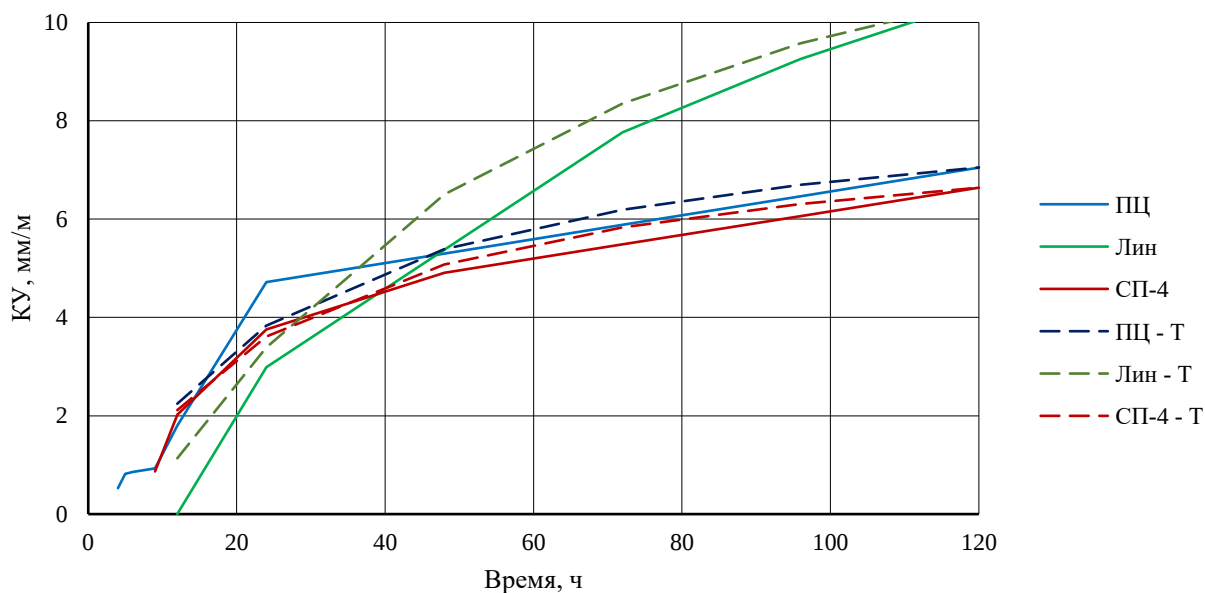


Рис. 4. Изменение во времени КУ ПЦ № 3 по таблице 3:
обозначения те же, что и на рис. 2

Из представленных на рис. 4 результатов очевидно, что:

- кинетика КУ ПЦ № 3 достаточно хорошо описывается ф. (9) при $k = 0,33$, $d = 0,65$ (таблица 7);
- в присутствии СП Линамикс величина КУ в возрасте 5 сут возрастает в 1,48 раза, а при СП-4 — снижается до значения 0,94 относительно бездобавочного эталона;
- СП Линамикс сильно замедляет кинетику КУ значения $k = 0,48$, $d = 0,75$, СП-4 практически не влияет на кинетику КУ значения $k = 0,33$, $d = 0,65$.

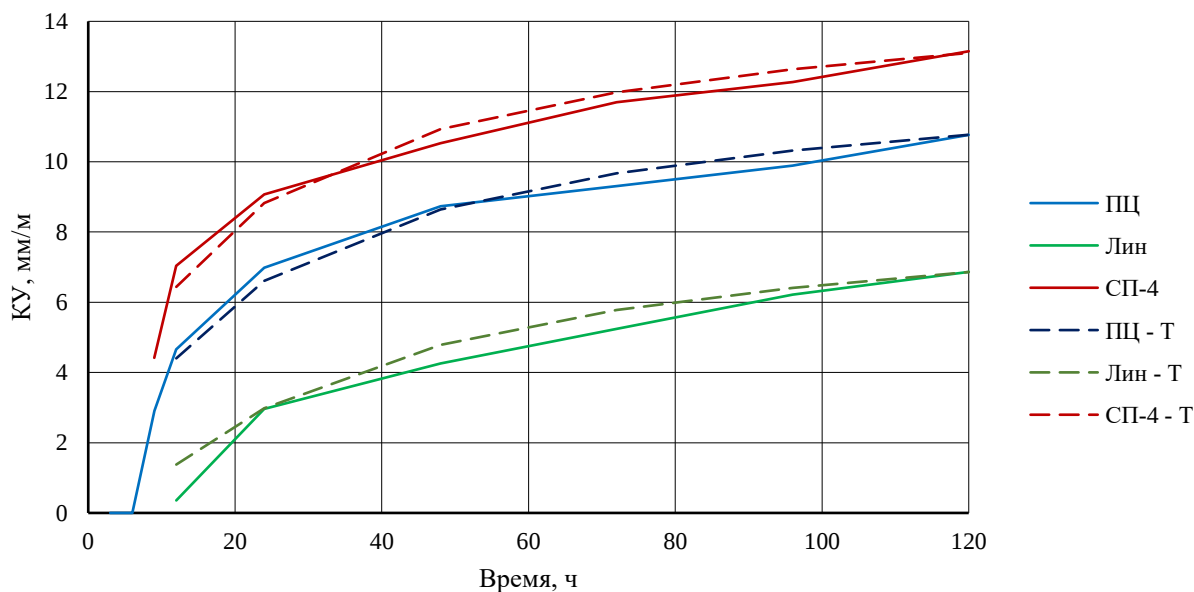


Рис. 5. Изменение во времени КУ ПЦ № 4 по таблице 3:
обозначения те же, что и на рис. 2

Из представленных на рис. 5 результатов очевидно, что:

- кинетика КУ ПЦ № 4 (класс цемента 52,5) достаточно хорошо описывается ф. (9) при $k = 0,3$, $d = 0,6$ (таблица 7);
- в присутствии СП Линамикс величина КУ в возрасте 5 сут снижается до значения 0,64 относительно бездобавочного эталона, а при СП-4 — возрастает в 1,22 раза;
- СП Линамикс замедляет кинетику КУ, значения $k = 0,4$, $d = 0,77$, СП-4 в возрасте до 48 ч резко повышает кинетику КУ значения $k = 0,27$, $d = 0,56$.

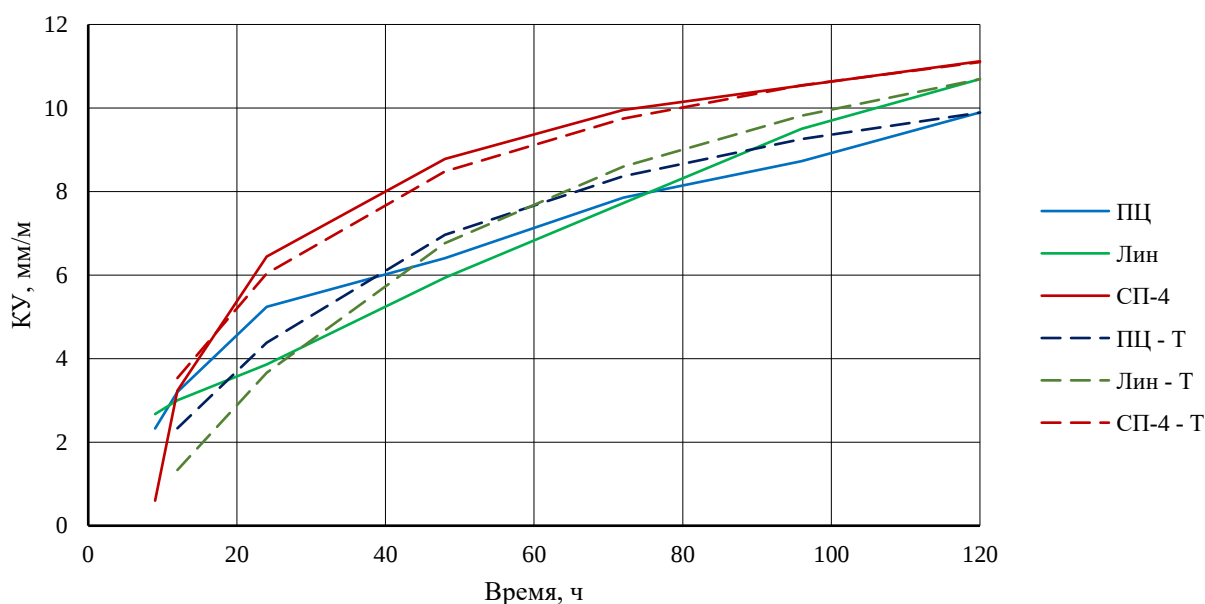


Рис. 6. Изменение во времени КУ ПЦ № 5 по таблице 3:
обозначения те же, что и на рис. 2

Из представленных на рис. 6 результатов очевидно, что:

- кинетика КУ ПЦ № 5 удовлетворительно описывается ф. (9) при $k = 0,36$; $d = 0,70$ (табл. 7);
- в присутствии СП Линамикс величина КУ в возрасте 5 сут возрастает в 1,08 раза, а при СП-4 — в 1,12 раза относительно бездобавочного эталона;
- СП Линамикс замедляет кинетику КУ, значения $k = 0,49$, $d = 0,72$, СП-4 несколько повышает кинетику КУ значения $k = 0,33$, $d = 0,65$.

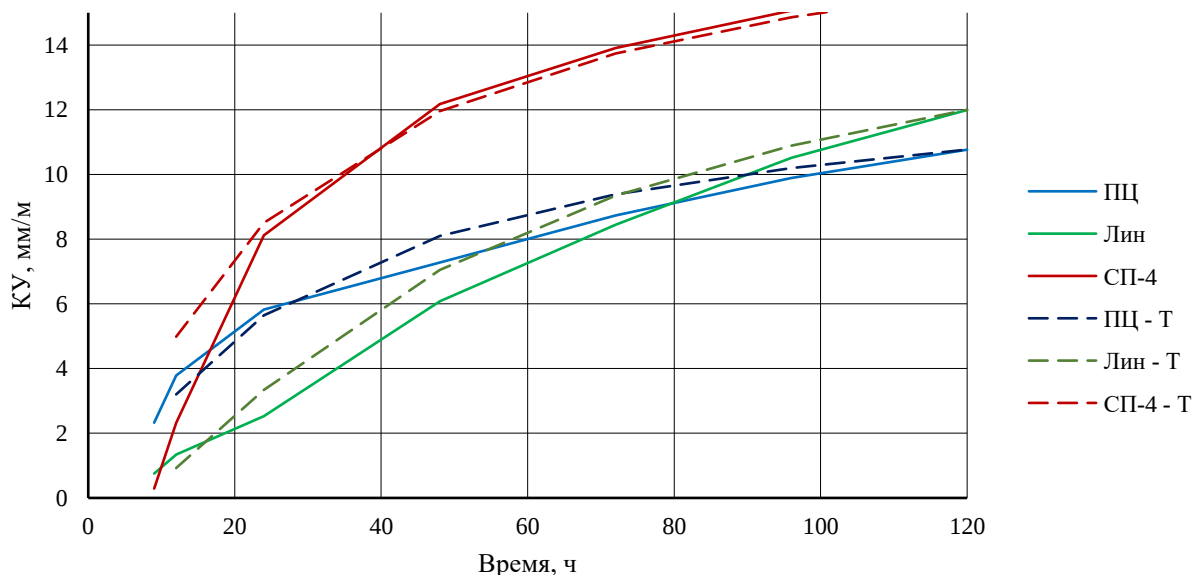


Рис. 7. Изменение во времени КУ ПЦ № 6 по таблице 3:
обозначения те же, что и на рис. 2

Из представленных на рис. 7 результатов очевидно, что:

- кинетика КУ ПЦ № 6 (содержит в качестве минеральной добавки опоку) достаточно хорошо описывается ф. (9) при $k = 0,35$; $d = 0,65$ (таблица 7);
- в присутствии СП Линамикс величина КУ в возрасте 5 сут возрастает в 1,11 раза, а при СП-4 — в 1,45 раза относительно бездобавочного эталона;
- СП Линамикс сильно замедляет кинетику КУ, значения $k = 0,51$, $d = 0,78$, СП-4 практически не влияет на кинетику КУ, значения $k = 0,33$, $d = 0,65$.

Итоговый анализ влияния СП на кинетику КУ представлен в таблице 8.

Таблица 8

Влияние СП на КУ исследованных цементов

Цементы по таблице 3	Показатель цементного камня с добавками	
	КУ _{СП} /КУ _Э в 120 ч	Кинетика КУ
1	1,71/1,45 ¹	не влияет/не влияет
2	0,87/1,29	замедляет/несколько повышает
3	1,48/0,94	сильно замедляет/не влияет
4	0,64/1,12	замедляет/повышает
5	1,08/1,12	замедляет/несколько повышает
6	1,11/1,45	сильно замедляет/практически не влияет

Примечание: 1 — в числителе с Линамикс, в знаменателе с СП-4.

На рис. 8 представлены рассчитанные по (5) значения КУ широко применяемых при возведении монолитных железобетонных конструкций бетонов классов В25–В35 в соответствии с полученными результатами измерения КУ исследованных цементов, в т. ч. с добавками, при различных значениях величины d в (5).

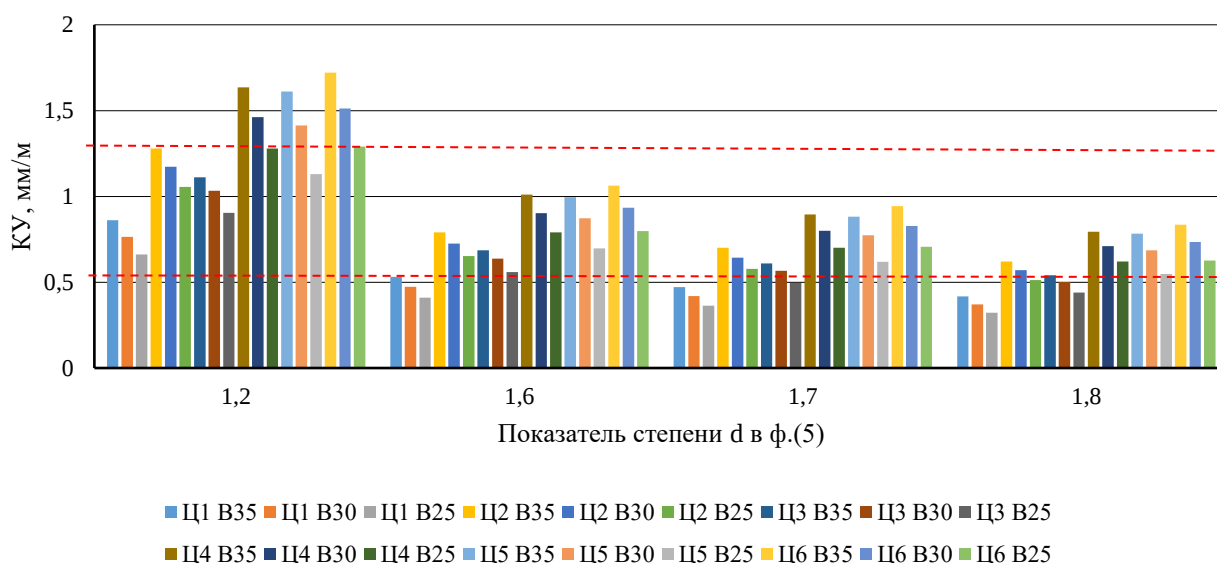


Рис. 8. Расчетные значения КУ бетонов классов В25–В35 на исследованных цементах при различных значениях величины d в (5)

На рис. 8 красным пунктиром обозначены максимальные (1,25 мм/м) и минимальные (0,4 мм/м) значения КУ бетонов по некоторым литературным данным (таблица 2). Очевидно, что наиболее вероятное значение величины d в (6) составляет 1,6–1,8. Исследования в области экспериментального определения КУ бетонов требуют продолжения.

Обсуждение и заключение. Уточнены закономерности изменения величины и кинетики КУ бетонов из высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей с учетом влияния состава и свойств цементов в сочетании с некоторыми СП, широко применяемыми при производстве монолитных железобетонных конструкций в Ростовской области. Исследования, выполненные на шести различных портландцементе четырех производителей в сочетании с широко применяемым СП различного химического состава «ПОЛИПЛАСТ СП-4» и «ЛИНАМИКС ПК» тип 2, подтвердили гипотезу о существенном влиянии химико-минералогического состава цементов и химической основы суперпластификаторов на кинетику и количественные значения характеризующих контракцию величин, в частности, аутогенной усадки, что важно для оценки напряженно-деформированного состояния в ранний период твердения массивных монолитных конструкций.

Получены значения ОК исследованных цементов в 120 ч в диапазоне от 2,93 до 3,43 мл/100 г цемента, что хорошо согласуется с известными литературными данными. Полученные значения соотношений КУ/ОК в диапазоне 0,37–0,74 в 120 ч не противоречат известным данным. При введении СП в состав бетона величина КУ в возрасте 120 ч составила от 0,64 до 1,71 относительно бездобавочного эталона. Влияние СП на кинетику КУ зависит как вида цемента и состава СП.

Расчетные значения КУ бетонов классов В25–В35 из высокоподвижных и самоуплотняющихся бетонных смесей в 120 ч в зависимости от вида цемента и СП составили 0,32–1,06 мм/м, что хорошо согласуется с некоторыми литературными данными.

Список литературы/ References

1. Bjøntegaard Ø. *Basis for and practical approaches to stress calculations and crack risk estimation in hardening concrete structures — State of the art*. Blindern: Sintef; 2011. 142 p. URL: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmliui/bitstream/handle/11250/2411102/coin31.pdf?sequence=1> (accessed: 07.02.2025).
2. Semenov K, Kukolev M, Zaichenko N, Popkov S, Makeeva A, Amelina A. et al. Unsteady temperature fields in the calculation of crack resistance of massive foundation slab during the building period. In: *International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering*. Cham: Springer; 2019. Pp. 455–467.
3. Несветаев Г.В., Чепурненко А.С., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. Оценка некоторых методик для расчета температурных напряжений при бетонировании массивных железобетонных фундаментных плит. *Инженерный вестник Дона*. 2022;7(91). URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_20_7_Nesvetaev_Chepurnenko.pdf_8331ae3d10.pdf (дата обращения 07.02.2025).
4. Nesvetaev GV, Chepurnenko AS, Koryanova YuI, Sukhin DP. Evaluation of some Techniques for Calculating Temperature Stresses during Concreting of Massive Reinforced Concrete Foundation Slabs. *Don Engineering Bulletin*. 2022;7(91). (In Russ.) URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_20_7_Nesvetaev_Chepurnenko.pdf_8331ae3d10.pdf (accessed: 07.02.2025).
5. Sellevold E, Bjøntegaard Ø, Justnes H, Dahl PA. High performance concrete: early volume change and cracking tendency. In: *RILEM International Symposium on Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*. Munich; 1994. Pp. 229–236. URL: https://www.researchgate.net/publication/283349354_High_Performance_Concrete_Early_Volume_Change_and_Cracking_Tendency (accessed: 07.01.2025).
6. Несветаев Г.В., Корчагин И.В., Корянова Ю.И. О контракции портландцемента в присутствии суперпластификатора. *Научное обозрение*. 2014;7(3):842–846. URL: https://www.researchgate.net/publication/366120707_O_KONTRAKCII_PORTLANDCEMENTA_V_PRISUTSTVII_SUPERPLASTIFIKATORA (дата обращения 07.02.2025).
7. Nesvetaev GV, Korchagin IV, Koryanova YuI. On the Contraction of Portland Cement in the Presence of a Superplasticizer. *Scientific Review*. 2014;7(3):842–846. (In Russ.) URL: https://www.researchgate.net/publication/366120707_O_KONTRAKCII_PORTLANDCEMENTA_V_PRISUTSTVII_SUPERPLASTIFIKATORA (accessed: 07.01.2025).
8. Некрасов В.В. Изменение объема системы при твердении гидравлических вяжущих. *Известия Академии наук СССР*. 1945;6:592–610.
9. Nekrasov VV. Changing the Volume of the System during Hardening of Hydraulic Binders. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences*. 1945;6:592–610. (In Russ.)
10. Rasoolinejad M, Rahimi-Aghdam S, Bazant ZP. Prediction of autogenous shrinkage in concrete from material composition or strength calibrated by a large database, as update to model B4. *Materials and Structures*. 2019;52(2):33. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1331-3>
11. Miyazawa S, Tazawa E. Prediction model for autogenous shrinkage of concrete with different type of cement. In: *Proceedings of the 4th international seminar on self-desiccation and its importance in concrete technology*. Gaithersburg: NIST; 2005.
12. Grasley Z, Lange D, Brinks A, D'Ambrosia M. Modeling autogenous shrinkage of concrete accounting for creep caused by aggregate restraint. In: *Proceedings of the 4th international seminar on self-desiccation and its importance in concrete technology*. Gaithersburg: NIST; 2005. Pp. 78–94. URL: https://www.researchgate.net/publication/269575700_Modeling_Autogenous_Shrinkage_of_Concrete_Accounting_for_Creep_Caused_by_Aggregate_Restraint (accessed: 07.01.2025).
13. Powers TC, Brownyard TL. *Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste*. Chicago: Portland Cement Association; 1948. 992 p.
14. Panchenko AI, Kharchenko IYa, Vasiliev SV. Durability of concrete with compensated chemical shrinkage. *Construction materials*. 2019;8:48–53. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-48-53>
15. Khairallah RS. *Analysis of Autogenous and Drying Shrinkage of Concrete*. Hamilton: McMaster University; 2009. 154 p. URL: <https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/9421/1/fulltext.pdf> (accessed: 08.02.2025).
16. Esping O, Löfgren I. *Cracking due to plastic and autogenous shrinkage-investigation of early age deformation of self-compacting concrete-experimental study*. Technical report. Sweden: Chalmers University of Technology; 2005. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27325.36323>

15. Bentz DP, Jensen OM, Hansen KK, Oleson JF, Stang H, Haecker CJ. Influence of cement particle size distribution on early age autogenous strains and stresses in cement-based materials. *Journal of the American Ceramic Society*. 2004;84(1):129–135. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2001.tb00619.x>
16. Koenders EAB, Van Breugel K. Numerical modelling of autogenous shrinkage of hardening cement paste. *Cement and Concrete Research*. 1997;27(10):1489–1499. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00170-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00170-1)
17. Kumarappa DB, Peethamparan S, Ngami M. Autogenous shrinkage of alkali activated slag mortars: Basic mechanisms and mitigation methods. *Cement and Concrete Research*. 2018;109:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.004>
18. Abate SY, Park S, Kim H-K. Parametric modeling of autogenous shrinkage of sodium silicate activated slag. *Construction and Building Materials*. 2020;262:120747. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120747>
19. Gowripalan N. Autogenous Shrinkage of Concrete at Early Ages. In: *ACMSM25. Lecture Notes in Civil Engineering*. Singapore: Springer; 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7603-0_27
20. Holt E. *Early age autogenous shrinkage of concrete*. Espoo: VTT Publications; 2001. 184 p. URL: <https://publications.vtt.fi/pdf/publications/2001/P446.pdf> (accessed: 16.01.2025).
21. Nassif H, Suksawang N, Mohammed M. Effect of curing methods on early-age and drying shrinkage of high-performance concrete. *Transportation research record*. 2003;1834:4858. <https://doi.org/10.3141/1834-07>
22. Soliman AM, Nehdi ML. Effect of drying conditions on autogenous shrinkage in ultra-high-performance concrete at early-age. *Materials and Structures*. 2011;44:879–899. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9670-0>
23. Saje D. Reduction of the Early Autogenous Shrinkage of High Strength Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015;4:310641. <https://doi.org/10.1155/2015/310641>
24. Soliman AM. *Early-Age Shrinkage of Ultra High-Performance Concrete: Mitigation and Compensating Mechanisms*. Electronic Thesis and Dissertation Repository; 2011. 145 p. URL: <https://ir.lib.uwo.ca/etd/145/> (accessed: 17.01.2025).
25. Qin Y, Yi Z, Wang W, Wang D. Time-Dependent Behavior of Shrinkage Strain for Early Age Concrete Affected by Temperature Variation. *Materials Science and Engineering*. 2017;3627251. <https://doi.org/10.1155/2017/3627251>
26. Калиновская Н.Н., Осос Р.Ф., Кучук Е.В. Бетонирование фундаментной плиты турбоагрегата Белорусской АЭС с применением самоуплотняющегося бетона. *Технологии бетонов*. 2017;3–4(128–129):15–19. URL: <http://tehnobeton.ru/pdf/2017-3-4/15-19.pdf> (accessed: 17.01.2025).
- Kalinovskaya NN, Osos RF, Kuchuk EV. Concreting the Foundation Plate of the Turbine Unit of the Belarusian NPP Using Self-sealing Concrete. *Concrete Technologies*. 2017;3–4(128–129):15–19. (In Russ.) URL: <http://tehnobeton.ru/pdf/2017-3-4/15-19.pdf> (accessed: 17.01.2025).
27. Муртазаев С.А.Ю., Сайдумов М.С., Аласханов А.Х., Муртазаева Т.С.А. Высокопрочные бетоны повышенной жизнеспособности для конструкций фундаментов МФК «Ахмат-Тауэр». В: *Сборник докладов международного онлайн-конгресса «Фундаментальные основы строительного материаловедения»*. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова; 2017. С. 875–883. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36305899> (дата обращения 18.01.2025).
- Murtazaev SAYu, Saidumov MS, Alaskhanov AKh, Murtazaeva TSA. High-strength Concretes of Increased Viability for the Structures of the Foundations of the IFC Akhmat Tower. In: *Collection of Reports of the International Online Congress "Fundamentals of Building Materials Science"*. Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhov; 2017. Pp. 875–883, (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36305899> (accessed 18.01.2025).
28. Pickett G. Effect of aggregate on shrinkage of concrete and a hypothesis concerning shrinkage. *ACI Journal*. 1956;52:581–590.
29. Бабков В.В., Баженов Ю.М., Быкова А.А., Галдина В.Д., Гридчин А.М., Иванцов В.А. и др. *Цементы, бетоны, строительные растворы и сухие смеси. Часть I*. Комохов П.Г. (ред.). СПб.: Проффессионал; 2007. 804 с.
- Babkov VV, Bazhenov YuM, Bykova AA, Galdina VD, Gridchin AM, Ivantsov VA. and others. *Cements, Concretes, Mortars, and Dry Mixes. Part I*. Komokhov P.G. (ed.). St. Petersburg: Professional; 2007. 804 p. (In Russ.).
30. Lura P, Jensen OM, Van Breugel K. Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: an evaluation of basic mechanisms. *Cement and Concrete Research*. 2003;33(2):223–232. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00890-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00890-6)

Об авторах:

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

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

Шуть Владимир Валерьевич, магистрант Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), don-com-ru@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

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

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

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

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

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

Vladimir V. Shut, Master's student at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), don-com-ru@mail.ru

Claimed Contributorship:

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

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

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

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

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

Поступила в редакцию / Received 19.02.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 07.03.2025

Принята к публикации / Accepted 12.03.2025

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

CONSTRUCTION MECHANICS



УДК 624.44:539.376

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-54-67>

Примеры тестирования программы моделирования длительного деформирования предварительно напряженных железобетонных балок

П.П. Гайджуров¹ , Э.Р. Исакова² , Н.А. Савельева¹ 

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

² Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация

✉ gpp-161@yandex.ru



EDN: KDXNZY

Аннотация

Введение. В настоящее время в отечественной литературе приведено крайне мало сведений о разработке и применении на практике численных методов исследования напряженно-деформированного состояния бетонных и железобетонных конструкций с учетом ползучести бетона. Как правило, при анализе длительного деформирования подобных конструкций расчетчики применяют эмпирический подход, основанный на использовании коэффициента ползучести. Цель настоящего исследования заключается в верификации и валидации разработанного конечно-элементного алгоритма и соответствующего программного обеспечения на базе имеющихся в литературе результатов экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния предварительно напряженных железобетонных балочных конструкций с учетом ползучести бетона.

Материалы и методы. В качестве математического аппарата для моделирования процесса длительного деформирования железобетонных балочных конструкций применен метод конечных элементов в сочетании с шаговой процедурой численного интегрирования по временной координате результирующего операторно-матричного уравнения. Программный код реализован на базе вычислительной платформы Microsoft Visual Studio и компилятора Intel Parallel Studio XE со встроенным текстовым редактором Intel Visual Fortran Composer XE. Процессы хранения и обработки рабочих массивов реализованы в терминах разреженных матриц. Для визуализации результатов расчетов использована дескрипторная графика компьютерной системы Matlab. Все вычислительные эксперименты выполнены с помощью авторизованного комплекса Polygon. В задачи исследования входит оценка точности предлагаемой методики анализа длительного деформирования железобетонных конструкций при различных способах внешнего силового воздействия, включая эффект предварительного напряжения.

Результаты исследования. Разработана и отлажена программа расчета железобетонных балочных конструкций в трехмерной постановке с использованием дискретной схемы армирования, согласно которой армирующий каркас моделируется стержневыми (балочными) конечными элементами, а массив бетона — объемными. Для определения восстанавливающего усилия, обусловленного натяжением тросовой арматуры на бетон, применена двухмерная конечно-элементная модель, состоящая из ферменных и пружинных конечных элементов. Моделирование длительного деформирования выполнено в рамках теории линейной вязкоупругости в сочетании с принципом наложения воздействий.

Обсуждение и заключение. Выполнен сравнительный анализ результатов натурных и вычислительных экспериментов исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных балок прямоугольного поперечного сечения с пост- и преднапряжением. Предлагаемая методика позволяет выполнить расчет предварительно напряженных железобетонных балочных конструкций при переменном характере квазистатического нагружения с учетом линейной ползучести бетона.

Ключевые слова: метод конечных элементов, ползучесть бетона, предварительное напряжение, железобетонные балочные конструкции

Для цитирования. Гайдзуров П.П., Исхакова Э.Р., Савельева Н.А. Примеры тестирования программы моделирования длительного деформирования предварительно напряженных железобетонных балок. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(1):54–67. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-54-67>

Original Empirical Research

Examples of Testing a Program for Modeling Long-Term Deformation of Prestressed Reinforced Concrete Beams

Peter P. Gaydzhurov¹ , Elvira R. Iskhakova² , Nina A. Savelyeva¹ 

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

² South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov, Novocherkassk, Russian Federation

 gpp-161@yandex.ru

Abstract

Introduction. Currently, there is very little information in the Russian literature on the development and practical application of numerical methods for studying the stress-strain state of concrete and reinforced concrete structures, taking into account the creep of concrete. As a rule, when analyzing the long-term deformation of such structures, calculators apply an empirical approach based on the use of the reduced modulus of deformation in combination with the coefficient of creep. The purpose of this study is to verify and validate the developed finite element algorithm and the corresponding software based on the results of experimental studies of the stress-strain state, prestressed reinforced concrete beam structures, taking into account the creep of concrete, available in the literature.

Materials and Methods. As a mathematical tool for modeling the process of long-term deformation of reinforced concrete girder structures, the finite element method was used in combination with a simple procedure for numerical integration along the time coordinate of the operator-matrix resulting equation. The program code is implemented on the basis of the Microsoft Visual Studio computing platform and the Intel Parallel Studio XE compiler with the built-in Intel Visual Fortran Composer XE text editor. The processes of storing and processing working arrays are implemented in terms of sparse matrices. The descriptive graphics of the Matlab computer system were used to visualize the calculation results. All of the computational experiments were performed using the authorized Polygon complex. The objectives of the study include evaluating the accuracy of the proposed methodology for analyzing the long-term deformation of reinforced concrete structures with various methods of external force action, including the effect of prestressing.

Results. A program for calculating reinforced concrete beam structures in a three-dimensional formulation has been developed and debugged using a discrete reinforcement scheme, according to which the reinforcing frame is modeled by rod (beam), and the concrete array by volumetric finite elements. To determine the restoring force caused by the tension of the cable reinforcement on concrete, a two-dimensional finite element model consisting of truss and spring finite elements is used. The simulation of long-term deformation was performed within the framework of the theory of linear viscoelasticity in combination with the principle of superimposition of influences.

Discussion and Conclusion. A comparative analysis of the results of field and computational experiments on the stress-strain state of reinforced concrete beams of rectangular cross-section with post- and prestress is performed. The proposed method makes it possible to calculate prestressed reinforced concrete girder structures with variable quasi-static loading, taking into account the linear creep of concrete.

Keywords: finite element method, creep of concrete, pre-tensile stress, reinforced concrete girder structures

For citation. Gaydzhurov PP, Iskhakova ER, Savelyeva NA. Examples of Testing a Program for Modeling Long-Term Deformation of Prestressed Reinforced Concrete Beams. *Modern Trends in Construction, Urban Planning and Territorial Planning*. 2025;4(1):54–67. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-54-67>

Введение. Общеизвестно, что бетон на протяжении последних двух столетий является самым распространенным строительным материалом. На основе высокопрочного бетона, конструктивно армированного стальным каркасом, по всему миру возведены сотни уникальных высотных зданий, изготовлены морские платформы для добычи углеводородов, выполнены защитные оболочки атомных реакторов. Без бетона трудно представить существование гидроэнергетики, большепролетных мостов, метрополитена, масштабных автомагистральных развязок и транспортных туннелей. Вместе с тем, в отличие от не менее распространенной в строительстве стали, бетон в значительно большей степени подвержен деформации ползучести, которая существенно зависит от «возраста» связующего материала, размеров конструкции, характера и последовательности приложения или снятия внешней

нагрузки, а также температурно-влажностного состояния среды. Экспериментально установлено, что ползучесть существенно влияет на перераспределение внутренних усилий в бетонных и железобетонных конструкциях. При этом перемещения, обусловленные деформацией ползучести, могут в несколько раз превышать перемещения, вызванные приложением нагрузки в начальный момент времени. В настоящее время накоплен значительный экспериментальный и теоретический материал по ползучести бетона. Вместе с тем известные подходы к расчету бетонных и железобетонных конструкций с учетом ползучести ориентированы главным образом на решение задач с относительно простой геометрией изделия и не учитывают технологической предистории, связанной с образованием начального напряженного состояния и эффекта наследования напряженно-деформированного состояния, обусловленного историей нагружения конструкции. Поэтому актуальной является проблема разработки более общего конечно-элементного алгоритма, реализующего модель упруго ползучего тела, позволяющую учитывать эффект быстро нарастающей ползучести в момент приложения эксплуатационной нагрузки, частичную обратимость деформации ползучести при снятии длительно действовавшей нагрузки (упругое последствие), различные способы и схемы преднапряжения арматуры.

Цель исследования состоит в тестировании авторизованного конечно-элементного программного комплекса путем сравнения полученных результатов с данными других авторов.

Материалы и методы. В соответствии с постулатом Г.Н. Маслова — Н.Х. Арутюняна полную относительную продольную деформацию $\delta(t, \tau)$ бетонного образца призматической формы при сжатии принято представлять в виде суммы [1–4]:

$$\delta(t, \tau) = \frac{1}{E(t)} + C(t, \tau),$$

где τ — параметр, соответствующий «возрасту» бетона; $\frac{1}{E(t)}$ — упруго-мгновенная деформация образца; $E(t)$ — текущее значение модуля деформации; $C(t, \tau)$ — деформация ползучести к моменту времени наблюдения t ($\tau \leq t < \infty$).

Функцию $C(t, \tau)$ принято называть мерой ползучести. В зависимости от вида функции $C(t, \tau)$ деформация ползучести после разгрузки может быть полностью или частично обратимой [5]. Как отмечается в [1, 3, 4] функцию $E(t)$ удобно аппроксимировать зависимостью:

$$E(t) = E_0(1 - \xi e^{-\beta t}),$$

где E_0 — предельное значение модуля упругости бетона «зрелого возраста».

Параметры ξ , входящие в выражение $E(t)$, определяются опытным путем и зависят от состава и условий твердения бетона.

Выражения для функции меры ползучести:

– Н.Х. Арутюняна [1]:

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau)[1 - e^{-\gamma(t-\tau)}]; \quad (1)$$

– С.В. Александровского [3]:

$$C(t, \tau) = \psi(\tau) - \psi(t) \left(\frac{1 - A_2 e^{-\gamma \tau}}{1 - A_2 e^{-\gamma t}} \right) e^{-\gamma(t-\tau)} + \Delta(\tau)[1 - e^{-\alpha(t-\tau)}]. \quad (2)$$

Здесь быстро убывающие функции:

$$\varphi(\tau) = C_1 + \frac{A_1}{\tau}, \psi(\tau) = C_3 + \frac{A_3}{\tau}, \Delta(\tau) = C_1 - C_3 + \frac{A_1 - A_3}{\tau}.$$

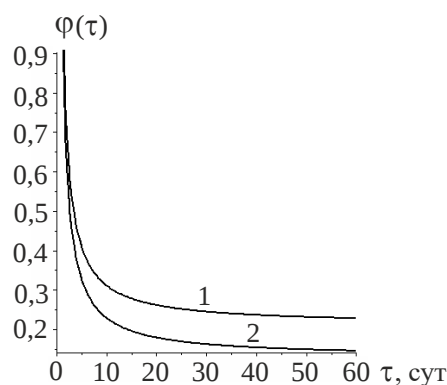
Отметим, что функция $\varphi(\tau)$ была впервые предложена Н.Х. Арутюняном [1]. График функции $\varphi(\tau)$ для различных значений параметров C_1 и A_1 приведен на рис. 1. На этом рисунке кривые $\varphi(\tau)$ при $\tau \rightarrow \infty$ стремятся к предельному значению C_1/A_1 .

Константы в выражениях (1) и (2) в единицах измерения, принятых в [3]:

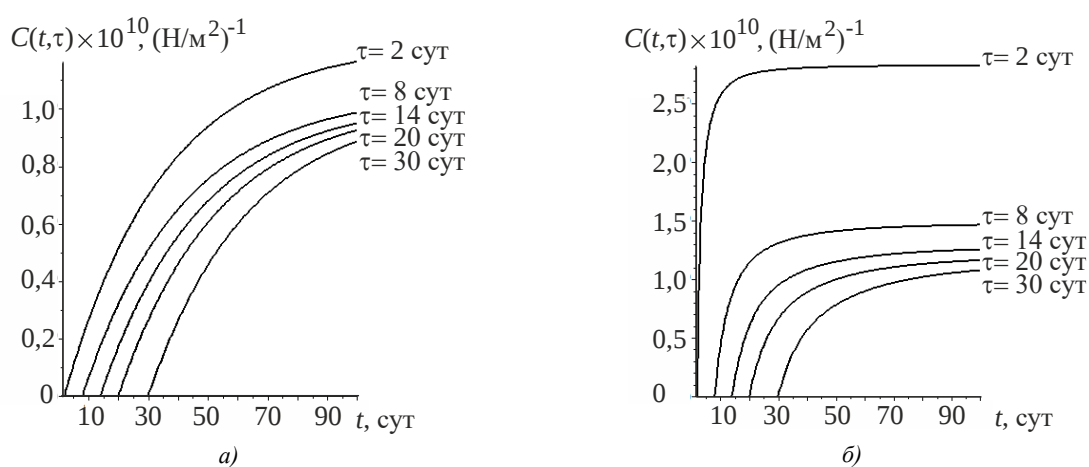
$$\alpha = 6 \text{ сут}^{-1}; \gamma = 0,03 \text{ сут}^{-1}; A_1 = 4,62 \cdot 10^{-5} \frac{\text{сум}}{\text{кгс/см}^2} (4,7095 \cdot 10^{-10} \frac{\text{сум}}{\text{Н/м}^2});$$

$$A_2 = 1; A_3 = 3,416 \cdot 10^{-5} \frac{\text{сум}}{\text{кгс/см}^2} (3,48226 \cdot 10^{-10} \frac{\text{сум}}{\text{Н/м}^2}); C_1 = 0,975 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{кгс} (9,9388 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{Н}); C_3 = 0,756 \cdot 10^{-5,5} \text{ см}^2/\text{кгс} (7,7064 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}).$$

В скобках указаны значения констант, переведенные в систему СИ. График функции $C(t, \tau)$ для различных значений τ в интервале t от 0 до 100 сут при использовании значений констант в системе СИ приведен на рис. 2.

Рис. 1. График $\varphi(\tau) = \frac{1}{A_1} \left(C_1 + \frac{1}{\tau} \right)$:

1 — $C_1 = 0,975 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{кгс}$; $A_1 = 4,62 \cdot 10^{-5} \text{ сут} \cdot (\text{кгс}/\text{см}^2)^{-1}$;
 2 — $C_1 = 0,238 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{кгс}$; $A_1 = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ сут} \cdot (\text{кгс}/\text{см}^2)^{-1}$

Рис. 2. Графики функций $C(t, \tau)$:

а — Н.Х. Арутюняна [1]; б — С.В. Александровского [3]

Сравнивая графики на рис. 2, а и 2, б при $\tau = 2$ сут и $t = 100$ сут, устанавливаем, что величины $C(t, \tau)$, вычисленные по формуле (2), почти в 2,5 раза превышают данные формулы (1). При τ равном 8, 14, 20, 30 сут и $t = 100$ сут значения $C(t, \tau)$, рассчитанные по формулам (1) и (2), мало отличаются. Следует также отметить более резкую начальную крутизну кривых $C(t, \tau)$ на рис. 2, б по сравнению с рис. 2, а.

Для конечно-элементного анализа монолитных железобетонных конструкций с учетом ползучести бетона связь между напряжениями и деформациями представим в операторно-матричной форме:

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

где $\{\sigma(t)\}$, $\{\varepsilon(t)\}$ — векторы-столбцы напряжений и деформаций соответствующие моменту времени t ; $[E(t)]$ — матрица упругости (в общем случае размерностью $6 \times 66 \times 6$); $R\varepsilon_{ij} = \int_{\tau_1}^t R(t, \tau)\varepsilon_{ij}(\tau)d\tau$, $i, j = 1, 3$ — линейный интегральный оператор, устанавливающий соответствие между текущими деформациями ε_{ij} и «историей» длительного деформирования $\varepsilon_{ij}(\tau)$.

В подынтегральном выражении введена так называемая наследственная функция $R(t, \tau)$ [3]. Известно, что от вида наследственной функции зависит реалистичность моделирования процесса ползучести, в частности учет отклика системы при частичном или полном снятии нагрузки. Применительно к теории ползучести бетона наследственного типа различают три основных направления [3, 4]: теория упругой наследственности; теория старения; теория упруго-ползучего тела. Рассмотрим более подробно основные особенности наследственных функций, составляющих основу каждой из перечисленных теорий.

В **теории упругой наследственности** полагается, что при разгрузке происходит полная обратимость (обнуление) деформаций. Наследственная функция в данном случае имеет вид [3]:

$$R(t - \tau) = E_0 C_1 \gamma e^{-\gamma(1 + E_0 C_1)(t - \tau)}, \quad (3)$$

где E_0 — начальный модуль упругости; C_1, γ — константы, определяемые экспериментально по кривым ползучести.

График $R(t, \tau)$, построенный на основании выражения (3) для различных значений параметра τ , приведен на рис. 3. Здесь и далее константы, входящие в (3), приняты такие же как в выражениях (1) и (2). Значение начального модуля упругости бетона $E_0 = 2,55 \cdot 10^{10}$ Н/м². Для построения графика $R(t, \tau)$ использована среда компьютерной математики системы Maple [6].

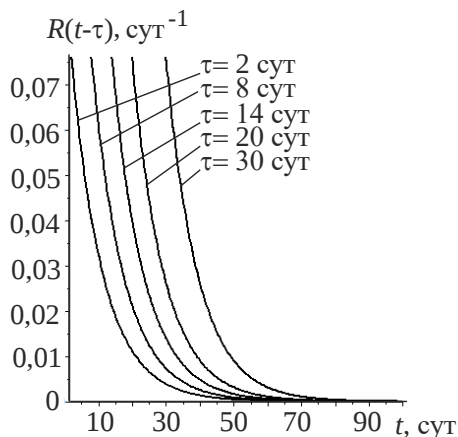


Рис. 3. График $R(t, \tau)$ согласно теории упругой наследственности

Как видно, кривые на рис. 3 для различных значений τ копируют друг друга со смещением. Это объясняется тем, что в выражении (3) модуль упругости принят постоянным, т. е. эффект «старения» материала в данной теории не учитывается. Теория упругой наследственности применима только к «старому» бетону. В этом случае полагается, что деформация ползучести зависит только от продолжительности действующей нагрузки.

Теория старения базируется на предположении о полном отрицании обратимости деформаций ползучести при частичной или полной разгрузке. Выражение для функции $R(t, \tau)$, учитывающее изменение деформационных свойств материала со временем, приведенное в монографии С.В. Александровского [3], имеет вид:

$$R(t, \tau) = \frac{1}{E(t)} \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} \left[E(\tau) e^{-\int_{\tau}^t E(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} C(\tau, \tau_1) d\tau} \right], \quad (4)$$

где $E(t) = E_0(1 - e^{-\beta t})$ — аппроксимация модуля упругих деформаций (параметр $\beta = 0,206$ сут⁻¹); τ_1 — «возраст» бетона в момент загрузки, сут.

Визуализация функции $R(t, \tau)$ в виде графика, выполненная на основании выражения (4) в среде Maple, показана на рис. 4.

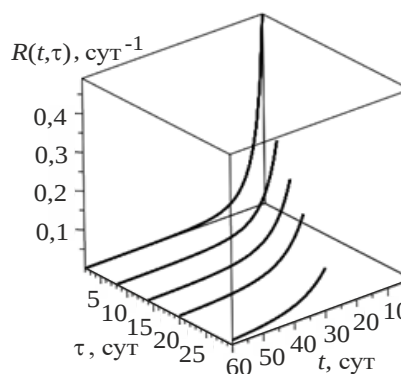
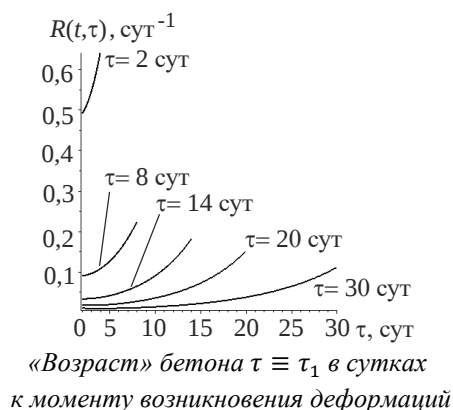


Рис. 4. График $R(t, \tau)$ согласно теории старения

Как отмечается в [3], теория старения применима для расчетов бетонных и железобетонных конструкций при непродолжительном действии нагрузки. Причем в случае разгрузки данная теория приводит к существенному завышению деформаций последствия для «молодого» бетона и занижению этих деформаций для «старого» бетона.

Теория упруго-ползучего тела учитывает частичную обратимость деформаций ползучести при разгрузке. В монографии С.В. Александровского [3] в рамках теории упруго-ползучего тела предложено следующее выражение для наследственной функции бетона:

$$R(t, \tau) \approx -\frac{1}{E(t)} \{ K^2(\tau) F'(\tau) (e^{\gamma\tau} - A_2) - K'(\tau) - [K(\tau) \left(\frac{e^{\gamma\tau} -}{A_2} \right) e^{-\eta(\tau)}] \int_{\tau}^t K(\tau) F'(\tau) e^{\eta(\tau)} d\tau + B_3(t) e^{-\mu(t)(t-\tau)} \}, \quad (5)$$

где $(\dots)' = \partial \dots / \partial \tau$; $B_3(t) = F'(t)(e^{\gamma t} - A_2)[E^2(t) - K^2(t)] - \alpha E^2(t)\Delta(t) + K'(t) - E'(t)$;

$$\mu(t) = \frac{1}{B_3(t)} \{ B_3'(t) + \gamma e^{\gamma t} F'(t)[E^2(t) - K^2(t)] - F''(t)(e^{\gamma t} - A_2)^2 [E^3(t) - K^3(t)] - \alpha E(t)[E(t)\Delta(t)]' - \\ - \alpha^2 E^3(t) \frac{\Delta(t)}{K(t)} + \frac{1}{2} F'(t)(e^{\gamma t} - A_2)[E^2(t) - K^2(t)]' + 2\alpha E^3(t)\Delta(t)F'(t)(e^{\gamma t} - A_2) \};$$

$$K(t) = \frac{E(t)}{1 + \Delta(t)E(t)}.$$

Для быстро убывающей функции $\Delta(t)$ в монографии [3] предложены следующие зависимости:

$$1) \Delta(t) = (0,25 + 0,99^{-\alpha t}) \cdot 10^{-5};$$

$$2) \Delta(t) = C_1 - C_3 + \frac{A_1 - A_3}{t};$$

$$3) \Delta(t) = \left(\frac{80}{t} + 2,714 \right) \cdot 10^{-7};$$

$$4) \Delta(t) = (11,2 + 34 \cdot e^{-0,125 \cdot t}) \cdot 10^{-7}.$$

График функции $\Delta(t)$, построенный с использованием приведенных выражений для $\Delta(t)$, показан на рис. 5. Цифрами обозначены кривые, соответствующие номерам зависимостей $\Delta(t)$.

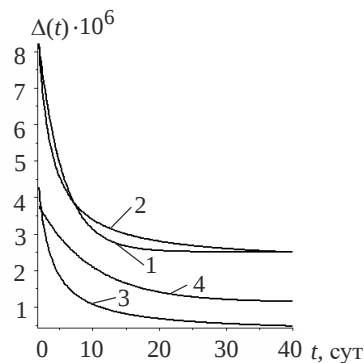


Рис. 5. График функции $\Delta(t)$ для зависимостей 1, 2, 3, 4

Учитывая качественное совпадение кривых $\Delta(t)$ на рис. 5, в дальнейшем будем использовать более универсальную зависимость (2).

Для придания формуле (5) вида, удобного для программирования, применим символьный процессор системы Maple [6]. Кривые функции $R(t, \tau)$ для различного «возраста» бетона, полученные с помощью вычислительной технологии [7], представлены на рис. 6. На рис. 7 приведен аналогичный график $R(t, \tau)$ из монографии [3]. Диапазон изменения параметра τ на рис. 6 и 7 примерно совпадает.

Сравнивая графики $R(t, \tau)$ на рис. 6 и 7, устанавливаем, что кривые наследственной функции при одинаковых значениях параметра τ в пределах визуализации идентичны. Важно отметить, что на кривых $R(t, \tau)$, приведенных на рис. 6, отчетливо прослеживается учет так называемой быстро нарастающей ползучести, наблюдаемой на практике в момент времени $t = \tau + \delta t$, где $\delta t \leq 1$ сут [3].

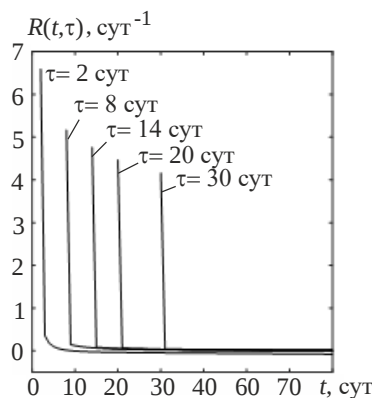


Рис. 6. График $R(t, \tau)$ [7]

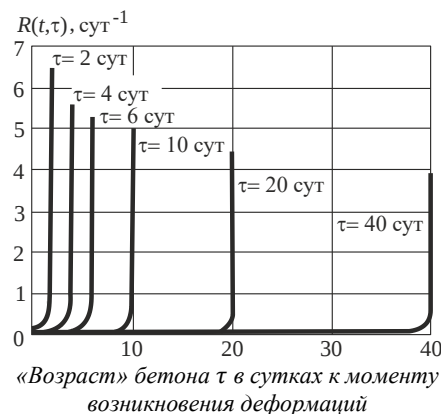


Рис. 7. График $R(t, \tau)$ [3]

Для «старого» бетона в монографии [3] рекомендуется следующее выражение для наследственной функции:

$$R(t - \tau) = A_1 e^{-\rho_1(t-\tau)} + A_2 e^{-\rho_2(t-\tau)}, \quad (6)$$

где:

$$A_1 = \frac{E_0}{\rho_1 - \rho_2} \{ (\gamma \psi_0 + \alpha \Delta_0) [E_0 (\gamma \psi_0 + \alpha \Delta_0) - \rho_2] + \alpha^2 \Delta_0 + \gamma^2 \psi_0 \};$$

$$A_2 = E_0 (\gamma \psi_0 + \alpha \Delta_0) - A_1;$$

$$\rho_{1,2} = \frac{1}{2} \{ \alpha + \gamma + E_0 (\gamma \psi_0 + \alpha \Delta_0) \pm \sqrt{E_0^2 (\gamma \psi_0 + \alpha \Delta_0)^2 + (\alpha - \gamma)^2 - 2E_0 (\gamma \psi_0 - \alpha \Delta_0) (\alpha - \gamma)} \}.$$

При вычислениях $R(t - \tau)$ в выражении (6) принимаем $\Delta(t) = \Delta_0 = const$, $\psi(t) = \psi_0 = const$.

Результаты исследования. В качестве первого тестового примера рассмотрим задачу о длительной деформации призматического бетонного образца цилиндрической формы при сжатии в осевом направлении. Результаты аналогичных физических экспериментов приведены в работе [8]. Диаметр и высота призматического образца, как и в [8], принимались равными 12 см и 30 см соответственно. К свободному торцу образца прикладывалось давление $p = 15$ МПа. Учитывая осевую симметрию геометрии и нагружения при конечно-элементном моделировании, рассматривалась $1/4$ часть призматического образца. Шаг сетки принимался равномерным и равным 1 см. При назначении граничных условий на торцах призмы вводились связи, препятствующие радиальным перемещениям. Таким образом, узлы свободного торца имеют только одну степень свободы в виде осевого перемещения u_z .

Для расчетов используем авторизированный комплекс Polygon [9, 10]. Полученные графики $u_z \sim t$ для двух моделей бетона и двух схем нагружения приведены на рис. 8. Начальный модуль упругости бетона $E = 2,8 \cdot 10^4$ МПа. Время наблюдения 200 сут. На правой части рис. 8 показан график $u_z \sim t$ для режима нагружения и полной разгрузки при $t = 60$ сут.

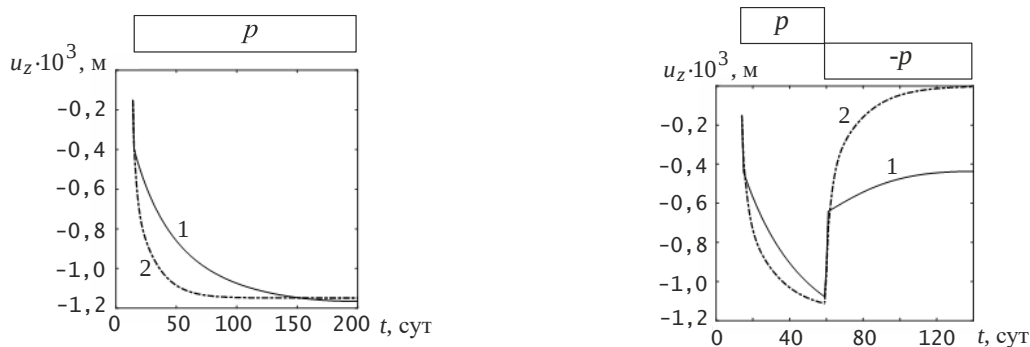


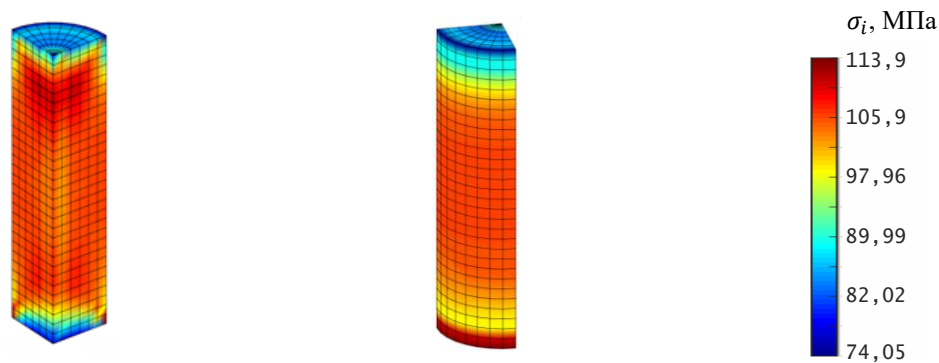
Рис. 8. Графики перемещения u_z призматического образца:
1 — модель упруго-ползучего тела (5); 2 — модель «старого» бетона (6)

Как видно, для модели «старого» бетона (6) при разгрузке имеет место полная обратимость деформации ползучести.

Визуализация распределения полей осевых перемещений u_z и интенсивности напряжений σ_i для модели упруго-ползучего тела (5) и момента времени $t = 60$ сут. представлена на рис. 9 и 10.



Рис. 9. Картина распределения u_z в $1/4$ призматического образца при $t = 60$ сут

Рис. 10. Картина распределения σ_i в 1/4 призматического образца при $t = 60$ сут

На рис. 10 отчетливо прослеживается влияние принятых граничных условий на распределение напряжений по высоте призмы. Наибольшая концентрация $\sigma_i = 113,9$ МПа наблюдается на нижнем торце образца.

Для исследования точности разработанного математического и программного обеспечения использованы результаты натурных экспериментов на длительную ползучесть двухопорных балок при двухточечном нагружении, приведенные в [11]. В данных экспериментах предварительно напряженные железобетонные балки подвергались длительному (в течение 4,5 лет) силовому воздействию. Поддержание постоянной нагрузки $F = \text{const}$ обеспечивалось гидравлическими домкратами.

Схема нагружения и варианты сечений балок приведены на рис. 11 и 12 соответственно (размеры указаны в миллиметрах).

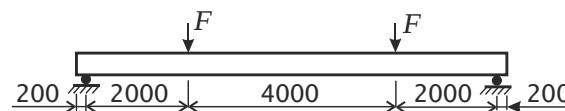


Рис. 11. Схема нагружения балки

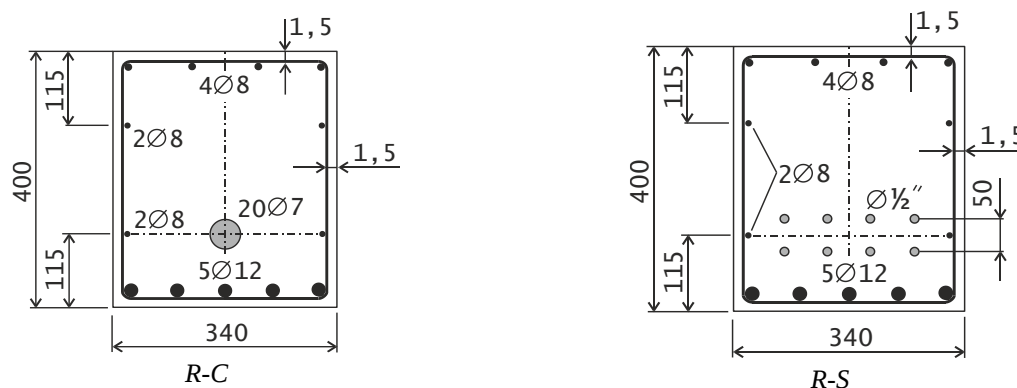


Рис. 12. Сечения балок серий R-C и R-S в середине пролета [11]

На этих рисунках показаны схемы размещения «фоновой» продольной и «активной» предварительно напряженной арматуры.

Согласно данным [11] в балках серии R-C создавалось начальное напряженное состояние путем обжатия бетона в «возрасте» 28 суток по торцам с помощью тросовой арматуры. Это так называемые балки с пост напряжением. Трос состоял из двадцати прядей номинальным диаметром 7,2 мм (площадь поперечного сечения одной пряди 38,70 мм²). Схема траектории «активного» армирования балки серии R-C представлена на рис. 13. При тестировании рассматривался вариант балки с параметрами: $a = 0,115$ м; $b = 0,227$ м. Предел прочности при растяжении для отдельной нити пряди f_{ptk} составляет 1770 МПа.

Преднапряжение в балке серии R-S создавалось по схеме натяжения арматуры на упоры. Через 28 суток после укладки бетона в соответствующую форму «активная» арматура «снималась» с упоров, и в балке возникало начальное напряженное состояние.

Напряжение в «активной» арматуре для балок серии R-C и R-S назначалось, исходя из условия:

$$\sigma = 0,7f_{ptk}.$$

Тогда для балки серии R-C имеем:

$$F_{pr} = \sigma n A_{R-C} = 0,7 \cdot 1770 \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 38,7 \cdot 10^{-6} = 959 \text{ кН},$$

где n — число прядей троса ($n = 20$); A_{R-C} — площадь поперечного сечения пряди троса.

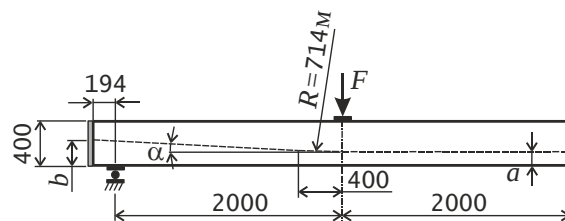


Рис. 13. Схема траектории «активного» армирования 1/2 части балки серии R-C

Для качественной и количественной оценки восстанавливающего эффекта, обусловленного натяжением троса в балке серии R-C, используем вспомогательную двухмерную конечно-элементную модель. Данная модель образована из ферменных и пружинных конечных элементов (рис. 14). При этом вертикальные реакции в пружинных элементах r_i эквивалентны дискретным значениям восстанавливающих усилий.

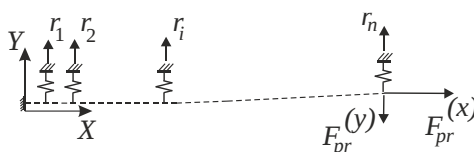
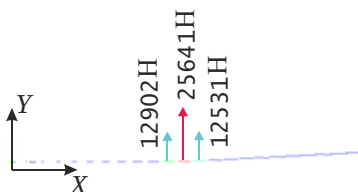


Рис. 14. Схема для определения восстанавливающей силы

В результате моделирования получаем: $F_{pr}^{(x)} = 958$ кН; $F_{pr}^{(y)} = 51,1$ кН. Эпюра распределения восстанавливающих усилий F_{rest} приведена на рис. 15.


 Рис. 15. Эпюра восстанавливающих усилий F_{rest}

Преднапряжение в балке серии R-S создается восемью тросами $\varnothing 1/2'$. Номинальный диаметр каждого троса 10,9 мм (площадь сечения 93,3 мм²). Для данной серии усилие натяжения определяем по формуле:

$$F_{pr} = 0,7 \cdot 1860 \cdot 10^{-6} \cdot 93,3 \cdot 10^{-6} = 121,4 \text{ кН}.$$

Полагаем, что усилие q_{np} от предварительно растянутого троса в балке серии R-S действует на участке длиной $l_p = 15 \cdot d$, где d — диаметр арматуры (рис. 16). Величину q_{np} определяем как отношение F_{pr}/l_p .

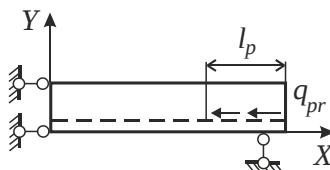


Рис. 16. Схема преднапряжения в балке серии R-S

Расчетная схема для 1/2 части балки серии R-C и соответствующая конечно-элементная модель с выделением массива бетона и арматурного каркаса приведены на рис. 17 и 18 соответственно. Величина силы, прикладываемой к 1/2 части балки, $F_{sust} = 63,75$ кН. Для уменьшения концентрации напряжений в зонах приложения силы и опоре введены площадки толщиной 10 см. Материал площадок — сталь.

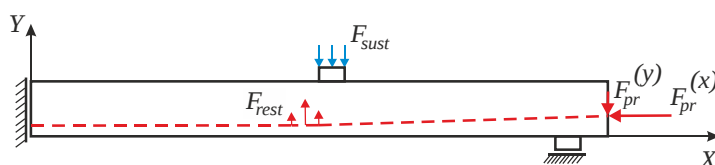


Рис. 17. Расчетная схема 1/2 части балки серии R-C

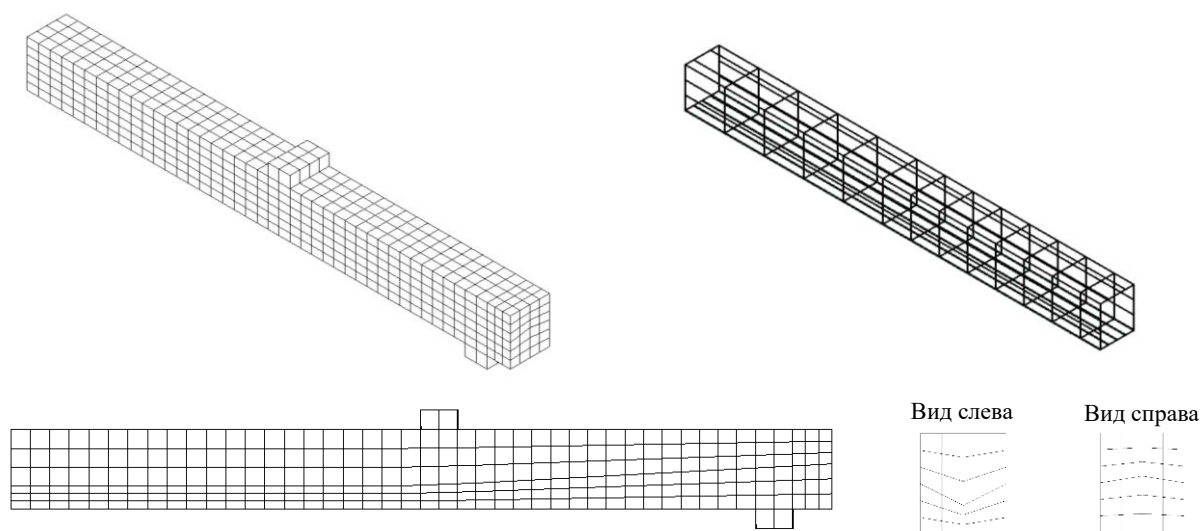


Рис. 18. Конечно-элементная модель 1/2 части балки серии R-C

Расчетная схема для 1/2 части балки серии R-S и соответствующая конечно-элементная модель с выделением массива и арматурного каркаса показаны соответственно на рис. 19 и 20.

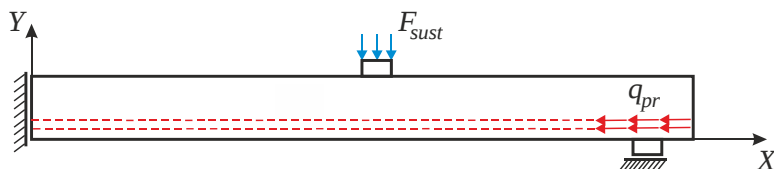


Рис. 19. Расчетная схема 1/2 части балки серии R-S

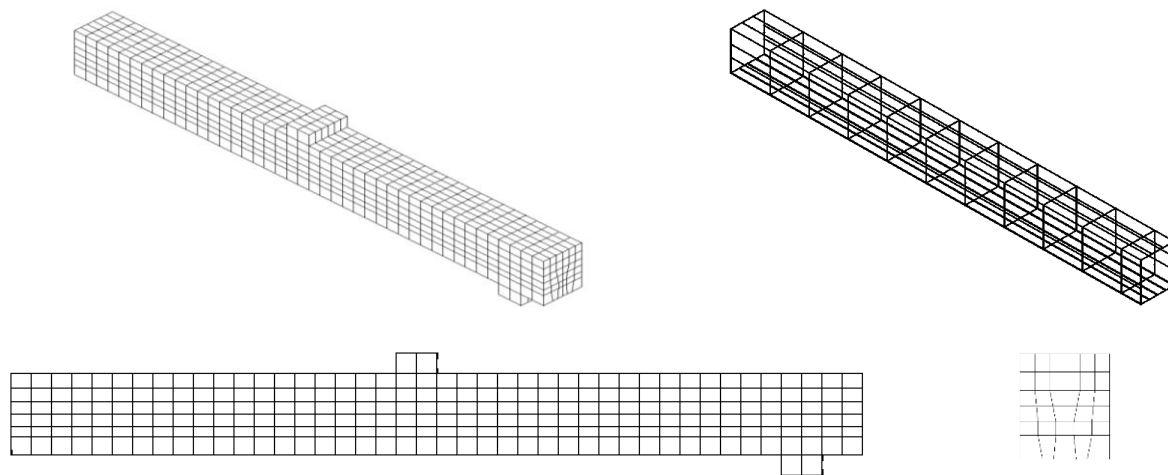


Рис. 20. Конечно-элементная модель 1/2 части балки серии R-S

Результаты конечно-элементного моделирования изменения прогиба u_y в центре пролета балок серий R-C и R-S на этапах преднапряжения в «возрасте» бетона 14 сут и нагружения силой F_{sust} в момент времени 28 сут представлены на рис. 21, а. Расчетное время наблюдения составило 100 сут. На рис. 21, б приведены графики $u_y \sim t$, полученные экспериментально [11].

Как видно из рис. 21, а и 21, б, значения прогибов, полученные численно и экспериментально, в моменты времени 28 сут и 100 сут практически совпадают.

Визуализация полей продольных σ_{xx} и касательных σ_{xy} напряжений для балки серии R-C (момент времени 100 сут) показана на рис. 22 и 23. Аналогичные картины распределения напряжений σ_{xx} и σ_{xy} для балки серии R-S приведены на рис. 24 и 25. На рис. 22–25 представлены фрагменты балки, соответствующие участку $0 \leq x \leq 3,71$ м, т. е. без зоны опирания.

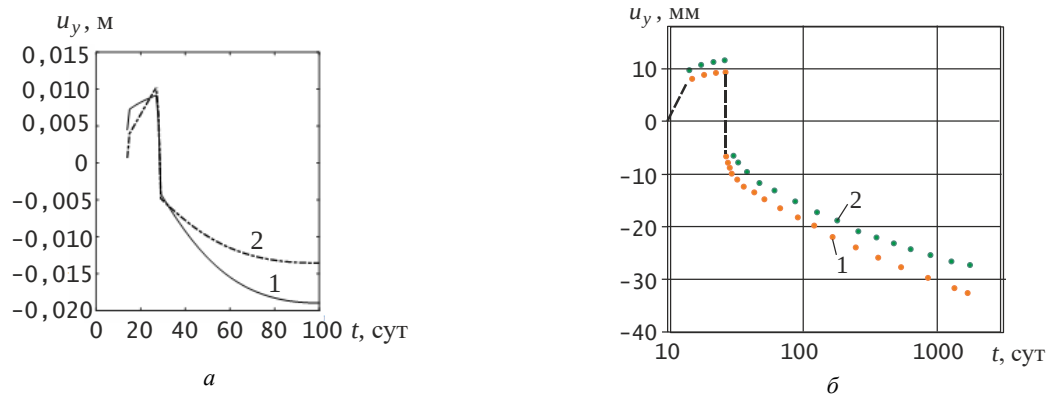


Рис. 21. Графики $u_y \sim t$: 1 — балка серии R-C; 2 — балка серии R-S

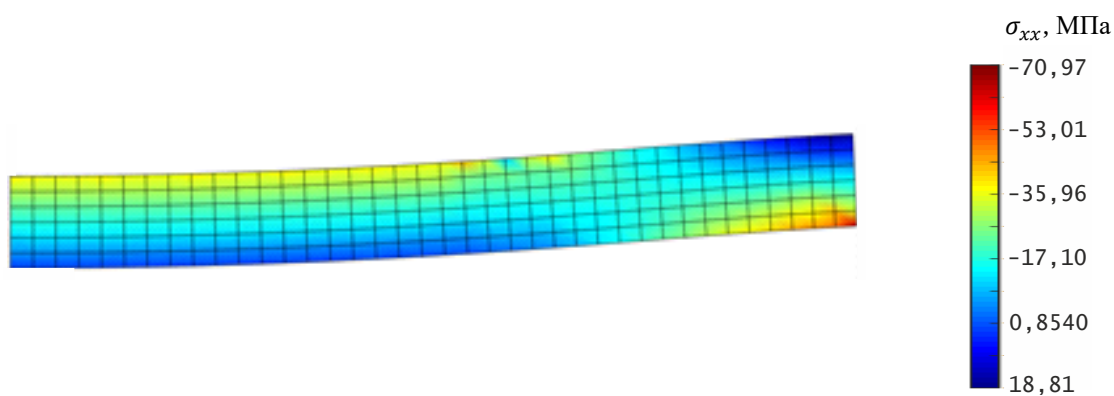


Рис. 22. Визуализация распределения σ_{xx} для балки серии R-C, $t = 100$ сут

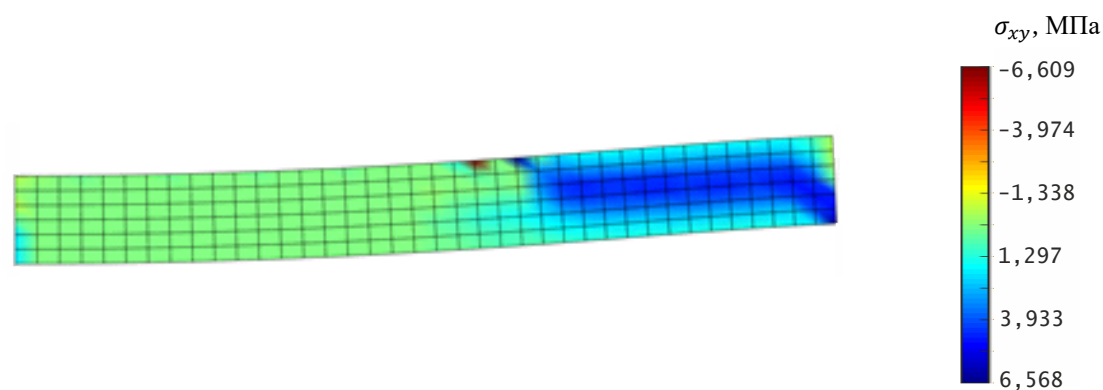


Рис. 23. Визуализация распределения σ_{xy} для балки серии R-C, $t = 100$ сут

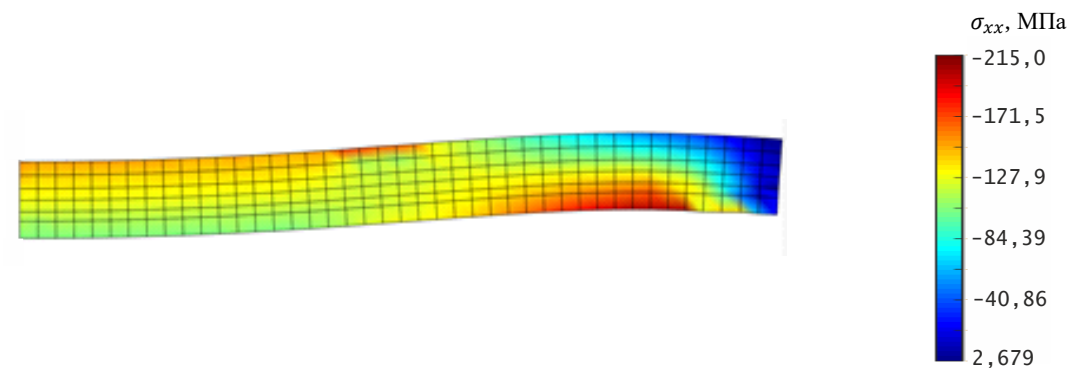


Рис. 24. Визуализация распределения σ_{xx} для балки серии R-S, $t = 100$ сут

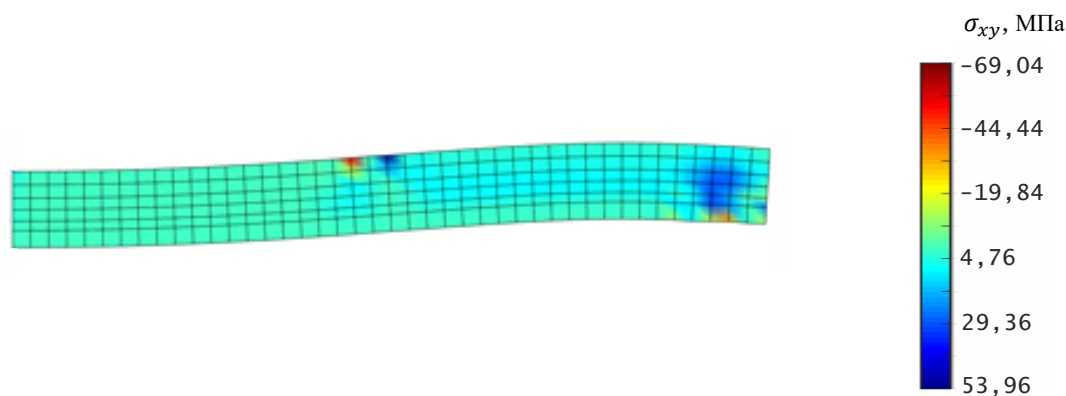


Рис. 25. Визуализация распределения σ_{xy} для балки серии R-S, $t = 100$ сут.

Из приведенных результатов видно, что эффект от предварительного напряжения у балки серии R-S является более выраженным, чем у балки серии R-C. Так, у балки серии R-C при нагружении заданной силой F_{sust} в нижнем слое образуются растягивающие напряжения $\sigma_{xx} = 18,8$ МПа, в то время как в балке серии R-S при такой же нагрузке в этой области наблюдаются сжимающие напряжения порядка 100 МПа.

Определенный интерес представляет картина распределения напряжений σ_{xy} для рассмотренных схем балок (рис. 23 и 25). Сравнивая данные на рис. 23 и 25, устанавливаем, что более однородное поле напряжений σ_{xy} соответствует балке серии R-S. Незначительные возмущения в распределении σ_{xy} для этой балки наблюдаются в месте приложения нагрузки и области, прилегающей к опоре. При этом следует отметить, что фоновое армирование для балок обеих серий назначалось практически идентичным.

Обсуждение и заключение. Таким образом, анализ распределения перемещений и напряжений в рассмотренных железобетонных балках с учетом ползучести бетона и предварительного напряжения, создаваемого треновой арматурой, позволяет сделать следующее заключение.

1. Распределенная схема «фоновой» армирования с физической точки зрения позволяет наиболее реалистично моделировать совместную работу армирующего каркаса и бетонного массива.
2. Предложенная концепция определения восстанавливающего усилия, обусловленного натяжением «активной» арматуры, может быть реализована в программных комплексах ANSYS, Лира САПР и SCAD Office, сертифицированных Российской академией архитектуры и строительных наук.
3. Установлено, что значения прогибов рассмотренных балок, полученные численно и экспериментально, для моментов времени 28 сут и 100 сут практически совпадают.
4. Анализ полей продольных и касательных напряжений в балках серии R-C и R-S для момента времени 100 суток выявил существенное влияние схемы «активного» армирования на несущую способность исследуемых конструкций в плане появления растягивающих напряжений в бетоне.

Разработанное математическое и программное обеспечение позволяет повысить точность и надежность прочностных расчетов монолитных предварительно напряженных балочных конструкций из железобетона.

Список литературы / References

1. Арутюнян Н.Х. *Некоторые вопросы теории ползучести*. М.: Гостехтеоретиздат; 1952. 323 с.
Harutyunyan NH. *Some Issues of the Theory of Creep*. Moscow: Gostekhtheoretizdat; 1952. 323 p. (In Russ.).
2. Арутюнян Н.Х., Зевин А.А. *Расчет строительных конструкций с учетом ползучести*. М.: Стройиздат; 1988. 256 с.
Harutyunyan NH, Zevin AA. *Calculation of Building Structures Considering Creep*. Moscow: Stroyizdat; 1988. 256 p. (In Russ.).
3. Александровский С.В. *Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учетом ползучести*. М.: Стройиздат; 1973. 432 с.
Aleksandrovsky SV. *Calculation of Concrete and Reinforced Concrete Structures for Temperature and Humidity Changes Considering Creep*. Moscow: Stroyizdat; 1973. 432 p. (In Russ.).
4. Прокопович И.Е., Зедгенидзе В.А. *Прикладная теория ползучести*. М.: Стройиздат; 1980. 240 с.
Prokopovich IE, Zedgenidze VA. *Applied Theory of Creep*. Moscow: Stroyizdat; 1980. 240 p. (In Russ.).
5. Харлаб В.Д. *Принципиальные вопросы линейной теории ползучести (с привязкой к бетону)*. СПб.: СПбГАСУ; 2014. 207 с.
Kharlab VD. *Fundamental Issues of the Linear Theory of Creep (in Relation to Concrete)*. St. Petersburg: SPbGASU; 2014. 207 p. (In Russ.).

6. Дьяконов В.П. *Математическая система MAPLE V R3/R4/R5*. М.: СОЛОН; 1998. 399 с.
Dikopov VP. *The MAPLE Mathematical System in R3/R4/R5*. Moscow: SOLON; 1998. 399 p. (In Russ.).
7. Гайджуров П.П., Исакова Э.Р. Модели теории ползучести бетона и их конечноэлементная реализация. *Вестник ДГТУ*. 2012;7:99–107. URL: <https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/654/653> (дата обращения 05.01.2025).
Gaydzhurov PP, Iskhakova ER. *Models of Concrete Creep Theory and their Finite Element Implementation*. Bulletin of DSTU. 2012;7:99-107. (In Russ.) URL: <https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/654/653> (accessed: 05.01.2025).
8. Ross AD. Creep of Concrete under Variable Stress. *Journal of the American concrete institute*. 1958;54(3): 739–758. <https://doi.org/10.14359/11466>
9. Гайджуров П.П., Исакова Э.Р. *Конечноэлементное решение плоской задачи теории наследственного старения бетона с учетом принципа наложения воздействий и быстронабегающей ползучести материала (Polygon)*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 201462079. 2014.
Gaydzhurov PP, Iskhakova ER. *Finite Element Solution of the Planar Issue of the Theory of Hereditary Aging of Concrete Considering the Principle of Superposition of Impacts and Fast-Moving Creep of the Material (Polygon)*. Certificate of State Registration of the Computer Program No. 201462079. 2014. (In Russ.).
10. Гайджуров П.П., Исакова Э.Р., Савельева Н.А. Численное моделирование объемного напряженно-деформированного состояния предварительно напряженных железобетонных конструкций с учетом ползучести бетона. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2023;2:17–24. <http://dx.doi.org/10.17213/1560-3644-2023-2-17-24>
Gaydzhurov PP, Iskhakova ER, Savelyeva NA. Numerical Modeling of the Volumetric Stress-Strain of Prestressed Reinforced Concrete Structures Considering the Creep of Concrete. News of higher educational institutions. *The North Caucasus region. Technical Sciences*. 2023;2:17-24. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.17213/1560-3644-2023-2-17-24>
11. Reybrouck N, Van Mullem T, Taerwe L, Caspeele R. Influence of long-term creep on prestressed concrete beams in relation to deformations and structural resistance: Experiments and modeling. *Structural Concrete*. 2020;21(4):1458–1474. <https://doi.org/10.1002/suco.201900418>

Об авторах:

Гайджуров Петр Павлович, доктор технических наук, профессор кафедры строительной механики и теории сооружений Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID, gpp-161@yandex.ru](mailto:gpp-161@yandex.ru)

Исакова Эльвира Рашидовна, кандидат технических наук, ассистент кафедры градостроительства, проектирования зданий и сооружений Южно-Российского государственного политехнического университета им. М.И.Платова (НПИ) (346428, Российская Федерация, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), [ORCID, elvira.ishakova@yandex.ru](mailto:elvira.ishakova@yandex.ru)

Савельева Нина Александровна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры строительной механики и теории сооружений Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID, ninasav86@mail.ru](mailto:ninasav86@mail.ru)

Заявленный вклад авторов:

П.П. Гайджуров: постановка задачи, выбор метода решения, обсуждение результатов.

Э.Р. Исакова: написание кода и отладка программного обеспечения, подготовка исходных данных для численного моделирования.

Н.А. Савельева: разработка математической модели ползучести бетона, подготовка текста, формулирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Peter P. Gaydzhurov, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Structural Mechanics and Theory of Structures, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID, gpp-161@yandex.ru](mailto:gpp-161@yandex.ru)

Elvira R. Iskhakova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Urban Planning, Design of Buildings and Structures, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI) (132 Prosveshcheniya St., Novocherkassk, 346428, Russian Federation), [ORCID, elvira.ishakova@yandex.ru](mailto:elvira.ishakova@yandex.ru)

Nina A. Savelyeva, Cand.Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Structural Mechanics and Theory of Structures, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID, ninasav86@mail.ru](mailto:ninasav86@mail.ru)

Claimed contributorship:

PP Gaydzhurov: basic concept formulation, selecting the solution method, analysis and generalization of the research results.

ER Iskhakova: writing and fixing the software code, preparing the original data for numerical modelling.

NA Savelyeva: developing the mathematical model of concrete creep, working with the text of the manuscript, analysis and generalization of the research results.

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

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

Поступила в редакцию / Received 14.01.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 30.01.2025

Принята к публикации / Accepted 08.02.2025

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES



УДК 697.1, 697.3

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-68-75>



EDN: ZJATYD

Разработка структуры жизненного цикла системы отопления строительного объекта

Е.П. Лысова , О.Н. Парамонова 

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

✉ katerina.lysova0803@gmail.com

Аннотация

Введение. Система отопления является неотъемлемой частью строительного объекта. В статье авторы исследуют жизненный цикл системы отопления — сложной системы инженерно-технического обеспечения зданий и сооружений, элементы которой должны стабильно, эффективно и полноценно функционировать на протяжении отопительного периода в течение всего срока эксплуатации. Продуктивная работа системы отопления закладывается на этапе ее проектирования, монтажа, корректируется и поддерживается на этапах эксплуатации и модернизации. Следовательно, изучение жизненного цикла системы отопления представляет собой важную научную и практическую задачу, а управление этапами жизненного цикла становится важным, т.к. позволяет обеспечить эффективность, технологичность, экономичность и надежность. Цель работы — создать модель жизненного цикла для эффективного управления его этапами и стадиями.

Материалы и методы. Авторы разработали структуру жизненного цикла системы отопления зданий, используя методы аналогии, сравнительного анализа и синтеза на основе научных и практических результатов исследований. Исследование сфокусировано на системе водяного отопления жилых и общественных зданий.

Результаты исследования. Исследование системы отопления помогло выделить пять этапов ее функционирования (предпроектная подготовка, проектирование, эксплуатация, модернизация и утилизация) и создать структуру жизненного цикла. В дальнейшем это дает возможность создать энергоэффективную, надежную и экономичную систему, отвечающую современным требованиям эксплуатации, повысить качество ее обслуживания, а также упростить процесс управления ею.

Обсуждение и заключение. Жизненный цикл системы отопления включает все этапы от проектирования до модернизации. Грамотное управление этими этапами обеспечивает эффективную работу системы, повышая комфорт и снижая расходы. Комплексный подход к управлению позволяет максимально использовать потенциал отопления. Системное исследование каждого этапа помогает выбрать оптимальную систему, соответствующую критериям эффективности, безопасности и экономичности. Структура жизненного цикла позволяет создать единую цифровую модель для интеллектуального управления объектом на всех стадиях.

Ключевые слова: жизненный цикл, система отопления, управление жизненным циклом, строительный объект

Для цитирования. Лысова Е.П., Парамонова О.Н. Разработка структуры жизненного цикла системы отопления строительного объекта. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(1):68–75. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-68-75>

Development of the Structure of the Life Cycle of the Heating System of a Construction Facility

Ekaterina P. Lysova , Oksana N. Paramonova 

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

✉ katerina.lysova0803@gmail.com

Abstract

Introduction. The heating system is an integral part of the construction site. In the article, the author explores the life cycle of a heating system, a complex system of engineering and technical support for buildings and structures, the elements of which must function stably, efficiently and fully throughout the heating period during the entire service life. The productive operation of the heating system is laid at the stage of its design, installation, adjusted and maintained at the stages of operation and modernization. Therefore, studying the life cycle of a heating system is an important scientific and practical task, and managing the stages of the life cycle becomes important, as it allows for efficiency, adaptability, cost-effectiveness and reliability.

Materials and methods. The authors have developed the structure of the life cycle of a building heating system using methods of analogy, comparative analysis and synthesis based on scientific and practical research results. The study focuses on the water heating system of residential and public buildings. The purpose of the work is to create a model of the life cycle for effective management of its stages and stages.

Results. The study of the heating system helped to identify five stages of its operation (pre-design, design, operation, modernization and disposal) and to create a life cycle structure. In the future, this will make it possible to create an energy-efficient, reliable and economical system that meets modern operational requirements, improve the quality of its maintenance, and simplify the management process.

Discussion and conclusion. The life cycle of a heating system includes all stages from design to modernization. Proper management of these stages ensures efficient operation of the system, increasing comfort and reducing costs. An integrated management approach makes it possible to maximize the heating potential. A systematic study of each stage helps to choose the optimal system that meets the criteria of efficiency, safety and cost-effectiveness. The structure of the life cycle allows one to create a single digital model for intelligent management of an object at all stages.

Keywords: life cycle, heating system, life cycle management, construction site

For citation. Lysova EP, Paramonova ON. Development of the Structure of the Life Cycle of the Heating System of a Construction Facility. *Modern Trends in Construction, Urban Planning and Territorial Planning*. 2025;4(1):68–75. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-68-75>

Введение. Концепцию системного управления этапами жизненного цикла широко используют во многих сферах хозяйственной деятельности человека с целью повышения эффективности, технологичности, экономичности и надежности работы объекта (проекта, системы, изделия или продукта) [1–3]. В строительной отрасли эта концепция также распространена и часто применима в первую очередь для зданий и сооружений, т. е. объектов капитального строительства [4, 5].

Так, в соответствии с основными положениями¹ под жизненным циклом здания или сооружения понимают период, в течение которого выполняются инженерные изыскания, осуществляются архитектурно-строительное проектирование, строительство (в том числе консервация), эксплуатация (в том числе текущие ремонты), реконструкция, капитальный ремонт, снос здания или сооружения. Авторы исследования [6] жизненным циклом здания называют время от момента обоснования необходимости возведения до наступления экономической нецелесообразности его эксплуатации и выделяют восемь его этапов, начиная с технико-экономического обоснования возведения объекта и заканчивая технико-экономическим обоснованием его реконструкции.

Относясь к строительным объектам, инженерные системы являются основой их инфраструктуры и призваны обеспечивать комфортные и безопасные условия жизни или пребывания людей в них. Однако вопросам моделирования жизненного цикла инженерных систем не уделяется должного внимания в научных исследованиях. Так, например, на основе «круга качества» предложен жизненный цикл систем теплоснабжения на примере когенерирующей установки для ТЭЦ [7], представлена методология разработки цифровой информационной модели элементов системы теплоснабжения на всех этапах ее жизненного цикла [8, 9]. В исследовании [10] описан

¹ Федеральный закон от 30.12.2009 N 384-ФЗ (ред. от 25.12.2023). Технический регламент о безопасности зданий и сооружений. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/4ceedc6beeab98acfcffe6b042e41a8319e1c922/ (дата обращения 20.02.2025).

алгоритм увеличения жизненного цикла систем кондиционирования воздуха, в работе [11] разработана модель управления жизненным циклом вентиляционной системы строительного объекта.

Системы отопления зданий или сооружений, являясь важной и неотъемлемой их частью, обеспечивают соблюдение требуемых значений параметров микроклимата в холодный период года. Однако проведенные аналитические исследования свидетельствуют о существенном дефиците научных работ, посвященных комплексному изучению жизненного цикла отопительных систем. Следовательно, изучение этапов модели жизненного цикла системы отопления с целью оптимизации затрат, улучшения качества и повышения эффективности работы и в конечном счете управления ею представляет собой важную научную и практическую задачу. Продуктивная работа системы отопления закладывается на этапе ее проектирования и монтажа, корректируется и поддерживается на этапах эксплуатации и модернизации, при этом каждая стадия предполагает выполнение комплекса работ, направленных на достижение определенных результатов.

Отсутствие целостного подхода к изучению жизненного цикла приводит к существенному снижению качества принимаемых решений и увеличению эксплуатационных издержек, что подтверждает необходимость всестороннего исследования всех стадий функционирования системы отопления как единого технологического процесса.

На основе детального изучения этапов и стадий предложена структура жизненного цикла системы отопления как сложной системы инженерно-технического обеспечения зданий и сооружений, элементы которой должны стабильно, эффективно и полноценно функционировать на протяжении отопительного периода в течение всего срока эксплуатации. Знание особенностей и специфики каждого этапа жизненного цикла дает возможность ими управлять и позволяет обеспечить максимальную эффективность, технологичность, экономичность и надежность системы.

Материалы и методы. Использование методов аналогии, сравнительного анализа и синтеза на основе обобщения научных и практических результатов исследований позволило авторам построить модель жизненного цикла системы отопления зданий и сооружений как неотъемлемой части строительного объекта. При этом объектом исследования являлась система водяного отопления, а целью исследования — разработка модели жизненного цикла системы водяного отопления жилых и общественных зданий. Для достижения цели выявлены и проанализированы основные этапы жизненного цикла и их стадии с целью возможности управления ими.



Рис. 1. Классификация систем водяного отопления

Результаты исследования. Понимая под системой отопления одну из систем инженерно-технического обеспечения зданий и сооружений, авторы полагают, что жизненный цикл системы отопления — это совокупность взаимосвязанных, взаимозависимых и последовательных процессов проектирования, монтажа, эксплуатации, модернизации и утилизации системы, обеспечивающей подачу теплоты в помещения и поддержание в них в холодное время года требуемых температур.

Выбор принципиальной схемы системы отопления зависит от множества факторов: назначение помещения, вид теплоносителя, режим работы системы отопления, способ перемещения теплоносителя, взаимное расположение основных элементов и т.д. Если принять в качестве объекта строительства жилое или общественное здание, то система водяного отопления является наиболее предпочтительным вариантом по совокупности требований, предъявляемых к системам отопления. Системы водяного отопления весьма многообразны (рис. 1), каждая имеет свои преимущества и недостатки. Выбор оптимального варианта системы для конкретного объекта с учетом всех его особенностей и требований заказчика определяется условиями эксплуатации, техническими и экономическими требованиями.

Каждый из вариантов системы предполагает наличие основного и дополнительного оборудования (рис. 2) [12–14], состав и особенности комплектации которого зависят от выбранного варианта системы водяного отопления.

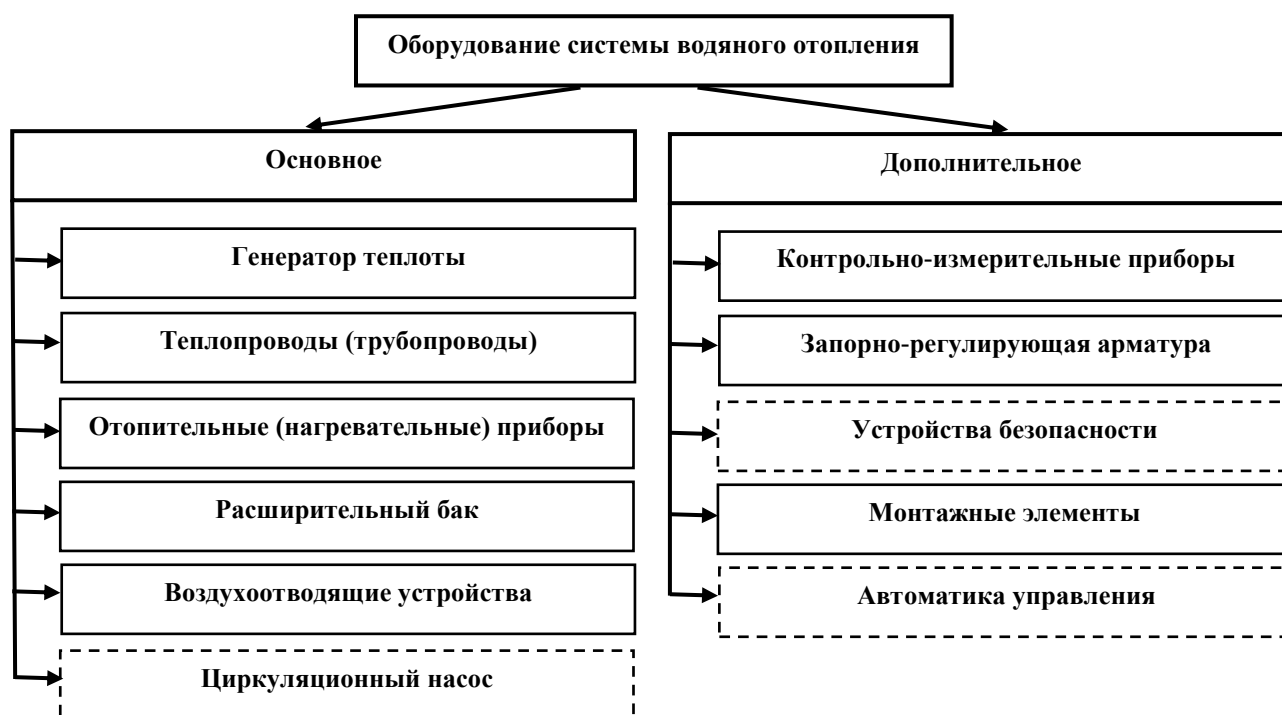


Рис. 2. Оборудование систем водяного отопления

Вариативность возможных конструктивных и технических решений систем водяного отопления, многообразие и постоянно расширяющаяся номенклатура основного и дополнительного оборудования создает определенные сложности при проектировании, монтаже и эксплуатации, поскольку требует учета многочисленных параметров и характеристик каждого элемента системы. Особую актуальность приобретает проблема выбора оптимальной системы водяного отопления, которая должна соответствовать комплексным критериям эффективности, безопасности и экономической целесообразности.

В связи с этим изучение этапов жизненного цикла систем отопления представляется методологически обоснованным и практически необходимым для обеспечения эффективной и надежной эксплуатации в долгосрочной перспективе.

Исследование системы отопления предполагает выделение пяти этапов ее функционирования: предпроектной подготовки, проектирования, эксплуатации, модернизации и утилизации. Каждый из указанных этапов характеризуется стадиями реализации, которые определяют текущее состояние отопительной системы, комплекс необходимых работ и ожидаемые результаты их выполнения.

Этап предпроектной подготовки направлен на определение целесообразности проектирования системы отопления и сбор исходной информации. Данный этап включает две последовательные стадии:

1 стадия — запрос и сбор исходных данных для проектирования (сведения о климатических и метеорологических условиях района строительства, расчетных параметрах наружного воздуха и воздуха помещений, сведения об

источниках теплоснабжения, параметрах теплоносителей и т.п.), в том числе исходных данных смежных разделов проектной документации (генплан здания или сооружения, планы, разрезы и т.п.).

2 стадия — разработка технического задания на проектирование (с учетом категории и функционального назначения здания или сооружения).

Этап проектирования системы отопления — основополагающий в создании инженерной инфраструктуры строительного объекта. Именно этот этап определяет основные параметры будущей системы: эффективность, безопасность и экономическую целесообразность. Этап проектирования жизненного цикла системы отопления предполагает следующие стадии:

1 (3) стадия — анализ полученных исходных данных с последующим выполнением теплотехнического расчета ограждающих конструкций, расчета тепловых потерь и определения тепловой мощности системы отопления, определением принципиальной схемы системы отопления гидравлическим и тепловым расчетом системы, определением состава и подбором основного и дополнительного оборудования.

Стадия является важной для формирования технически обоснованного и экономически эффективного решения, обеспечивающего требуемые параметры микроклимата в помещениях при оптимальном энергопотреблении.

2 (4) стадия — оформление пояснительной записки и разработка графической части проекта по результатам расчетов.

Результатом этого этапа жизненного цикла системы отопления является проект будущей системы отопления для объекта строительства.

Этап технической эксплуатации начинается с монтажа системы отопления, выполнения пуско-наладочных работ и подразумевает периодическое техническое обслуживание, контроль за состоянием оборудования и своевременное устранение неисправностей в процессе непосредственной эксплуатации системы. Третий этап включает четыре стадии.

1 (5) стадия — монтаж, т. е. процесс установки системы отопления монтажной организацией, предполагающий монтаж отопительных приборов, труб, подключение системы к источнику тепла и т.п.

2 (6) стадия — пуско-наладочные работы, направленные на проверку, настройку и тестирование системы отопления (проверка соответствия оборудования проектным параметрам, выполнение гидравлических испытаний, регулировка и наладка работы насосного и котельного оборудования и т.п.).

3 (7) стадия — непосредственно эксплуатация системы отопления в оптимальном рабочем режиме (эффективный обогрев сочетается с минимизацией расходов), предполагающая согласованную и сбалансированную работу всех ее элементов на протяжении отопительного периода в течение всего срока эксплуатации.

4 (8) стадия — техническое обслуживание с установленной периодичностью и планово-предупредительный ремонт, направленные на поддержание системы отопления в исправном состоянии на протяжении отопительного периода в течение всего срока эксплуатации (предотвращение, выявление и устранение технических неисправностей и сбоев в работе для обеспечения длительного безаварийного использования).

Физический износ и устаревание элементов системы отопления, снижение ее теплопроизводительности, изменение потребностей потребителей тепловой энергии, а также необходимость снижения энергопотребления и повышения энергоэффективности зданий или сооружений с течением времени требуют реализации следующего этапа жизненного цикла — *модернизации* системы отопления. Модернизация предполагает обновление системы отопления через замену физически и морально устаревших компонентов на современные и более энергетически эффективные с внедрением систем автоматизации и управления. Этап модернизации включает несколько стадий реализации.

1 (9) стадия — формирование технического задания на модернизацию, изучение вариантов модернизации системы отопления и детальная проработка предполагаемых технических решений (замена отопительных приборов, установка индивидуальных терморегуляторов с датчиком температуры воздуха и т.п.).

2 (10) стадия — выбор и реализация варианта модернизации.

Финальным этапом жизненного цикла системы отопления является *этап утилизации* при достижении предельного состояния эксплуатационных характеристик оборудования. В этом случае жизненный цикл системы отопления завершается, производится демонтаж устаревшего оборудования и его утилизация.

В условиях эксплуатации в оптимальном рабочем режиме, технического обслуживания с установленной периодичностью и планово-предупредительного ремонта продолжительность жизненного цикла системы водяного отопления достигает 40–50 лет, в реальных условиях продолжительность составляет 25–30 лет [15, 16], что соответствует минимальному сроку эксплуатации. Это усредненные показатели, которые учитывают среднюю *продолжительность эксплуатации* основных элементов системы отопления (для генераторов теплоты — 15–25 лет, для отопительных приборов — 20–40 лет, теплопроводов — 20–40 лет, запорной арматуры — 15–20 лет, расширительных баков — 20 лет, циркуляционных насосов — 10–15 лет, теплообменников — около 20 лет).

Детальное исследование этапов и стадий жизненного цикла системы отопления позволяет решить ряд важных задач:

- 1) формирование комплексного представления о системе отопления, что способствует принятию обоснованных управленческих решений и повышению качества ее эксплуатации;
- 2) возможность оценки эффективности работы системы на всех этапах её существования (анализ, корректировка и выбор проектных решений, оценка качества монтажных работ и последующей эксплуатации);
- 3) возможность заблаговременного выявления потенциальных проблем и их предотвращение;
- 4) оптимизация затрат не только на этапе проектирования и монтажа системы, но и на этапе эксплуатации за счет грамотного планирования обслуживания и ремонта на основе фактических данных о состоянии системы;
- 5) продление срока службы оборудования;
- 6) снижение аварийности системы;
- 7) возможность прогнозирования эксплуатации и модернизации (при необходимости).

В конечном итоге системное исследование жизненного цикла отопления дает возможность создать энергоэффективную, надежную и экономичную систему, отвечающую современным требованиям эксплуатации, повысить качество ее обслуживания, а также упростить процесс управления ею.

Обсуждение и заключение. Жизненный цикл системы отопления охватывает все этапы ее существования, начиная от проектирования и монтажа до эксплуатации и модернизации. Понимание и правильное управление этими этапами позволяет обеспечить эффективную и экономичную работу отопительной системы зданий и сооружений, повышая комфорт и снижая эксплуатационные расходы.

Управление жизненным циклом системы отопления является ключевым фактором для обеспечения ее эффективной и экономичной работы на протяжении всего срока службы. Комплексный подход, включающий проектирование, установку, эксплуатацию, модернизацию и управление, позволяет максимально использовать потенциал отопительной системы, обеспечивая комфорт и снижая эксплуатационные расходы.

Системное исследование каждого этапа жизненного цикла системы отопления обеспечивает возможность выбора оптимальной системы водяного отопления, которая должна соответствовать комплексным критериям эффективности, безопасности и экономической целесообразности, обеспечивает возможность прогнозирования технического состояния, планирования ремонтных работ и модернизации, что способствует повышению надежности и экономической эффективности эксплуатации в долгосрочной перспективе.

Кроме вышеперечисленного модель жизненного цикла обеспечивает возможность создания единой информационной (цифровой) модели и позволяет осуществлять интеллектуальное динамическое управление на всех стадиях функционирования объекта — от инженерных изысканий до реконструкции и модернизации.

Список литературы / References

1. Жданов В.Ю. Новый взгляд на этапы жизненного цикла организации. *Московский экономический журнал*. 2021;6:378–388. <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2021-10347>
- Zhdanov VYu. A New Look at the Stages of the Organization's Life Cycle. *Moscow Economic Journal*. 2021(6):378–388. (In Russ.) URL: <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2021-10347>
2. Агибалова В.Г., Баша И.В., Суббота А.В., Вассуф Ф.С. Особенности управления организацией с учетом стадий жизненного цикла. *Естественно-гуманитарные исследования*. 2023;5(49):367–370. URL: <https://esj.today/PDF/50ECVN122.pdf> (дата обращения 19.01.2025).
- Agibalova VG, Basha IV, Subbota AV, Wassuf FS. Features of Organization Management Taking into Account the Stages of the Life Cycle. *Natural Sciences and Humanities Research*. 2023;5(49):367–370. (In Russ.) URL: <https://esj.today/PDF/50ECVN122.pdf> (accessed: 19.01.2025).
3. Бегларян К.Э. Теоретико-практические аспекты формирования имиджа учреждений культуры. *Научная палитра*. 2020;2(28):8. URL: [https://s.esrae.ru/culture/pdf/2020/2\(28\)/891.pdf](https://s.esrae.ru/culture/pdf/2020/2(28)/891.pdf) (дата обращения 19.01.2025).
- Beglaryan KE. Theoretical Aspects of the Enterprise Life Cycle Analysis. *Scientific Palette*. 2020;2(28):14. (In Russ.) URL: [https://s.esrae.ru/culture/pdf/2020/2\(28\)/891.pdf](https://s.esrae.ru/culture/pdf/2020/2(28)/891.pdf) (accessed: 19.01.2025).
4. Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцева И.А., Воронов В.А. Управление жизненным циклом устойчивого состояния объекта строительства. *Эксперт: теория и практика*. 2023;3(22):131–137. https://doi.org/10.51608/26867818_2023_3_131
- Fedosov SV, Fedoseev VN, Zaytseva IA, Voronov VA. Life Cycle Management of a Steady state of a Construction Object. *Expert: Theory and Practice*. 2023;3(22):131–137. (In Russ.) https://doi.org/10.51608/26867818_2023_3_131
5. Топчий Д.В. Организационно-технические решения по обеспечению качества строительно-монтажных работ на различных этапах жизненного цикла объекта строительства. *Вестник МГСУ*. 2023;18(2):283–292. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.2.283-292>

Topchiy DV. Organizational and Technical Solutions to Ensure the Quality of Construction and Installation Works at Various Stages of the Life Cycle of a Construction Project. *Bulletin of MSAU*. 2023;18(2):283–292. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.2.283-292>

6. Беляев А.В., Антипов С.С. Жизненный цикл объектов строительства при информационном моделировании зданий и сооружений. *Промышленное и гражданское строительство*. 2019(1):65–72. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36973984> (дата обращения 22.01.2025).

Belyaev AV, Antipov SS. Life Cycle of Construction Projects in Information Modeling of Buildings and Structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2019(1):65–72. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36973984> (accessed: 22.01.2025).

8. Беспалов В.И., Гурова О.С., Лысова Е.П., Гришин Г.С. Анализ жизненного цикла парогазотурбинных ТЭЦ. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2022;1(4):32–43. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-32-43>

Bespalov VI, Gurova OS, Lysova EP, Grishin GS. Analysis of the Life Cycle of Combined-cycle Gas Turbine TECs. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2022;1(4):32–43. (In Russ.) URL: <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-32-43>

9. Тихомиров А.Л., Пирожникова А.П. Формирование принципов количественного регулирования параметров системы теплоснабжения на основе анализа ее жизненного цикла. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023;2(2):29–35. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-2-29-35>

Tikhomirov AL, Pirozhnikova AP. Formation of Principles of Quantitative Regulation of Parameters of the Heat Supply System Based on the Analysis of its Life Cycle. *Modern Trends in construction, Urban and Territorial Planning*. 2023;2(2):29–35. URL: <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-2-29-35>

10. Тихомиров А.Л., Пирожникова А.П. Разработка информационной модели системы теплоснабжения на различных этапах ее жизненного цикла. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2022;1(3):35–42. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-35-42>

Tikhomirov A. L., Pirozhnikova A. P. Development of an Information Model of the Heat Supply System at Various Stages of its Life Cycle. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2022;1(3):35–42. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-35-42>

11. Беспалов В.И., Ткачева Ю.Ю., Николаев А.И. Разработка алгоритма увеличения жизненного цикла систем кондиционирования воздуха (СКВ). *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023;2(4):127–136. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-127-136>

Bespalov VI, Tkacheva YuYu, Nikolaev AI. Development of an Algorithm for Increasing the Life Cycle of Air Conditioning Systems (ACs). *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2023;2(4):127–136. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-127-136>

12. Самарская Н.С. Управление жизненным циклом вентиляционной системы строительного объекта. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023;2(4):137–143. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-137-143>

Samarskaya NS. Life Cycle Management of the Ventilation System of a Construction Site. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2023;2(4):137–143. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-137-143>

13. Усиков С.М., Аксёнова А.А. Управление качеством работы системы водяного отопления. *Инновации и инвестиции*. 2021;2:179–182. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-kachestvom-raboty-sistemy-vodyanogo-otopleniya> (дата обращения 22.01.2025).

Usikov SM, Aksanova AA. Quality Management of the Water Heating System. *Innovations and Investments*. 2021;2:179–182. (In Russ.) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-kachestvom-raboty-sistemy-vodyanogo-otopleniya> (accessed: 22.01.2025).

14. Новосельцев В.Г., Новосельцева Д.В. Изучение эффективности методов балансировки систем водяного отопления. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки*. 2021(16):94–98. URL: <file:///C:/Users/sstudennikova/Downloads/1163-%D0%A2%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D0%B8-2245-2-10-20220408.pdf> (дата обращения 22.01.2025).

Navaselsau U., Navaselsava D. Study of the Effectiveness of Various Methods of Balancing Systems Water Heating. *Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Sciences*. 2021(16):94–98. (In Russ.) URL: <file:///C:/Users/sstudennikova/Downloads/1163-%D0%A2%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D0%B8-2245-2-10-20220408.pdf> (accessed: 22.01.2025).

15. Новосельцев В.Г., Новосельцева Д.В. Оценка работоспособности системы водяного отопления, не соответствующей проекту. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки*. 2022(14):58–63. <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2022-32-14-58-63>

Navaseltsau U., Navaseltsava D. Assessment of the Operability of the Water Heating System, Not Relevant to the Project. *Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Sciences*. 2022(14):58–63. <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2022-32-14-58-63>

16. Ямлеева Э.У. О надёжности и долговечности систем отопления зданий. *Вестник Ульяновского государственного технического университета*. 2018;1(81):53–57. URL: <https://lib.ulstu.ru/venec/disk/2017/252.pdf> (дата обращения 22.01.2025).

Yamleeva EU. On the Reliability and Ddurability of Heating Systems of Buildings. *Bulletin of the Ulyanovsk State Technical University*. 2018;1(81):53–57 (In Russ.) URL: <https://lib.ulstu.ru/venec/disk/2017/252.pdf> (accessed: 22.01.2025).

17. Логинова А.А., Панкова Т.А. Сравнительный анализ систем отопления. В: *Материалы XI Национальной конференции с международным участием «Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения»*. Саратов: СГАУ им. Н.И. Вавилова; 2021. С. 31–33. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46541348> (дата обращения 22.01.2025).

Loginova AA, Pankova TA. Comparative Analysis of Heating Systems. *Proceedings of the 11th National Conference with International Participation Modern Problems and Pprospects for the Development of Construction, Heat and Gas Supply and Energy Supply*. Saratov: SSAU named after N.I. Vavilov; 2021. P. 31–33. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46541348> (accessed: 22.01.2025).

Об авторах:

Лысова Екатерина Петровна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения, климатехники и альтернативных энергоустановок Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), katerina.lysova0803@gmail.com

Парамонова Оксана Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения, климатехники и альтернативных энергоустановок Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), paramonova_oh@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Е.П. Лысова: формирование основной концепции, анализ результатов исследований, корректировка выводов, графическое оформление, доработка текста.

О.Н. Парамонова: цели и задачи исследования, анализ результатов исследований, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Ekaterina P. Lysova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Climate Engineering and Alternative Energy Installations at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), katerina.lysova0803@gmail.com

Oksana N. Paramonova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Climate Engineering and Alternative Energy Installations at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), paramonova_oh@mail.ru

Claimed Contributorship:

EP Lysov: formation of the basic concept, analysis of the research results, correction of the conclusions, graphic design, revision of the manuscript.

ON Paramonova: goals and objectives of the research, analysis of the research results, correction of the conclusions.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 28.01.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 12.02.2025

Принята к публикации / Accepted 26.02.2025

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES



УДК 005.41

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-76-85>

Анализ жизненного цикла объектов строительства на примере ветроэнергетических сооружений

Н.С. Самарская

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

nat-samars@yandex.ru



EDN: FNVSUB

Аннотация

Введение. Строительство играет ключевую роль в экономике Российской Федерации, способствуя устойчивому развитию и улучшению условий жизни населения. Современные строительные объекты представляют собой жилые и коммерческие здания, коммунальные и инфраструктурные сооружения, такие как дороги и мосты, а также промышленные и энергетические объекты, включая ветроэнергетические сооружения. Ветроэнергетика становится важной частью строительной отрасли, способствуя инновациям и технологическому прогрессу.

Как объекты строительной отрасли ветроэнергетические сооружения (ВЭС) проходят свой жизненный цикл, включающий основные этапы: проектирование, строительство, эксплуатацию и утилизацию (реновацию). Каждый этап требует эффективного управления для обеспечения надежного функционирования и безопасности объекта. Так, для обеспечения в будущем генерации экологически безопасной энергии ветроэнергетическим сооружением возникает необходимость анализа планируемого объекта строительства и, как следствие, управление решениями еще на этапах проектирования и строительства. В ходе такого анализа появляется возможность выявить потенциальные проблемы этапа эксплуатации ветроэнергетического сооружения. К ним прежде всего можно отнести износ, коррозию конструктивных элементов и обморожение лопастей.

Данные проблемы являются причиной снижения производительности и срока службы объекта. В связи с этим целью работы являлся поиск возможности увеличения срока эксплуатации в жизненном цикле ветроэнергетических сооружений за счет решения проблемы обледенения лопастей на этапах проектирования и строительства.

Материалы и методы. Исследования базируются на методе анализа жизненного цикла строительных объектов, включающем систематизацию и оптимизацию процессов управления ими. Модель жизненного цикла ветроэнергетических сооружений, разработанная автором ранее, помогла выявить проблемы этапа эксплуатации объекта. Наиболее значимой проблемой, существенно влияющей на продолжительность этапа эксплуатации, является проблема обледенения лопастей. Анализ жизненного цикла ветроэнергетического сооружения показал, что обеспечить успешное решение этой проблемы целесообразно на этапах проектирования и строительства объекта. Данные проведенного анализа проблемы базируются на результатах исследований отечественных и зарубежных авторов.

В результате произведено обобщение и систематизация существующих методов борьбы с обледенением, на основе чего предложен новый способ реализации и разработана соответствующая методика выполнения работ. Такое решение, предусмотренное еще на этапе проектирования строительного объекта, позволит успешно управлять его жизненным циклом и, в частности, этапом эксплуатации.

Результаты исследования. В ходе проведенных исследований автором достигнута цель — увеличение продолжительности этапа эксплуатации в жизненном цикле ветроэнергетических сооружений. Для достижения поставленной цели проведен анализ жизненного цикла объектов строительства, в ходе которого выявлены причины, оказывающие влияние на срок эксплуатации объекта. Наиболее значимой причиной, приводящей к резкому сокращению срока службы объекта строительства, является проблема обледенения лопастей в холодный период года.

На основе анализа условий эксплуатации определены причины обледенения лопастей ветроэнергетических сооружений, установлены основные принципы защиты от обледенения и предложен новый способ решения этой проблемы с применением беспилотного летательного аппарата (далее — БПЛА), а также разработана методика

нанесения гидрофобных покрытий для предотвращения процесса обледенения. Внедрение результатов исследования позволит обеспечить требуемую производительность, что, в свою очередь, увеличит срок службы ветроэнергетического сооружения.

Обсуждение и заключение. Успешное управление жизненным циклом таких объектов строительства как ветроэнергетические сооружения требует внимания не только на этапе эксплуатации объекта, но и на этапах проектирования и строительства. Ключевая задача этапа эксплуатации ветроэнергетического сооружения — обеспечение необходимой производительности и увеличение срока службы объекта — может быть решена путем тщательного анализа жизненного цикла и предотвращением будущих проблем эксплуатации еще на этапах проектирования и строительства. Предложенный в исследовании способ борьбы с обледенением лопастей может быть внедрен не только для существующих ветроэнергетических сооружений, не имеющих специальных систем против обледенения, но и для проектируемых объектов. Причем предлагаемые решения для борьбы с обледенением лопастей могут быть включены в проектную документацию как обязательные виды работ, осуществляемые на этапе строительства, а также впоследствии — на этапе эксплуатации с определенной периодичностью.

Решение проблемы на этапе проектирования объекта позволит обеспечить повышение производительности и увеличение срока службы ветроэнергетического сооружения, функционирующего в условиях холодного и влажного климата. Таким образом, результаты исследования представляют собой теоретическую базу для управления жизненным циклом ветроэнергетических сооружений как одних из перспективных объектов строительства.

Ключевые слова: жизненный цикл, объекты строительства, ветроэнергетические сооружения, борьба с обледенением лопастей, гидрофобные покрытия

Для цитирования. Самарская Н.С. Анализ жизненного цикла объектов строительства на примере ветроэнергетических сооружений. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(1):76–85. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-76-85>

Original Empirical Research

Life Cycle Analysis of Construction Facilities Using the Example of Wind Power Facilities

Natalia S. Samarskaya 

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

 nat-samars@yandex.ru

Abstract

Introduction. Construction plays a major role in the economy of the Russian Federation contributing to sustainable development and improving the living conditions of the population. Modern construction facilities include residential and commercial buildings, municipal and infrastructural structures such as roads and bridges, as well as industrial and energy facilities, including wind power facilities. Wind energy is becoming an important part of the construction industry, contributing to innovation and technological progress. As objects of the construction industry, wind power facilities go through their life cycle which includes the main stages: design, construction, operation and disposal (renovation). Each stage requires effective management to ensure reliable operation and safety of the facility. Thus, in order to ensure the future generation of environmentally safe energy by a wind power plant, it becomes necessary to analyze the planned construction site and, as a result, manage solutions at the design and construction stages. During such an analysis, it becomes possible to identify potential problems during the operation phase of a wind power facility. These include, first of all, wear, corrosion of structural elements and frostbite of the blades. These problems are the reason for the decrease in performance and service life of the object. The aim of the work was thus to search for the possibility of extending the service life in the life cycle of wind power facilities by solving the problem of blade icing at the design and construction stages.

Materials and methods. The research is based on the method of analyzing the life cycle of construction facilities, including the systematization and optimization of their management processes. The model of the life cycle of wind power facilities, developed by the author earlier, helped to identify the problems of the facility's operation phase. The most significant problem that significantly affects the duration of the operation phase is the problem of blade icing. An analysis of the life cycle of a wind power facility has shown that it is advisable to ensure a successful solution to this problem at the design and construction stages of the facility. The data of the conducted analysis of the problem are based on the research results of domestic and foreign authors.

As a result, a generalization and systematization of existing anti-icing methods was carried out, on the basis of which a new method of implementation was set forth and an appropriate work methodology was developed. Such a solution, envisaged at the design stage of the construction facility, will enable one to successfully manage its life cycle, and, in particular, the operation stage.

Results. Throughout the course of the research, the author has been able to increase the duration of the operation stage in the life cycle of wind power facilities. To this end, an analysis of the life cycle of construction facilities was carried out, during which the causes affecting the life of the facility were identified. The most significant reason leading to a sharp reduction in the service life of the construction site is the problem of icing of the blades during the cold season.

Based on the analysis of operating conditions, the causes of icing of the blades of wind power structures have been determined, the basic principles of anti-icing protection have been established, and a new method for solving this problem using UAVs (unmanned aerial vehicles) has been set forth, as well as a technique for applying hydrophobic coatings to prevent the icing process. The implementation of the research results will ensure the required performance, which, in turn, will increase the service life of the wind power plant.

Discussion and conclusion. Successful lifecycle management of such construction facilities as wind power plants requires attention not only at the stage of operation of the facility, but also at the stages of design and construction. The key task of the operation stage of a wind power facility is to ensure the necessary productivity and increase the service life of the facility. This can be solved by carefully analyzing the life cycle and preventing future operational problems at the design and construction stages. The method set forth in the study to combat blade icing can be implemented not only for existing wind power plants that do not have special anti-icing systems, but also for projected facilities. Moreover, the suggested solutions for combating icing of the blades can be included in the design documentation as mandatory types of work carried out during the construction phase, as well as subsequently during the operation phase with a certain frequency.

Solving the problem at the design stage of the facility will ensure an increase in productivity and an increase in the service life of a wind power plant operating in cold and humid climates. Thus, the results of the study provide a theoretical basis for managing the life cycle of wind power facilities, as one of the promising construction projects.

Keywords: life cycle, construction sites, wind power facilities, anti-icing of blades, hydrophobic coatings.

For citation. Samarskaya NS. Life Cycle Analysis of Construction Facilities Using the Example of Wind Power Facilities. *Modern Trends in Construction, Urban Planning and Territorial Planning*. 2025;4(1):76–85. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-76-85>

Введение. Строительство является одной из ключевых отраслей экономики Российской Федерации, играя важную роль в устойчивом социально-экономическом развитии страны и улучшении условий жизнедеятельности населения. Современные объекты строительной отрасли представляют собой разнообразный спектр сооружений, каждый из которых играет свою уникальную роль в инфраструктурном развитии общества. К ним относятся жилые и коммерческие здания, инфраструктурные объекты, такие как дороги, мосты и туннели, а также промышленные сооружения. Особое внимание в последние годы уделяется ветроэнергетическим сооружениям, которые становятся все более значимыми в контексте устойчивого развития и поиска альтернативных источников энергии [1]. Ветроэнергетические сооружения не только способствуют снижению зависимости от ископаемых видов топлива, но и минимизируют экологический след, обеспечивая чистую и возобновляемую энергию. Их интеграция в строительную отрасль открывает новые перспективы для инноваций и технологического прогресса, делая ветроэнергетику важным элементом современной строительной практики.

Ветроэнергетические сооружения, как и любые другие объекты строительства, проходят через определенный жизненный цикл, который включает в себя несколько ключевых этапов: проектирование, строительство, эксплуатацию и ликвидацию или реновацию. Каждый из этих этапов требует тщательного управления и контроля, чтобы обеспечить эффективность, безопасность и долговечность установок. Так, на этапе проектирования важно учитывать климатические условия, топографию местности и потенциальные ветровые ресурсы, чтобы максимизировать производительность будущих установок. Этап строительства ветроэнергетических сооружений требует использования высококачественных материалов и передовых технологий, что гарантирует надежность и устойчивость конструкций. Эксплуатация ветроэнергетических установок является критическим этапом, поскольку от нее зависит их экономическая целесообразность и экологическая эффективность. Регулярное техническое обслуживание и мониторинг состояния оборудования позволяют предотвратить поломки и продлить срок службы установок. Этап ликвидации или реновации предполагает либо демонтаж устаревших установок, либо их модернизацию для повышения эффективности. Этот процесс аналогичен жизненному циклу других объектов строительства, где также важно учитывать аспекты устойчивого развития и минимизацию воздействия на окружающую среду [2].

Таким образом, задачи управления жизненным циклом ветроэнергетических сооружений на каждом этапе уникальны и требуют различных подходов и решений. При этом следует отметить, что для обеспечения максимальной эффективности генерации экологически чистой энергии ветроэнергетическими сооружениями в долгосрочной перспективе необходимо осуществлять комплексный анализ планируемого объекта на начальных этапах

его жизненного цикла. Это предполагает реализацию системного подхода к управлению проектными и строительными решениями уже на стадии проектирования и возведения сооружения.

Проведение такого многофакторного анализа позволяет идентифицировать потенциальные проблемные зоны, которые могут проявиться в процессе эксплуатации объекта строительства. К числу наиболее критичных факторов относятся:

- механический износ конструктивных элементов сооружения;
- коррозионные процессы, воздействующие на металлические компоненты;
- обледенение лопастей ротора, особенно в условиях низких температур;
- деградация электронных компонентов под воздействием агрессивных внешних факторов.

Воздействие данных негативных факторов приводит к существенному снижению эксплуатационных характеристик объекта, включая уменьшение вырабатываемой мощности и сокращение межремонтных интервалов. В долгосрочной перспективе это влечет за собой уменьшение общей эффективности использования ветроэнергетического сооружения и требует дополнительных затрат на техническое обслуживание и восстановительные работы.

Своевременное выявление и учет потенциальных проблем на ранних этапах жизненного цикла сооружения позволяют разработать превентивные меры, направленные на повышение надежности и долговечности конструкции, что в конечном итоге обеспечивает оптимизацию эксплуатационных характеристик объекта в течение всего периода его функционирования.

Одной из ключевых проблем, существенно влияющих на срок эксплуатации ветроэнергетического сооружения, является обледенение лопастей. Такая проблема представляется критичной для объектов, размещенных в регионах с холодным и влажным климатом (рис. 1). Данный феномен препятствует эффективной выработке энергии (при толщине льда до 30 см выработка энергии снижается на 80 %), приводит к дисбалансу из-за неравномерного распределения льда на лопастях, утяжеляет конструкцию, снижая эффективность вращения [3]. Как следствие, происходит ускоренный износ оборудования: смещение центра тяжести, повышенная нагрузка на механизмы вращения и механическое повреждение поверхности лопастей. В результате обледенение может привести к сбоям в работе и необходимости преждевременного технического обслуживания [4].

Обледенение, представляющее собой отложение льда на обтекаемых частях ветроэнергетической установки, происходит, как правило, в режиме эксплуатации в условиях тумана, дождя или мокрого снега. При этом достаточными условиями для возникновения обледенения являются: наличие повышенной влажности, отрицательная температура воздуха и низкая температура рабочих поверхностей [5].



Рис. 1. Пример обледенения лопасти ветрогенератора

Важным параметром, характеризующим процесс обледенения лопастей, является интенсивность обледенения, представляющая собой толщину льда, который образуется на единице площади поверхности, контактирующей с осадками [6]. Можно выделить три степени интенсивности обледенения:

- слабое обледенение, представляющее собой накопления льда, ликвидация которого не требует больших трудозатрат. Оно не несет серьезной опасности для ВЭС;
- умеренное обледенение, при котором скорость накопления льда еще недостаточна для того, чтобы серьезно повлиять на безопасность и стабильность работы ВЭС;
- сильное обледенение, представляющее собой масштабное накопление льда, при котором есть вероятность вызвать заметную потерю скорости вращения ветротурбины. Данная степень интенсивности обледенения будет критической с точки зрения безопасности и повлечет за собой существенные экономические последствия (снижение производительности, увеличение расходов на техническое обслуживание и сокращение срока службы оборудования).

Учитывая значимость проблемы обледенения лопастей ветроэнергетических сооружений, научное сообщество предлагает ряд стратегий, направленных на снижение негативного воздействия ледяных образований [7, 8]. К современным методам борьбы с обледенением относятся:

- использование систем подогрева в конструкции турбины или нагревательных элементов на концах лопастей. Благодаря поддержанию температуры выше нуля градусов сохраняются аэродинамические свойства лопастей и обеспечивается стабильное функционирование ветроэнергетического сооружения в условиях обледенения;
- применение гидрофобного пластика в конструкции лопастей позволяет снизить адгезию воды и минеральных частиц к поверхности. В результате происходит препятствие удержанию влаги на поверхности лопасти и снижение вероятности обледенения;
- нанесение специальных покрытий на лопасти ветроэнергетического сооружения для создания защитного слоя. Такие покрытия обладают свойствами, предотвращающими образование ледяных структур;
- механическое удаление обледенения с помощью верхолазного оснащения или подъемника, а также удаление льда с вертолета с использованием горячих жидкостей. Однако данный метод позволяет решить проблему обледенения кратковременно и требует значительных организационных затрат.

На основании проведенного анализа современных методов борьбы с обледенением наиболее эффективным решением можно считать нанесение специальных покрытий на лопасти ветроэнергетического сооружения. Такой метод борьбы с обледенением относительно прост, имеет меньшее энергопотребление в сравнении с нагревательными системами, обеспечивает сравнительно длительную защиту, сохраняет аэродинамические характеристики объекта и практически не изменяет массу лопастей.

Однако, принимая во внимание размеры ветроэнергетических сооружений и необходимость повторного и периодического нанесения специальных покрытий, выбор способа реализации данного метода остается существенной проблемой.

Материалы и методы. Настоящее исследование базируется на методологии анализа жизненного цикла строительных объектов, которая включает комплексную систематизацию и оптимизацию процессов управления на всех этапах существования сооружения [9].

Разработанная ранее автором модель жизненного цикла ветроэнергетических сооружений позволила провести детальный анализ потенциальных проблем, возникающих в процессе эксплуатации объекта [2]. Среди выявленных факторов особое внимание было уделено проблеме обледенения лопастей, которая оказывает существенное влияние на продолжительность и эффективность эксплуатационного этапа.

Проведенный анализ жизненного цикла ветроэнергетического сооружения продемонстрировал, что наиболее целесообразным является решение проблемы обледенения на начальных этапах проектирования и строительства объекта. Эмпирическая база исследования сформирована на основе анализа результатов работ отечественных и зарубежных исследователей в данной области. В ходе исследования была осуществлена систематизация существующих методов борьбы с обледенением, что позволило разработать инновационный подход к решению данной проблемы и создать соответствующую методику реализации противообледенительных мероприятий.

Внедрение предлагаемого решения в проектную концепцию строительного объекта создаст предпосылки для результативного управления жизненным циклом ветроэнергетического сооружения, уделяя приоритетное внимание обеспечению эффективности его эксплуатации.

Результаты исследования. Проблема борьбы с обледенением лопастей ветроэнергетического сооружения может быть успешно решена путем нанесения гидрофобных покрытий, позволяющих создать защитный слой и препятствовать процессу образования наледи. Эти покрытия обычно создают на основе материалов с микро- или наноструктурами, которые придают поверхности чрезвычайно высокие водоотталкивающие свойства [10]. Микроструктуры на поверхности покрытия способствуют тому, что капли воды не могут равномерно распределяться

по поверхности, а вместо этого формируются в шарики и скатываются, унося с собой влагу и препятствуя образованию льда.

Для решения проблемы обледенения лопастей ветрогенераторов были выбраны два состава («Силокор-Антилед» и графен), которые благодаря своим физико-химическим характеристикам и способности длительное время сохранять гидрофобные свойства наилучшим образом подходят для соответствующих климатических условий эксплуатации ветрогенераторов. Основными компонентами и химическими веществами, входящими в состав «Силокор-Антилед», являются: силиконовый полимер (основной компонент, обеспечивающий гидрофобные свойства покрытия), растворители для разжижения полимера, технологические добавки, улучшающие эксплуатационные характеристики покрытия, и наполнители, повышающие механические свойства покрытия [11].

В отличие от «Силокор-Антилед», графен — это двумерная аллотропная модификация углерода, состоящая из атомов углерода, расположенных в гексагональной кристаллической решетке [12]. Графен состоит исключительно из атомов углерода. Каждый атом углерода имеет 6 электронов: 2 во внутренней оболочке и 4 — во внешней. Таким образом, по химическому составу графен идентичен алмазу и графиту, так как состоит из тех же атомов углерода. Однако различие в физических свойствах обусловлено их особым пространственным расположением. Благодаря этой особенности материал обладает уникальными свойствами, такими как гидрофобность, высокая прочность и электропроводность. Поэтому также может быть использован для борьбы с обледенением лопастей ветрогенераторов.

Для предпочтительного выбора состава произведен сравнительный анализ, представленный в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ гидрофобных составов для борьбы с обледенением лопастей ветрогенератора

Показатель	Гидрофобный состав	
	«Силокор-Антилед»	Графен
Долговечность	Длительный срок службы при условии правильной подготовки поверхности и нанесения	Высокая долговечность благодаря прочности и устойчивости к внешним воздействиям, подходит для экстремальных условий
Экономическая эффективность	Более экономичное решение, особенно для крупных объектов	Высокая стоимость производства и нанесения
Экологичность	Содержит растворители, что может требовать дополнительных мер по утилизации и безопасности	Экологически безопасный материал при условии использования безопасных методов производства и нанесения
Совместимость с поверхностями	Подходит для металлических, бетонных, окрашенных и других поверхностей	Универсален, может быть нанесен на различные материалы, включая сложные и деликатные поверхности
Светопропускание	Высокий коэффициент светопропускания, что может быть важно для некоторых видов применений	Не влияет на светопропускание, может быть использован в прозрачных покрытиях
Нанесение и обработка	Простота нанесения благодаря двухкомпонентной системе. Требуется тщательной подготовки поверхности перед нанесением	Более сложная процедура нанесения, часто требующая использования специализированных методов

Анализируя данные таблицы 1, можно заключить, что для большинства вариантов применения состав «Силокор-Антилед» может быть предпочтительным выбором благодаря своей доступности и эффективности. В то время как графен может быть оптимальным решением для специализированных и высоконагруженных условий эксплуатации, где его уникальные свойства могут быть максимально реализованы. Оба состава успешно применяются для защиты от обледенения скатных кровель, водосточков, мачтовых конструкций, для обработки керамической и полимерной черепицы, шифера [11]. Учитывая такой спектр областей применения, данные составы вполне можно рассматривать для защиты лопастей ветрогенератора в условиях постоянно повторяющихся циклов замерзания-оттаивания. Кроме того, результаты проведенных аналитических исследований подтвердили, что покрытия с использованием графена являются весьма перспективными. Так, ученые университета Райса предложили использовать графеновые наноленты как эффективный антиобледенитель для различных поверхностей, включая крылья самолета, линии электропередач, лопасти вертолета [13, 14]. Графеновые наноленты формируют

связь в композите, проводя электрический ток через материал с минимальной нагрузкой. Возникающее электро-термическое тепло приводит к нагреву поверхности объекта. Между поверхностью и льдом во время растапливания образуется талая вода — благодаря этому наледь можно удалить, не дожидаясь окончания процесса. Следовательно, графеновое покрытие является перспективным материалом, который можно наносить на поверхность лопастей ветрогенератора или использовать графеновые наноленты, снижая вероятность обледенения рабочих поверхностей и продлевая тем самым срок службы объекта.

Так как нанесение гидрофобных покрытий в рамках данной работы рассматривается на уже возведенный и функционирующий ветрогенератор, возникает задача организации данного процесса. Вместо живой рабочей силы или использования громоздкой авиатехники можно обеспечить нанесение покрытий с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Интеграция БПЛА в сферу высотных работ позволит повысить эффективность обслуживания ветрогенераторов, так как данная область в нынешних реалиях слабо развита. Несмотря на временные ограничения применения БПЛА в мирных целях, данный инструмент остается по-прежнему весьма перспективным для решения многих задач.

Предлагаемый способ нанесения гидрофобных покрытий на поверхность лопастей ветрогенератора предполагает выбор соответствующего задачам БПЛА, а также разработку методики выполнения операций.

Для реализации процесса распыления гидрофобных составов летательный аппарат должен обладать возможностью установки подвешенного оборудования на его корпус. В этой связи наиболее подходящим вариантом является агродрон, который может быть оснащен подвесной системой как для посева, так и для опрыскивания полей. В контексте борьбы с обледенением подвесное оборудование для опрыскивания будет использоваться для нанесения гидрофобных составов на поверхности ветрогенератора.

Для выполнения процесса нанесения гидрофобных составов на лопасти ветрогенератора может быть использована следующая схема облета (рис. 2).

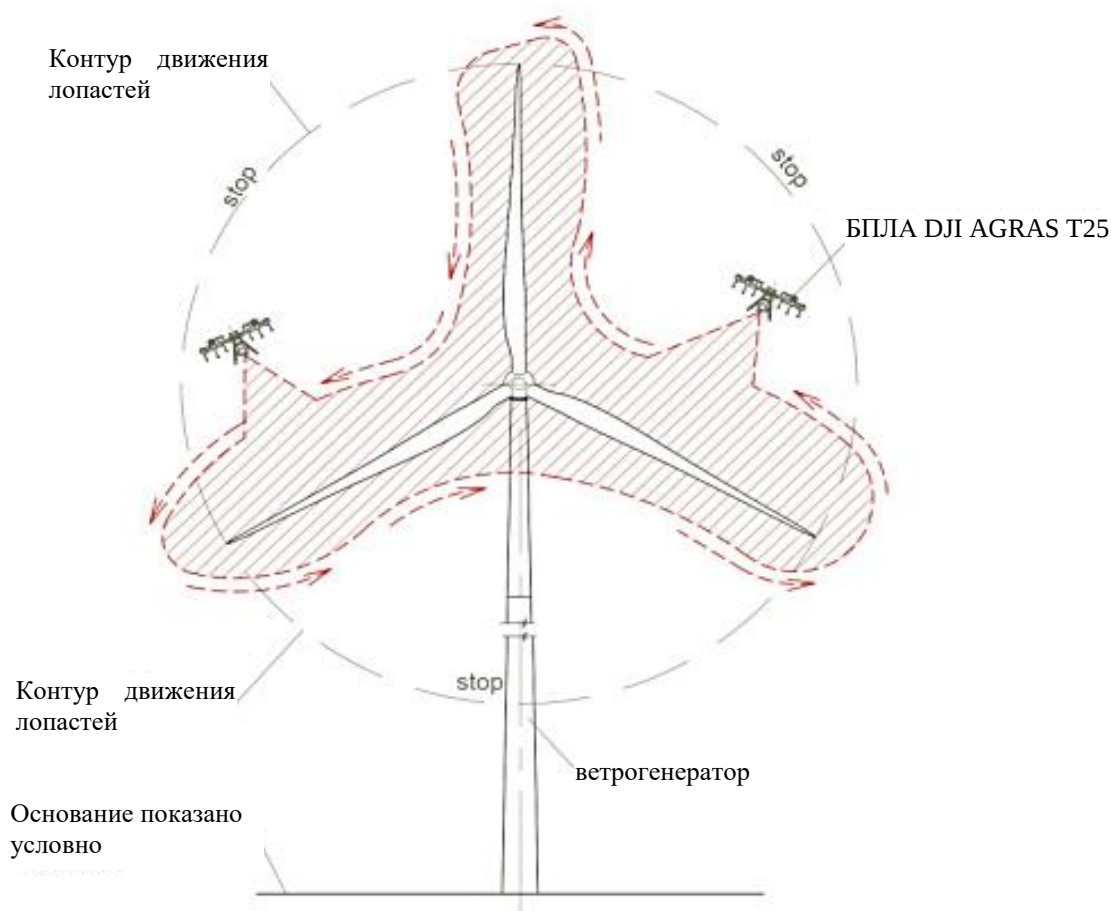


Рис. 2. Схема облета при обработке лопастей гидрофобными покрытиями с помощью БПЛА

В качестве примера был рассмотрен БПЛА DJI AGRAS T25, предназначенный для сельскохозяйственных нужд. Аппарат способен нести до 25 кг полезной нагрузки, что позволяет использовать его для распыления больших объемов материала. Время нахождения в воздухе составляет 15 мин, а дальность управления — около 5 км,

что позволяет оператору свободно перемещаться и управлять аппаратом на значительном расстоянии. Особенностью данной модели БПЛА является высокоточная система распыления, обеспечивающая равномерное распределение вещества.

Также аппарат оборудован современными сенсорами и системами навигации, включая GPS, что позволяет ему точно следовать заданным маршрутам и избегать препятствий на пути. Агродрон может быть оснащен мультиспектральными камерами и датчиками для сбора данных о состоянии покрытия, что помогает в принятии более обоснованных технических решений.

На основании анализа существующих методов борьбы с обледенением и с учетом недостатков текущих подходов в свете вышеизложенных проблем была разработана методика нанесения гидрофобных составов на поверхности ветрогенераторов с помощью БПЛА. Предлагаемая методика включает в себя следующие этапы:

1. *Подготовка и сбор данных о метеоусловиях.* Перед началом работ по нанесению гидрофобного состава на лопасти ветрогенератора необходимо собрать актуальные метеоданные, включающие в себя скорость ветра, температуру воздуха и влажность. Эти параметры важны для обеспечения безопасности эксплуатации БПЛА и качества обработки поверхностей.

2. *Предварительный облет ветрогенератора с фотофиксацией.* Необходим для выявления возможных мест образования наледи, а также идентификации повреждений и проблемных зон. На данном этапе также может быть произведена оценка труднодоступных участков и зафиксировано время пролета.

3. *Выбор и подготовка гидрофобного состава.* Исходя из особенностей ветрогенерирующего объекта, климатических данных и критериев таблицы 1, следует осуществить обоснованный выбор гидрофобных материалов. Далее подготовить раствор, перемешать компоненты в подготовленной таре.

4. *Сборка и подготовка БПЛА.* При необходимости следует произвести сборку и заправку беспилотного летательного аппарата, оснащенного системой распыления. Убедиться в исправности всех элементов и правильности их установки.

5. *Облет ветрогенератора и нанесение гидрофобного покрытия.* Нанесение гидрофобного покрытия для борьбы с обледенением осуществляют в несколько этапов до достижения толщины слоя 50–70 мкм.

Этап 1. Управление БПЛА с полным облетом ветрогенератора согласно схеме (рис. 2) и нанесение первого слоя покрытия пневматическим способом. Важной задачей этого этапа является обеспечение равномерного распределения состава по поверхности лопастей.

Этап 2. Высыхание первого слоя в течении 15 мин и нанесение второго слоя гидрофобного состава аналогичным способом, обеспечивая равномерное распределение материала.

Этап 3. После полного высыхания облет ветрогенератора и нанесение третьего слоя покрытия.

6. *Контроль качества покрытия.* Для выполнения визуального контроля качества покрытия на наличие дефектов следует осуществить облет ветрогенератора с фото- видеофиксацией. При обнаружении недостатков произвести корректировку путем нанесения еще одного слоя гидрофобного покрытия.

7. *Документация и отчетность.* Составить отчет о проделанной работе, в который необходимо включить время и дату выполнения работ, метеоусловия, выбранный состав гидрофобного покрытия и все этапы процесса нанесения состава на рабочие поверхности ветрогенератора.

Обсуждение и заключение. Эффективное управление жизненным циклом ветроэнергетических установок как объектов капитального строительства предполагает использование комплексного подхода, интегрирующего управленческие решения на всех этапах: от проектной концепции до эксплуатационного мониторинга.

Фундаментальной целью эксплуатационного периода функционирования ветроэнергетического сооружения является увеличение производительности при одновременном повышении ресурса работоспособности сооружения. Достижение данной цели обеспечивается посредством превентивного анализа потенциальных эксплуатационных рисков и их нивелирования на начальных этапах жизненного цикла объекта. Разработанная методология противодействия обледенению лопастных элементов демонстрирует универсальность применения как в отношении существующих ветроэнергетических сооружений, не оснащенных специализированными противообледенительными системами, так и для перспективных проектов. При этом комплекс противообледенительных мероприятий может быть нормативно закреплён в проектной документации в качестве императивных требований, подлежащих реализации как на стадии строительства, так и в рамках периодического обслуживания в процессе эксплуатации.

Внедрение превентивных мер на этапе проектной подготовки обеспечивает существенное увеличение срока службы ветроэнергетического сооружения, эксплуатируемого в условиях неблагоприятного климатического воздействия с повышенной влажностью и низкими температурными режимами. Следовательно, полученные в ходе исследования результаты формируют теоретико-методологическую базу для осуществления многоаспектного управления жизненным циклом ветроэнергетических сооружений, позиционируемых как важный сегмент современного строительного сектора.

Список литературы / References

1. Бежан А.В. Роль ветроэнергетики в социально-экономическом развитии районов Арктической зоны Российской Федерации (на примере Мурманской области). *Арктика: экология и экономика*. 2021;11(3):449–457. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-3-449-457>
- Bezhan AV. Role of Wind Energy in the Socio-economic Development of the Arctic Regions of the Russian Federation (Using the Example of the Murmansk Region). *Arctic: Ecology and Economy*. 2021;11(3):449–457. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-3-449-457>
2. Самарская Н.С., Парамонова О.Н., Лысова Е.П., Чистякова В.Д. Разработка модели жизненного цикла для ветроэнергетической установки. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2022;1(4):25–31. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-25-31>
- Samarskaya NS, Paramonova ON, Lysova EP, Chistyakova VD. Development of a Life Cycle Model for a Wind Power Plant. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2022;1(4):25–31. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-25-31>
3. Умурзаков А.К. Способы борьбы с обледенением лопастей ветрогенератора. *Мировые естественно-научные исследования современности. Технический прогресс*. 2023;229–230.
- Umurzakov AK. Ways to Combat Icing of Wind Turbine Blades. *Modern World Natural Science Research. Technological Progress*. 2023; 229-230. (In Russ.).
4. Okulov V, Kabardin I, Mukhin D, Stepanov K, Okulova N. Physical Deicing Techniques for Wind Turbine Blades. *Energies*. 2021;14(20):6750. <https://doi.org/10.3390/en14206750>
5. Martini F, Contreras Montoya LT, Ilinca A. Review of Wind Turbine Icing Modelling Approaches. *Energies*. 2021;14(16):5207. <https://doi.org/10.3390/en14165207>
6. Wang Q, Yi X, Liu Y, Ren J. Numerical Investigation of Dynamic Icing of Wind Turbine Blades under Wind Shear Conditions. *Renewable Energy*. 2024;227:120495. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120495>
7. Contreras Montoya LT, Lain S, Ilinca A. A Review on the Estimation of Power Loss Due to Icing in Wind Turbines. *Energies*. 2022;15(3):1083. <https://doi.org/10.3390/en15031083>
8. Meledin VG, Kabardin I, Dvoinishnikov SV, Zuev VO. Experimental Research on Combined Methods against Icing of Wind Turbine Blades. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2024; 33(4):779–791. <https://doi.org/10.1134/S181023282404009X>
9. Беляев А.В., Антипов С.С. Жизненный цикл объектов строительства при информационном моделировании зданий и сооружений. *Промышленное и гражданское строительство*. 2019;1:65–72. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36973984> (дата обращения 10.02.2025).
- Belyaev AV, Antipov SS. Life Cycle of Construction Objects in Information Modeling of Buildings and Structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2019;1:65–72. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36973984> (accessed: 10.02.2025).
10. Шустиков С.А., Ульянова Н.В. Обзор конструктивных решений по борьбе с обледенением самолета. В: *Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции «Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве»*. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 2021. С. 337–344. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48286208> (дата обращения 10.02.2025).
- Shustikov SA, Ulyanova NV. Review of Constructive Solutions for Aircraft Deicing. *Proceedings of All-Russian Scientific Practical Conference Modern Technologies in Shipbuilding and Aviation Education, Science and Manufacturing*. 2021. P. 337–344 (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48286208> (accessed: 10.02.2025).
11. Ахременко С.А., Виктор Д.А., Протченко М.В. Анализ перспектив развития современных систем антиобледенения. В: *Материалы международной научно-практической конференции «Инновации в строительстве»*. Брянск: БГИТУ; 2019. С. 136–142. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43811094> (дата обращения 10.02.2025).
- Akhremenko SA, Viktorov DA, Protchenko MV. Analysis of Prospects for the Development of Modern Deicing Systems. *Innovations in Construction*. 2019. P. 136–142. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43811094>. (accessed: 10.02.2025).
12. Куркина И.И. Исследование структурных, электрических и оптических свойств фторированного графена и структур графен/фторированный графен/кремний. В: *Материалы V Международной конференции с элементами научной школы «Новые материалы и технологии в условиях Арктики»*. Якутск: СВФУ им. М.К.Аммосова; 2022. С. 43–44. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49580222> (дата обращения 10.02.2025).
- Kurkina II. Investigation of the Structural, Electrical and Optical Properties of Fluorinated Graphene and Graphene/fluorinated Graphene/silicon Structures. *New materials and technologies in the Arctic*. 2022. P. 43–44. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49580222> (accessed: 10.02.2025).
13. Лебедева О.С., Лебедев Н.Г. Пьезопроводимость графеновых нанолент. Упругопластические деформации. *Физика твердого тела*. 2024;66(4):608–614. <https://doi.org/10.61011/FTT.2024.04.57799.25>

Lebedeva OS, Lebedev NG. Piezo Conductivity of Graphene Nanoribbons. Elastoplastic Deformations. Solid State Physics. 2024;66(4):608-614. <https://doi.org/10.61011/FTT.2024.04.57799.25>

14. Wang H, Wang HS, Ma C, Chen L, Jiang C, Xie X. et al. Graphene Nanoribbons for Quantum Electronics. *Nature Reviews Physics*. 2021;3(12):791–802. <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00370-x>

Об авторе:

Самарская Наталья Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения, климатехники и альтернативных энергоустановок Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), nat-samars@yandex.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Natalia S. Samarskaya, Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Climate Engineering and Alternative Energy Installations at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), nat-samars@yandex.ru

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

The author has read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 22.02.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 04.03.2025

Принята к публикации / Accepted 13.03.2025