

8(149)

Владимир Михайлович Чаплин (28 июля (9 августа) 1861 — 10 ноября 1931) — русский и советский учёный, специалист в области отопительно-вентиляционной техники.

Дед писательницы Веры Чаплиной[2].
Потомственный дворянин из рода Чаплиных, восходящего[3] ко Льву Чаплину (середина XV века)[4].

В 1883 году окончил Императорское Московское техническое училище (ИМТУ), а в 1898 году получил в училище должность профессора. В 1898—1909 гг. также преподавал в Московском Училище живописи, ваяния и зодчества.

В 1895 году вместе с коллегой по ИМТУ архитектором В. Г. Залесским Чаплин организовал торговый дом «В. Залесский и В. Чаплин». В 1902 году Залесский и Чаплин построили собственный дом на Большой Дмитровке, 16, в котором их семьи имели по отдельному этажу и где располагались помещения их технической конторы[5]. Среди реализованных проектов торгового дома «В. Залесский и В. Чаплин» — системы отопления и вентиляции почти 1500 зданий[6] в десятках городах Российской Империи: Музей изящных искусств имени императора Александра III, Румянцевский музей, Политехнический музей, Аудиторный корпус Московского университета, Императорское Московское техническое училище, Московское училище живописи, ваяния и зодчества, Александровское военное училище, Брестский (Белорусский) вокзал, автозавод А. М. О., Сандуновские бани, гостиница Метрополь, ресторан Эрмитаж, здание страхового общества «Россия», Алексеевская глазная больница, странноприимный дом Шереметева, храм Василия Блаженного, склеп великого князя Сергея Александровича в Чудовом монастыре, Перервинский монастырь, Заиконоспасский монастырь, храм Марфо-Мариинской обители — все в Москве; храм-усыпальница Юсуповых в Архангельском, Петербургская городская детская больница, Путиловский завод, Архангельские городские ряды, Нижегородский городской театр, Киевский коммерческий институт, царский дворец в Ливадии, Иркутский завод «Треугольник», детская больница в Баку, фабрика Столыпина в Пензе, храм Казанской Божией матери в Риге, электрическая станция в Рязани, Тамбовский пороховой завод, Волжский Канальный банк в Самаре, Калужское Епархиальное училище, Императорский Харьковский университет и многие другие.

В 1903 году В. М. Чаплин создал первую в России систему водяного отопления с радиаторами. Предложенная им водяная система была прототипом широко применяемых в настоящее время систем отопления с радиаторами. Система была запатентована, а также получила признание на всемирной выставке в Париже 1904 года.



165 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
9 августа 2026 г.

ЧАПЛИН
ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ
1861-1931 гг.



UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научный журнал

Издается ежемесячно с ноября 2013 года

Выпуск: 8(149)

Август 2026 г.

Часть 6

Новосибирск
2026

Главный редактор журнала:

Звездина Марина Юрьевна – д-р физ.-мат. наук, доц.

Редакционная коллегия:

Абдуллин Тимур Зуфарович – канд. техн. наук;

Колесников Александр Сергеевич – канд. техн. наук, проф.;

Манасян Сергей Керопович – д-р техн. наук, проф.;

Мартышкин Алексей Иванович – канд. наук, доц.;

Мерганов Аваз Мирсултанович – PhD;

Немирова Любовь Федоровна – канд. техн. наук, доц.;

Полтавец Валерий Васильевич – д-р техн. наук, доц.;

Радкевич Мария Викторовна – д-р техн. наук, проф.;

Старченко Ирина Борисовна – д-р техн. наук, проф.;

Усманов Хайрулла Сайдуллаевич – д-р техн. наук, проф.;

Фозилов Садриддин Файзуллаевич – д-р техн. наук, проф.;

Шайтура Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доц.;

Яронова Наталья Валерьевна – канд. техн. наук, доц.;

Мажидов Кахрамон Халимович – д-р хим. наук, проф.;

Тимухина Елена Николаевна – д-р техн. наук, проф.;

Деев Владислав Борисович – д-р техн. наук, проф.;

Кокшаров Сергей Александрович – д-р техн. наук, проф.

U55 Universum: технические науки : электронный научный журнал. — № 8(149). — Часть 6. — Новосибирск : Изд-во «Юниверсум», 2026. — 72 с. — Текст : электронный. — URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/category/8149> (дата публикации: 28.08.2026).

Содержание

Статьи на русском языке

Инфраструктура и транспорт

Строительство, архитектура и жилищно-коммунальное хозяйство

Виртуальная реальность как интерфейс цифровой информационной модели объекта культурного наследия	4
<i>Жарков Дмитрий Игоревич</i>	
<i>Короткова Анна Сергеевна</i>	
Нелинейно деформационная модель оценки прочности по нормальному сечению предварительно напряженного центрально-обжатого элемента, работающего на изгиб	14
<i>Мирзаев Пулат Таджиевич</i>	
<i>Шамансурова Зулайхо Пулатовна</i>	
Совершенствование технологии процессов теплоизоляции наружных стен многоэтажных жилых зданий	36
<i>Сайдахмедова Захрохон Рустам қизи</i>	
Влияние микроволокон волластонита на свойства цементных композитов	47
<i>Сатторов Зафар Мурадович</i>	
<i>Отажонов Олмосбек Аскарали угли</i>	
Экспериментальное исследование физико-механических и микроструктурных свойств бетона на основе резинового порошка, полученного из отработанных автомобильных шин и модифицированного химической добавкой	59
<i>Хасанов Собир Садыкович</i>	
<i>Шакиров Икрам Исламович</i>	
<i>Соттикулов Элёр Сотимбоевич</i>	

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ИНФРАСТРУКТУРА И ТРАНСПОРТ

СТРОИТЕЛЬСТВО, АРХИТЕКТУРА И ЖИЛИЩНО-
КОММУНАЛЬНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Статья поступила в редакцию: 14.07.2026

Статья принята к публикации: 10.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 72.025:004.946

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23300

**Виртуальная реальность как интерфейс цифровой информационной
модели объекта культурного наследия**

Жарков Дмитрий Игоревич
студент

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург
E-mail: zharkov.di@bim-russia.ru

Короткова Анна Сергеевна
ст. преп. Высшая школа социальных и политических наук, ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

**Virtual reality as an interface to the digital information model of a cultural
heritage site**

Zharkov Dmitry Igorevich
student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russian Federation, Saint Petersburg

Korotkova Anna Sergeevna
senior Lecturer
Higher School of Social and Political Sciences
Institute of Social Sciences Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russian Federation, Saint Petersburg

Библиографическое описание: Жарков Д.И., Короткова А.С. Виртуальная реальность как интерфейс цифровой информационной модели объекта культурного наследия // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23300>

Аннотация

Работа с историческим зданием требует одновременного обращения к обмерным чертежам, архивным источникам, результатам обследований и проектным материалам. В HBIM эти сведения связываются с геометрией объекта, но пользователь часто получает их через таблицы свойств, файловые каталоги и отдельные окна. Из-за этого документальный контекст воспринимается отдельно от самого здания. В статье представлены результаты концептуального проектирования архитектуры информационного взаимодействия между средой общих данных, HBIM-моделью и VR-интерфейсом. Объектом исследования является процесс интеграции цифровой информационной модели объекта культурного наследия с виртуальной средой как интерфейсом доступа к данным. Результатом проектирования стала архитектурная схема взаимодействия основных компонентов информационной системы, обеспечивающая двусторонний обмен данными между виртуальной сценой, цифровой моделью и средой общих данных. Новизна предложенного решения заключается в организации двустороннего информационного обмена: замечания, статусы и результаты осмотра, созданные в VR-интерфейсе, возвращаются в HBIM-модель и среду общих данных, что превращает виртуальную реальность из средства визуализации в рабочий инструмент документирования. Предложенная схема включает среду общих данных, HBIM, интеграционный модуль, виртуальный интерфейс и обратную запись результатов. Она предусматривает выбор элементов, обращение к связанным документам, сравнение состояний, фиксацию повреждений и подготовку замечаний. Такой подход может использоваться при обследовании, реставрации, приспособлении и эксплуатации объектов культурного наследия.

Abstract

This paper presents the results of a conceptual design of the information interaction architecture between a common data environment, an HBIM model, and a VR interface. The object of the study is the process of integrating a digital information model of a cultural heritage site with a virtual environment as a data access interface. The result of the design is an architectural scheme of interaction between the main components of the information system, which provides two-way data exchange between the virtual scene, the digital model, and the common data environment. The novelty of the proposed solution lies in the organization of bilateral information exchange: comments, statuses, and inspection results created in the VR interface are returned to the HBIM model and the common data environment, turning virtual reality from a visualization tool into a working documentation tool. The proposed model combines a common data environment, HBIM, an integration module, a virtual interface, and feedback recording. It supports element selection, access to linked documents, comparison of states, damage recording, and preparation of comments. The approach can be applied during surveys, restoration, adaptive reuse, and operation of cultural heritage assets.

Ключевые слова: объект культурного наследия, HBIM, цифровая информационная модель, виртуальная реальность, среда общих данных, реставрация.

Keywords: cultural heritage site, HBIM, digital information model, virtual reality, common data environment, restoration.

Введение

Документирование объекта культурного наследия включает не только геометрию, но и архивные источники, результаты обследований, характеристики материалов и сведения о вмешательствах. Концепция Historic Building Information Modelling (HBIM) первоначально была предложена как способ построения параметрической модели исторического здания по данным лазерного сканирования, фотограмметрии и анализа архитектурных форм [13].

В дальнейшем HBIM стало связующей структурой для геометрии, атрибутов и документов. Интеграция с ГИС, онтологиями и средствами пространственной фиксации расширила область применения моделей до реставрации, мониторинга и эксплуатации [17, 12]. В отечественной практике сохраняются различия в методах моделирования и классификации элементов [2, 3], тогда как версии документов и права доступа целесообразно вести в среде общих данных [8].

Большинство HBIM-систем разделяет пространственную модель, свойства и внешние файлы, что затрудняет работу с документами в контексте конкретного элемента. Виртуальная реальность уже используется для анализа архитектурных решений [4], однако её применение в качестве интерфейса к данным цифровой модели изучено недостаточно. Объектом настоящего исследования является процесс интеграции цифровой информационной модели объекта культурного наследия с виртуальной средой как интерфейсом доступа к данным. Цель исследования — разработать архитектуру информационного взаимодействия между средой общих данных, HBIM-моделью и VR-интерфейсом, обеспечивающую двусторонний обмен данными и позволяющую использовать виртуальную реальность не только для визуализации, но и для документирования состояния объекта. Новизна предложенного решения заключается в организации двустороннего информационного обмена: замечания, статусы и результаты осмотра, зафиксированные в VR, возвращаются в HBIM-модель и среду общих данных. Этим предлагаемый подход отличается от известных решений [14, 9, 16], в которых VR используется преимущественно для визуализации, а обратная запись данных не предусмотрена.

Для достижения цели решались следующие задачи: анализ существующих подходов к интеграции HBIM и VR; определение состава данных, подлежащих передаче между компонентами; разработка архитектурной схемы взаимодействия модулей; описание пользовательских сценариев и требований к реализации.

Материалы и методы

Исследование выполнено как концептуальное проектирование архитектуры информационной системы, объединяющей среду общих данных, HBIM-модель и VR-интерфейс. Методологическую основу составили системный анализ (рассмотрение HBIM, среды общих данных и VR как взаимосвязанных компонентов единой информационной системы) и структурно-функциональное моделирование (определение состава модулей, их функций и информационных потоков между ними).

Исходными данными для проектирования послужили 17 отечественных и зарубежных публикаций по HBIM, цифровой документации наследия, средам общих данных и VR [1–17]. Источники сопоставлялись по составу данных, способам их связи с геометрией и характеру

пользовательского доступа. На основе анализа выявлены ограничения существующих решений (преимущественно односторонний экспорт геометрии, отсутствие обратной записи данных) и сформулированы требования к проектируемой архитектуре.

Затем информационный процесс был разложен на этапы — от хранения исходных материалов до действий в виртуальной сцене и возврата результатов. На основе этого разработана архитектурная схема взаимодействия компонентов, представленная на рис. 1. Схема проверялась на задачах исследователя, реставратора, проектировщика, эксперта и эксплуатирующей организации. Архитектура не привязана к конкретному программному продукту.



Рисунок 1. Архитектура информационного взаимодействия между средой общих данных, NBIM-моделью и VR-интерфейсом (разработано авторами)

Результаты и обсуждения

Архитектура взаимодействия компонентов информационной системы

Разработанная архитектура информационного взаимодействия (рис. 1) включает пять основных компонентов:

1. **Среда общих данных (СОД)** — централизованное хранилище всех документов, связанных с объектом наследия: архивные источники, результаты обследований, обмерные чертежи, фотофиксация, паспорта объектов, акты технического состояния, проектная документация, а также версии NBIM-модели. СОД обеспечивает контроль версий, разграничение прав доступа и хранение метаданных [6].

2. **Цифровая информационная модель (NBIM)** — семантически обогащённая геометрическая модель объекта, в которой каждому элементу присвоен уникальный идентификатор. Модель содержит геометрию, атрибуты (материал, датировка, состояние, исторические периоды) и ссылки на документы из СОД [1, 2].

3. **Интеграционный модуль** — связующее звено между СОД, HBIM и VR-интерфейсом. Он преобразует геометрию из формата IFC в оптимизированную для VR сцену, переносит атрибуты и идентификаторы элементов, сопоставляет документы с элементами модели, а также принимает обратные данные из VR и передаёт их в HBIM и СОД [11].

4. **VR-интерфейс** — виртуальная среда, в которой пользователь может перемещаться по модели, выбирать элементы, просматривать их атрибуты и связанные документы, сравнивать состояния (историческое, фактическое, проектное), фиксировать повреждения и создавать замечания [8, 9, 10].

5. **Обратная запись результатов** — механизм передачи замечаний, статусов и результатов осмотра из VR-интерфейса в интеграционный модуль и далее в HBIM-модель и СОД [12].

Ключевым отличием предложенной архитектуры от известных решений является **двусторонний информационный обмен**. В существующих подходах (см. [9, 14, 16]) VR используется как средство визуализации ранее подготовленной модели: данные передаются из HBIM в VR по одностороннему каналу, а замечания и результаты осмотра пользователь фиксирует вне виртуальной среды (в отдельном ПО, таблицах, текстовых отчётах). Это создаёт разрыв между пространственным восприятием объекта и документированием его состояния.

В предложенной архитектуре, напротив, VR выступает не только как средство визуализации, но и как **интерфейс документирования**. Интеграционный модуль обеспечивает синхронизацию данных: при выборе элемента в виртуальной сцене пользователю доступны его атрибуты и связанные документы из СОД. В свою очередь, замечания, статусы и результаты осмотра, созданные в VR, передаются обратно через интеграционный модуль, фиксируются в HBIM и сохраняются в СОД. Таким образом, виртуальная реальность становится полноценным рабочим интерфейсом, связывающим пространственное наблюдение, документальное основание и управленческое решение [11].

Механизм двустороннего информационного взаимодействия реализуется следующим образом. Прямой канал (СОД → HBIM → VR): документы и атрибуты хранятся в СОД и HBIM; интеграционный модуль по запросу пользователя формирует оптимизированную VR-сцену, сохраняя идентификаторы элементов и ссылки на документы. Обратный канал (VR → HBIM → СОД): пользователь в виртуальной сцене выбирает элемент и создаёт замечание, фиксирует повреждение или изменяет статус элемента; интеграционный модуль принимает эти данные, сопоставляет с соответствующим элементом HBIM-модели и сохраняет изменения в модели и в СОД. Такой механизм обеспечивает целостность данных и позволяет отслеживать историю изменений в едином информационном контуре [10, 11].

Пользовательские сценарии

Набор операций определяется ролью пользователя. В таблице 1 систематизированы основные пользовательские сценарии, их задачи и требуемые функции VR-интерфейса.

Таблица 1.

Пользовательские сценарии и требования к VR-интерфейсу

Роль пользователя	Основные задачи	Требуемые функции VR-интерфейса
Исследователь	Изучение архивных источников, анализ исторической достоверности, сопоставление состояний	Доступ к архивным документам, привязка источников к элементам модели, сравнение состояний, визуализация исторических периодов
Специалист по обследованию	Визуальный осмотр, фиксация повреждений и дефектов, оценка технического состояния	Выбор элементов, фиксация повреждений с привязкой к геометрии, создание замечаний с фото- и текстовой фиксацией, отметка статуса элемента
Реставратор	Анализ материалов, планирование вмешательств, контроль качества реставрации	Просмотр характеристик материалов, сравнение фактического и проектного состояний, визуализация слоёв, отметка этапов реставрации
Проектировщик	Разработка проектных решений, согласование изменений	Сравнение состояний, визуализация проектных предложений, внесение замечаний, проверка коллизий
Эксперт	Проверка соответствия, формирование заключений	Пространственно привязанные замечания, просмотр всей доступной информации по элементу, формирование отчётов
Эксплуатирующая организация	Мониторинг технического состояния, планирование ремонтов	Контроль состояния элементов, просмотр истории изменений, отслеживание статусов, планирование обследований

Как показано в таблице 1, каждая роль требует специфического набора операций. Исследователь обращается к архивным источникам [12], специалист фиксирует повреждения [2], реставратор анализирует материалы [3], проектировщик сравнивает состояния [4], эксперт формирует пространственно привязанные замечания [8], а эксплуатирующая организация контролирует техническое состояние [17]. В шлеме целесообразно показывать краткую карточку элемента, открывая объемные документы отдельно. Размещение панелей и объем информации должны учитывать поле зрения и структуру сцены [5]. Документированное состояние, научная реконструкция и проектное предложение должны различаться визуально и сопровождаться указанием источника и степени обоснованности [1]. Реализация модели требует синхронизации, устойчивых идентификаторов, разграничения доступа и оптимизации геометрии [15]. Ограничениями остаются дефицит специализированных библиотек и отсутствие единых процедур формирования НВИМ для реставрации [7]. Поэтому разработку VR-интерфейса следует начинать с регламентации данных, а не с экспорта модели [6].

Заключение

В результате концептуального проектирования разработана архитектура информационного взаимодействия между средой общих данных, HBIM-моделью и VR-интерфейсом. Предложенная архитектура включает пять компонентов: среда общих данных (хранение документов и версий), HBIM-модель (геометрия, атрибуты и ссылки), интеграционный модуль (преобразование форматов и синхронизация), VR-интерфейс (визуализация, навигация, выбор элементов, просмотр документов, фиксация замечаний) и механизм обратной записи результатов.

Ключевым результатом является организация двустороннего информационного обмена: замечания, статусы и результаты осмотра, созданные в VR, возвращаются в HBIM-модель и среду общих данных, что отличает предложенный подход от известных решений с односторонним экспортом данных [9, 14, 16]. Это превращает виртуальную реальность из средства визуализации в полноценный рабочий интерфейс документирования.

Архитектура применима при обследовании, реставрации, приспособлении и эксплуатации исторических зданий [17, 11]. Следующий этап — создание прототипа на конкретном объекте и оценка полноты передачи атрибутов, удобства профессиональных сценариев и целесообразности выполнения отдельных операций в VR.

Список литературы

1. Бородкин Л.И., Мироненко М.С., Чертополохов В.А., Белоусова М.Д., Хлопиков В.В. Технологии виртуальной и дополненной реальности (VR/AR) в задачах реконструкции исторической городской застройки: на примере московского Страстного монастыря // Историческая информатика. – 2018. – № 3. – С. 76–88. – DOI: 10.7256/2585–7797.2018.3.27549.
2. Вареник К.А. Обзор исследований внедрения технологий информационного моделирования для объектов архитектурного наследия // Вестник Евразийской науки. – 2023. – Т. 15, № 3. – С. 1–20.
3. Кашеварова Г.Г., Сёмина А.Е. Информационное моделирование зданий и классификация архитектурных элементов для объектов культурного наследия // Academia. Архитектура и строительство. – 2022. – № 4. – С. 138–143. – DOI: 10.22337/2077-9038-2022-4-138-143.
4. Короткова А.С. Виртуальная реальность в архитектурной практике // Научный альманах Центрального Черноземья. – 2022. – № 1. – С. 261–266.
5. Лемак С.С., Чертополохов В.А., Кручинина А.П., Белоусова М.Д., Бородкин Л.И., Мироненко М.С. Задачи оптимизации расположения элементов интерфейса в виртуальной реальности (в контексте создания виртуальной реконструкции исторического рельефа Белого города) // Историческая информатика. – 2020. – № 1. – С. 81–93. – DOI: 10.7256/2585–7797.2020.1.32205.
6. Мироненко М.С., Чертополохов В.А., Белоусова М.Д. Технологии виртуальной реальности и решение задачи разработки универсального интерфейса для исторических 3D-реконструкций // Историческая информатика. – 2020. – № 4. – С. 192–205. – DOI: 10.7256/2585–7797.2020.4.34671.

7. Пухаренко Ю.В., Шангина Н.Н., Харитонов А.М., Сизов Д.С. Проблемы и перспективы развития информационного моделирования для реставрации объектов культурного наследия // Academia. Архитектура и строительство. – 2024. – № 3. – С. 171–175. – DOI: 10.22337/2077-9038-2024-3-171-175.
8. Савчиков А.В., Нахимовский А.И., Короткова А.С. Методика управления объектами культурного наследия в среде общих данных // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 5. – С. 55–69. – DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-55-69.
9. Banfi F. The Evolution of Interactivity, Immersion and Interoperability in HBIM: Digital Model Uses, VR and AR for Built Cultural Heritage // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2021. – Т. 10, № 10. – P. 685–703. – DOI: 10.3390/ijgi10100685.
10. Fiorenza J., Rimella N., Calandra D., Osello A., Lamberti F. Enhancing HBIM-to-VR Workflows: Semi-Automatic Generation of Virtual Heritage Experiences Using Enriched IFC Files // Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage. – 2025. – DOI: 10.1016/j.daach.2024.e00391.
11. Khan M.S., Khan M., Bughio M., Talpur B.D., Kim I.S., Seo J. An Integrated HBIM Framework for the Management of Heritage Buildings // Buildings. – 2022. – Т. 12, № 7. – DOI: 10.3390/buildings12070964.-P.
12. Lovell L.J., Davies R.J., Hunt D.V.L. The Application of Historic Building Information Modelling (HBIM) to Cultural Heritage: A Review // Heritage. – 2023. – Т. 6, № 10. – P. 6691–6717. – DOI: 10.3390/heritage6100350.
13. Murphy M. McGovern E., Pavia S. Historic Building Information Modelling (HBIM) // Structural Survey. – 2009. – Т. 27, № 4. – P. 311–327. – DOI: 10.1108/02630800910985108.
14. Osello A., Lucibello G., Morgagni F. HBIM and Virtual Tools: A New Chance to Preserve Architectural Heritage // Buildings. – 2018. – Т. 8, № 1. – DOI: 10.3390/buildings8010012.
15. Panya D.S., Kim T., Choo S. An Interactive Design Change Methodology Using a BIM-Based Virtual Reality and Augmented Reality // Journal of Building Engineering. – 2023. – Т. 68. – DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.106030.
16. Tini M.A., Forte A., Girelli V.A., Lambertini A., Roggio D.S., Bitelli G., Vittuari L. Scan-to-HBIM-to-VR: An Integrated Approach for the Documentation of an Industrial Archaeology Building // Remote Sensing. – 2024. – Т. 16, № 15. – P. 2859–2885. – DOI: 10.3390/rs16152859.-.
17. Yang X., Grussenmeyer P., Koehl M., Macher H., Murtiyoso A., Landes T. Review of Built Heritage Modelling: Integration of HBIM and Other Information Techniques // Journal of Cultural Heritage. – 2020. – Т. 46. – P. 350–360. – DOI: 10.1016/j.culher.2020.05.008.

References

1. Murphy M. McGovern E., Pavia S. Historic Building Information Modelling (HBIM) // Structural Survey. – 2009. – Т. 27, № 4. – P. 311–327. – DOI: 10.1108/02630800910985108.

2. Yang X., Grussenmeyer P., Koehl M., Macher H., Murtiyoso A., Landes T. Review of Built Heritage Modelling: Integration of HBIM and Other Information Techniques // *Journal of Cultural Heritage*. – 2020. – Т. 46. – P. 350–360. – DOI: 10.1016/j.culher.2020.05.008.
3. Lovell L.J., Davies R.J., Hunt D.V.L. The Application of Historic Building Information Modelling (HBIM) to Cultural Heritage: A Review // *Heritage*. – 2023. – Т. 6, № 10. – P. 6691–6717. – DOI: 10.3390/heritage6100350.
4. Вареник К.А. Обзор исследований внедрения технологий информационного моделирования для объектов архитектурного наследия // *Вестник Евразийской науки*. – 2023. – Т. 15, № 3.
5. Кашеварова Г.Г., Сёмина А.Е. Информационное моделирование зданий и классификация архитектурных элементов для объектов культурного наследия // *Academia. Архитектура и строительство*. – 2022. – № 4. – С. 138–143. – DOI: 10.22337/2077-9038-2022-4-138-143.
6. Savchikov A.V., Nakhimovsky A.I., Korotkova A.S. Methods of managing cultural heritage objects in the environment of general data // *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. – 2024. – № 5. – P. 55–69. – DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-55-69.
7. Korotkova A.S. Virtual reality in architectural practice // *Scientific Almanac of the Central Chernozem region*. – 2018. – Т. 8, № 1. – P. 261–266. – DOI: 10.3390/buildings8010012.
8. Banfi F. The Evolution of Interactivity, Immersion and Interoperability in HBIM: Digital Model Uses, VR and AR for Built Cultural Heritage // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 2021. – Т. 10, № 10. – DOI: 10.3390/ijgi10100685.
9. Tini M.A., Forte A., Girelli V.A., Lambertini A., Roggio D.S., Bitelli G., Vittuari L. Scan-to-HBIM-to-VR: An Integrated Approach for the Documentation of an Industrial Archaeology Building // *Remote Sensing*. – 2024. – Т. 16, № 15. – DOI: 10.3390/rs16152859.
10. Fiorenza J., Rimella N., Calandra D., Osello A., Lamberti F. Enhancing HBIM-to-VR Workflows: Semi-Automatic Generation of Virtual Heritage Experiences Using Enriched IFC Files // *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. – 2025. – DOI: 10.1016/j.daach.2024.e00391.
11. Khan M.S., Khan M., Bughio M., Talpur B.D., Kim I.S., Seo J. An Integrated HBIM Framework for the Management of Heritage Buildings // *Buildings*. – 2022. – Т. 12, № 7. – DOI: 10.3390/buildings12070964.
12. Lemak S.S., Tchertopolokhov V.A., Kruchinina A.P., Belousova M.D., Borodkin L.I., Mironenko M.S. Problems of optimizing the location of interface elements in virtual reality (in the context of creating a virtual reconstruction of the historical relief of the White City) // *Historical Informatics*. – 2020. – № 1. – P. 81–93. – DOI: 10.7256/2585–7797.2020.1.32205.
13. Borodkin L.I., Mironenko M.S., Tistopolokhov V.A., Belousova M.D., Khlopikov V.V. Virtual and augmented reality (VR/AR) technologies in the tasks of reconstruction of historical urban buildings: on the example of the Moscow Strastnoy Monastery // *Historical Informatics*. – 2018. – № 3. – P. 76–88. – DOI: 10.7256/2585–7797.2018.3.27549.

-
14. Panya D.S., Kim T., Choo S. An Interactive Design Change Methodology Using a BIM-Based Virtual Reality and Augmented Reality // Journal of Building Engineering. – 2023. – Т. 68. – DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.106030.
 15. Pukharensko Yu.V., Shangina N.N., Kharitonov A.M., Sizov D.S. Problems and prospects for the development of information modeling for the restoration of cultural heritage sites // Academia. Architecture and construction. – 2024. – № 3. – P. 171–175. – DOI: 10.22337/2077-9038-2024-3-171-175.
 16. Mironenko M.S., Tistopolokhov V.A., Belousova M.D. Virtual reality technologies and solving the problem of developing a universal interface for historical 3D reconstructions // Historical Informatics. – 2020. – № 4. – P. 192–205. – DOI: 10.7256/2585–7797.2020.4.34671.

Статья поступила в редакцию: 15.08.2026

Статья принята к публикации: 20.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 621.315

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23327

Нелинейно деформационная модель оценки прочности по нормальному сечению предварительно напряженного центрально-обжатого элемента, работающего на изгиб

Мирзаев Пулат Таджиевич

канд. техн. наук, проф.

кафедра Инженерное строительство, Ташкентский архитектурно строительный университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: pulatmirza@mail.ru

Шамансурова Зулайхо Пулатовна

докторант, PhD

кафедра Инженерное строительство, Ташкентский архитектурно строительный университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: sh.zulayxo@mail.ru

Nonlinear deformation model for strength assessment of a prestressed centrally compressed member subjected to bending based on its normal cross-section

Mirzayev Pulat

candidate of Technical Sciences, Professor

Department of Civil Engineering, Tashkent University of Architecture and Civil Engineering

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Shamansurova Zulaykho

PhD, Researcher

Department of Civil Engineering, Tashkent University of Architecture and Civil Engineering

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Предлагается практический метод оценки прочности нормальных сечений предварительно напряженных конструкций по нелинейной деформационной модели, основанный на нормативных диаграммах деформирования материалов и способа итерационных процедур. Спецификой метода оценки прочности нормальных сечений элемента по нелинейной деформационной модели является переход от несложных зависимостей метода расчета по предельным состояниям, построенных на эмпирических

Библиографическое описание: Мирзаев П.Т., Шамансурова З.П. Нелинейно деформационная модель оценки прочности по нормальному сечению предварительно напряженного центрально-обжатого элемента, работающего на изгиб // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23327>

формулах, на деформационную модель расчета прочности конструкций, основанный на диаграммах деформирования бетона и арматуры. В деформационном методе расчета переменной величиной является положение нейтральной линии, связанное с жесткостью конструкции, из-за чего возникают трудности в решении нелинейных уравнений, для упрощения решений которых можно использовать численный метод последовательных приближений. Универсальность деформационной модели заключается в возможности проведения контрольных тестов, например, для верификации конструктивных расчетов в стадии проектирования. Рассматриваемый деформационный метод оценки несущей способности преднапряженных элементов допускает контроль за изменением напряженно-деформированного состояния нормального сечения от начала загрузки до момента разрушения, а также дает возможность выяснить признак потери несущей способности элемента – «по бетону или арматуре». Прикладные возможности предлагаемого метода установлены на примере оценки прочности нормального сечения предварительно напряженной стойки безопалубочного формования для опор высоковольтных линий, которая эксплуатируется как консольная балка при действии знакопеременных моментов. Цель исследования – прикладное применение нелинейной деформационной модели в практике проектирования при оценке прочности нормальных сечений предварительно напряженных изгибаемых элементов итерационными процедурами в вычислительной среде Microsoft Excel.

Abstract

A practical method for assessing the strength of normal cross-sections of prestressed structures using a nonlinear deformation model is proposed. The method is based on standard stress–strain diagrams for structural materials and iterative procedures. The specific feature of the proposed method for assessing the strength of normal cross-sections is the transition from relatively simple limit-state design relationships based on empirical formulas to a deformation-based approach for structural strength analysis using stress–strain diagrams for concrete and reinforcement.

In the deformation-based method, the variable parameter is the position of the neutral axis, which is related to the stiffness of the structure. This results in difficulties in solving nonlinear equations; therefore, a numerical method of successive approximations can be used to simplify their solution. The versatility of the deformation model lies in its ability to perform verification tests, for example, to validate structural design calculations at the design stage.

The considered deformation-based method for assessing the load-bearing capacity of prestressed members makes it possible to monitor changes in the stress–strain state of a normal cross-section from the beginning of loading to failure. It also makes it possible to identify the mode of loss of load-bearing capacity of the member, i.e., whether failure occurs due to concrete or reinforcement.

The practical applicability of the proposed method is demonstrated by assessing the strength of the normal cross-section of a prestressed pole manufactured by a formwork-free production method for high-voltage transmission line supports. The pole operates as a cantilever beam under the action of alternating bending moments.

The aim of the study is the practical application of the nonlinear deformation model in design practice for assessing the strength of normal cross-sections of prestressed bending members using iterative procedures in the Microsoft Excel computational environment.

Ключевые слова: железобетон, деформация, напряжение, модуль деформации, центр тяжести, кривизна, итерационные процедуры.

Keywords: reinforced concrete, strain, stress, deformation modulus, center of gravity, curvature, iterative procedures.

Введение

В нормативных документах [13, с. 30; 11, с. 17-19] предусматриваются два метода к расчету прочности нормального сечения обычных и предварительно напряженных железобетонных конструкций:

- по предельным усилиям;
- по нелинейно деформационной модели (НДМ).

Согласно методу предельных усилий, прочность элемента считается обеспеченной, если усилие F от внешних нагрузок и воздействий, в том числе с учетом предварительного напряжения арматуры не превышает предельного усилия F_{ult} , воспринимаемого элементом в рассматриваемом сечении. Предельным усилием для изгибаемого элемента является предельный момент M_{ult} , который приводит к потере его несущей способности. Одной из предпосылок расчета является представление о равномерном распределении напряжений в бетоне сжатой зоны, где напряжения принимаются равными расчетному сопротивлению бетона сжатию R_b . Такой принцип обеспечивает определение прочности, но не дает возможность вычислить деформации и кривизну сечения элемента. В связи с этим, расчет по деформациям для определения прогиба элемента проводится по непрактичным формулам с большим количеством эмпирических коэффициентов. Основным преимуществом метода расчета по предельным усилиям считается возможность выполнения расчетов с использованием калькулятора.

Основой метода оценки прочности элемента по НДМ является применение диаграмм деформирования бетона и стальной арматуры, устанавливающих связь между напряжениями σ и деформациями ε . Для высокопрочной проволочной арматуры используется трехлинейная диаграмма состояния арматуры с условным пределом текучести [1, с. 26]. Для бетона допустимо использовать аналитические двух-, трехлинейные диаграммы. Такие диаграммы для бетона базируются на основе параметра прочности R_b и соответствующих ему деформациях $\varepsilon_{b0} = 0,0015$. Расчеты по НДМ могут осуществляться с использованием программных комплексов, реализующих метод конечных элементов [3, с. 50–51]. Однако создание расчетных моделей является трудоемким процессом, поскольку возникает необходимость моделирования взаимодействия бетона и арматуры и использования достоверных экспериментальных данных для верификации расчетной модели [3, с. 51–53]. Вместе с тем НДМ является практичным методом, позволяющим оценивать эффективность разрабатываемых конструктивных решений [11, с. 128–130]. По сравнению с методом

предельных усилий, метод расчета по НДМ допускает контролировать нелинейное изменение напряженно-деформированного состояния сечения не только в предельном, но и в допредельном и запредельном состояниях.

В последние годы к проблеме методики оценки прочности по нормальным сечениям железобетонных конструкций по НДМ проявляется значительный интерес [14, с. 172; 2, с. 18–19; 16, с. 80; 8, с. 93–95; 9, с. 44–46; 10, с. 38–40], так как в нормативных методических документах не имеется способов ее численной реализации, что приводит проектировщиков к затруднениям при определении способа для их решения. Хотя НДМ формально рассматривается как достоверный метод расчета железобетонных элементов, но доказательная база для этого отсутствует [5, с. 128–130; 4, с. 5–7]. В работах [1, с. 51–53; 16, с. 80–83; 8, с. 26–30] отмечается, что расчет железобетонных конструкций по НДМ можно отнести к проверочным методам оценки прочности элемента, что обуславливает значимость рассматриваемой проблемы. НДМ эффективно использовать тогда, когда уже проведен расчет конструкции по предельным усилиям, а также при известных расчетных параметрах (геометрия сечения, классы бетона и арматуры, эксплуатационные нагрузки и воздействия). В дальнейшем представляется перспективным использование НДМ для единого расчета железобетонных элементов, в том числе предварительно напряженных, по различным группам предельных состояний [17, с. 13–14].

При оценке прочности на основе НДМ учитывается нелинейное деформирование бетона и арматуры, а численная реализация модели позволяет более детально оценивать напряженно-деформированное состояние и несущую способность железобетонных элементов [2, с. 144–149], создавая основу для безопасного и рационального проектирования конструкций [19, с. 211–212; 18, с. 605–614]. При этом применяется итерационный метод вычислений. Задача итерационных вычислений состоит в определении значений относительных деформаций в бетоне растянутой и сжатой зон и арматуре, при которых определяется кривизна сечения элемента [12, с. 22–24; 14, с. 164–166]. Кривизна сечения определяется с учетом изменения деформационных характеристик бетона и арматуры [14, с. 165–166; 15, с. 172–174]. При каждой итерации уточняется положение нейтральной линии. Критерием оценки прочности по НДМ является величина относительных деформаций бетона сжатой зоны и арматуры растянутой зоны, полученных расчетным путем, и сравнение их с критериальными параметрами, допускаемыми нормами.

Для численной реализации оценки прочности нормальных сечений железобетонных конструкций по НДМ применима программа Microsoft Excel с использованием VBA (язык программирования Visual Basic for Applications), прикладное использование которого описано в работе [20, с. 1–2].

Объектом расчетно-аналитического исследования является предварительно напряженная центрально-обжатая стойка для опор высоковольтных линий для напряжений 0,4 – 10 кВ, производимая по технологии стенового безопалубочного формования, и работающая как консольная балка при действии знакопеременного момента [6, с. 50–51].

Характерной особенностью предварительно напряженных центрально-обжатых элементов ($A_{sp} = A'_{sp}$), работающих на изгиб, является сниженная величина предельной прочности сечения, по сравнению с предварительно напряженными изгибаемыми элементами, у которых обычно значение A'_{sp} составляет $(0...0,2) A_{sp}$.

Анализ ориентировочных (оценочных) численных примеров расчета прочности стоек, армированных только напрягаемой проволоочной арматурой класса Вр1400, показал следующее: чем больше величина армирования сжатой зоны сечения по отношению к количеству арматуры растянутой зоны, тем меньше несущая способность стойки. На рис. 1 приведен график зависимости предельной несущей способности стойки от значения соотношения площадей сечения арматуры сжатой и растянутой зон сечения (A'_{sp}/A_{sp}). График показывает, что при высоких уровнях соотношений площади сечения арматуры сжатой зоны относительно арматуры растянутой зоны показатели прочности (несущей способности) стойки уменьшаются.

Такая закономерность расчетной оценки прочности изгибаемых элементов с высокими уровнями обжатия бетона элементов напрягаемой арматурой, показывает, что в таких случаях, есть вероятность неоправданного риска, т.е. угрозы аварийности с непредсказуемыми последствиями. Поэтому такой «негативный» фактор следует учитывать при расчете предварительно напряженных изгибаемых элементов, армированных только двойной ненапрягаемой арматурой (особенно, когда при проектировании имеется необходимость принятия решения о высоком уровне обжатия напрягаемой арматурой не только растянутой от внешней нагрузки зоны, но и сжатой зоны сечения элемента).

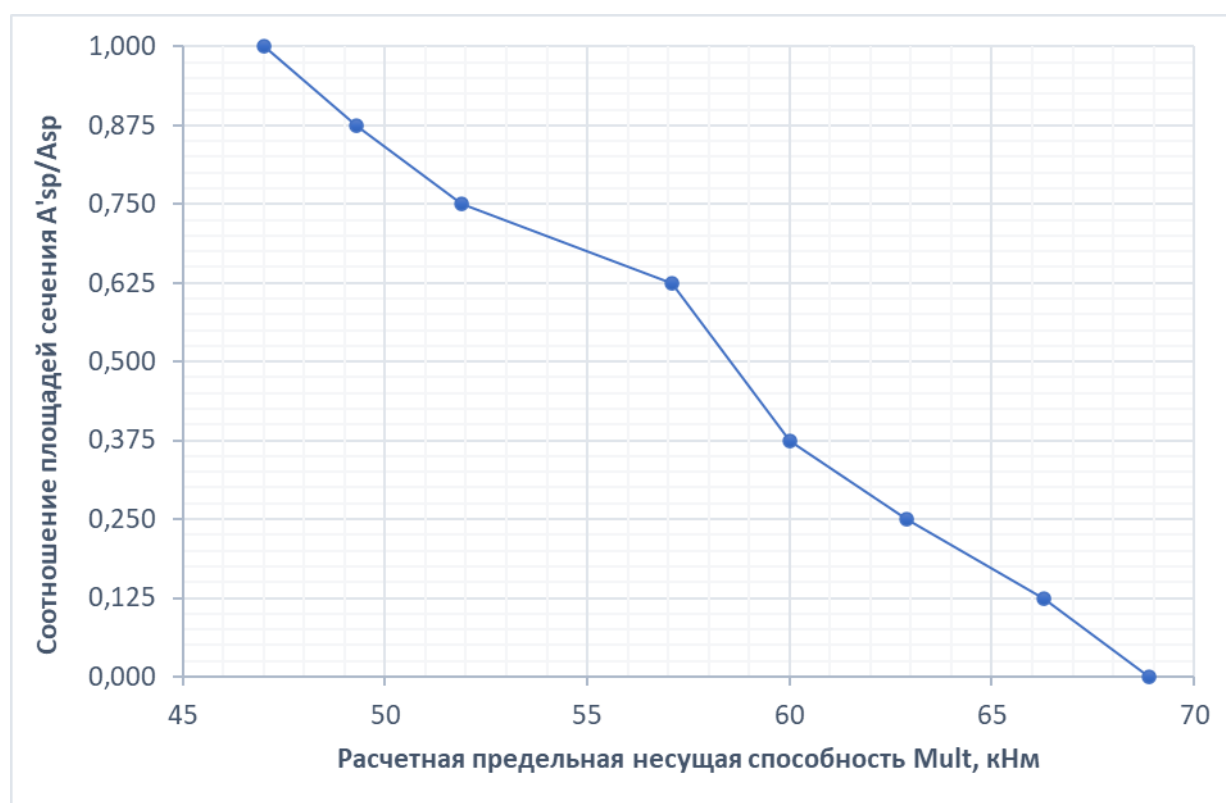


Рисунок 1. График зависимости предельной несущей способности стойки от величины армирования сжатой зоны сечения напрягаемой арматуры

График показывает, что с увеличением соотношения $\frac{A'_{sp}}{A_{sp}}$ показатели прочности M_{ult} стойки снижаются. Отношение M_{ult} (при

$A'_{sp} = A_{sp} = 3,136 \text{ см}^2$, где количество стержней в сжатой и растянутой зонах $n' = n = 16$) к M_{ult} (при $A'_{sp} = 0$; $A_{sp} = 3,136 \text{ см}^2$, где $n' = 0$; $n = 16$) составляет 0,682 – снижение прочности на 31,8%.

Учитывая такой фактор, определена зависимость изменения M_{ult} при увеличении количества арматуры для схемы симметричного армирования $A_{sp} = A'_{sp}$ (рис. 2).



Рисунок 2. График зависимости изменения M_{ult} при увеличении количества арматуры для схемы симметричного армирования $A_{sp} = A'_{sp}$

Вышеотмеченные факторы также повышают интерес к использованию НДМ для практической оценки прочности предварительно напряженных центрально-обжатых элементов, работающих на изгиб.

Цель исследования – практическое применение НДМ при оценке прочности по нормальным сечениям предварительно напряженных изгибаемых элементов в вычислительной среде Microsoft Excel.

Материалы

Поперечное сечение стоек стендового безопалубочного формования представляет собой трапецию, у которой размер верхнего основания меньше нижнего, что способствует сохранению конфигурации свежетоформованного бетона стоек при изготовлении безопалубочным формованием.

Трапецеидальное сечение стойки приводится к прямоугольному сечению, у которого ширина принимается равной меньшему значению основания трапеции ($b = 175$ мм), в связи с тем, что стойка испытывает знакопеременный момент от действия внешних нагрузок (рис. 3).

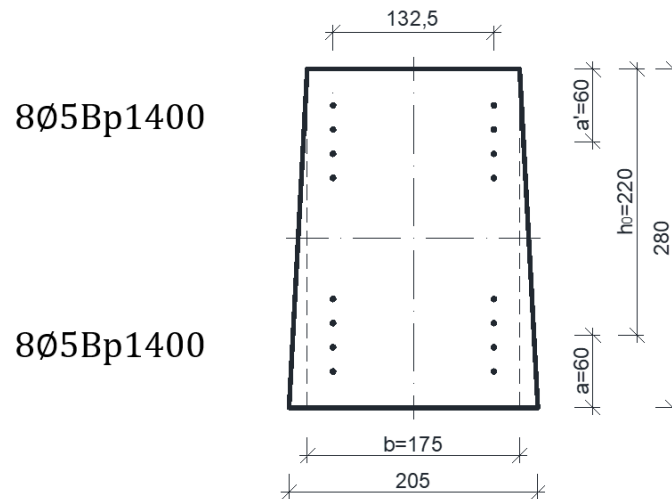


Рисунок 3. Схема армирования сечения стойки для опор ВЛ

Исходные данные

Бетон класса В40: $R_b = 22$ МПа; $R_{bt} = 1,4$ МПа; $E_b = 36000$ МПа. Арматура класса Ø5Bp1400: $R_s = 1215$ МПа; $E_s = 200000$ МПа; $A_{sp} = A'_{sp} = 1,568$ см².

$P = 345$ кН—усилие от предварительного напряжения арматуры;

$M_{sp} = 16,8$ кНм—момент от усилия обжатия;

$M_{ult} = 34,51$ кНм—прочность нормального сечения, рассчитанный по предельным усилиям ($l_0 = 7,5$ м, $F = 4,601$ кН).

$M_{ult1} = M_{ult} - M_{sp} = 17,709$ кНм—момент, воспринимаемый сечением, без момента (M_{sp}), возникающего от усилия обжатия.

$\sigma_{bp} = \sigma'_b = 5,29$ МПа—краевые напряжения в бетоне при обжатии усилием $P_{(2)}$

$$\varepsilon_{bp} = \varepsilon'_{bp} = \frac{\sigma_{bp} (\sigma'_{bp})}{E_b} = \frac{5,29}{36000} = 0,000147;$$

$\sigma_{sp} = 832$ МПа—напряжения в арматурных стержнях после всех потерь.

$$\varepsilon_{sp} = \frac{832}{200000} = 0,00416.$$

На рис. 4 показана схема напряженно-деформированного состояния после обжатия стойки предварительно напряженной арматурой (после всех потерь напряжения в арматуре).

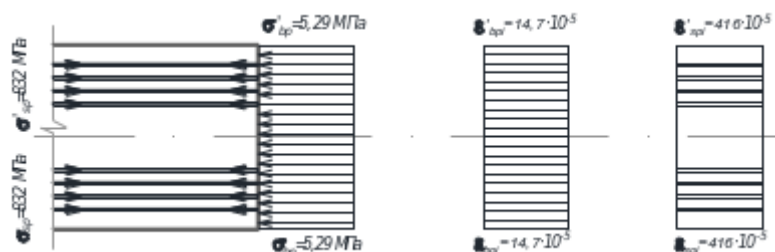


Рисунок 4. Напряженно-деформированное состояние стойки после обжатия предварительно напряженной арматурой

Методы исследования

При оценке прочности сечений по НДМ предусматривается дискретизация поперечного сечения элемента, т. е. бетонное сечение условно разбивается по высоте на малые участки (рис. 5). По такому же принципу в армировании выделяются отдельные стержни с своей площадью сечения. Напряжения в пределах малых участков принимаются усредненными (равномерно распределенными по высоте).

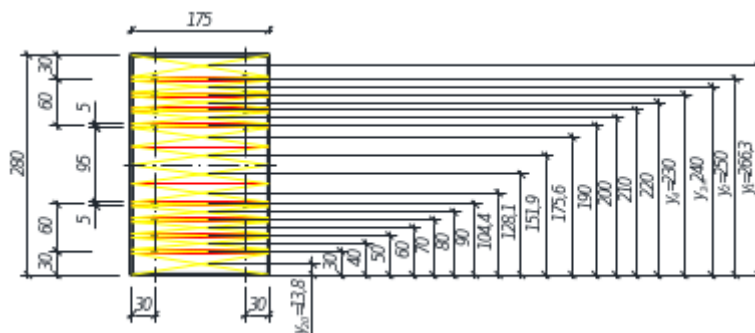


Рисунок 5. Разбивка приведенного поперечного сечения стойки

Поскольку, модуль деформаций переменный показатель, то с увеличением действия нагрузки на элемент значение модуля деформаций снижается (стремится к нулю), а деформации достигают своих предельных значений. Расчет по НДМ показывает более точные значения относительных деформаций и напряжений сжатого бетона и растянутой арматуры, и отчетливо отображает существенные изменения напряженно-деформированного состояния по высоте сечения элемента в форме эпюры нормальных напряжений. Поэтому расчетом по НДМ можно проверить достоверность результатов расчета по предельным усилиям. Исходя из этого, при расчете по НДМ следует знать предельный момент M_{ult} , размеры сечения ($b \times h$), диаметр и количество арматурных стержней, а также прочностные и деформационные показатели материалов.

Надо полагать, что при оценке прочности элемента по НДМ при первой итерации, а также изменяющийся при второй и последующих итерациях модуль деформации условно реализует функцию внешней нагрузки при испытаниях этого элемента. По сути, при каждом изменении модуля деформаций материалов, у проектируемого элемента накапливается определенная величина приращений в деформациях, т.е. у рассматриваемого изгибаемого элемента увеличиваются прогибы.

Следует подчеркнуть, что расчеты конструкций как по предельным усилиям, так и по НДМ проводятся с применением гипотезы плоских сечений.

Поперечное сечение стойки разбивается на 20 малых участков (рис. 5). Начало нумерации участков принимается с нижней растянутой зоны сечения. После разбивки определяются расстояния y_{bi} и y_{si} от нижнего растянутого волокна до центра тяжести всех малых участков бетона и арматуры.

В табл. 1 представлены следующие параметры приведенного сечения стойки для итерационных расчетов: i —порядковый номер малого участка; Δ , b_{bi} , A_{bi} —соответственно высота, ширина, площадь i -го малого участка бетона; y_{bi} —расстояние от крайнего волокна нижней растянутой зоны до центра тяжести i -го малого участка бетона;

$E'_{bi} = 0,85 E_b = 30600$ МПа – модуль деформации бетона, а коэффициент «0,85» принимается к E_b при непродолжительном действии нагрузки – при определении кривизны элемента без трещин в бетоне растянутой зоны; y_{si} – расстояние от крайнего волокна бетона нижней растянутой зоны до центра тяжести i -ой арматуры; A_{si} , E_{si} – площадь сечения и модуль упругости i -ой арматуры; y_{oj} – положение нейтральной линии при j -ой итерации.

Таблица 1.

Параметры малых участков приведенного сечения для итерационных расчетов

№ i	Δ_i	b_{bi}	A_{bi}	A_{si}	y_{bi}	y_{si}	ε_{bpi}	ε_{spi}
мал. уч.	см	см	см ²	см ²	см	см		
1	2,75	17,5	48,13		1,375		1,47E-04	
2	0,50	17,5	8,75	0,392	3,000	3,000	1,47E-04	4,16E-03
3	1,50	17,5	26,25		4,000		1,47E-04	
4	0,50	17,5	8,75	0,392	5,000	5,000	1,47E-04	4,16E-03
5	1,50	17,5	26,25		6,000		1,47E-04	
6	0,50	17,5	8,75	0,392	7,000	7,000	1,47E-04	4,16E-03
7	1,50	17,5	26,25		8,000		1,47E-04	
8	0,50	17,5	8,75	0,392	9,000	9,000	1,47E-04	4,16E-03
9	2,38	17,5	41,56		10,438		1,47E-04	
10	2,38	17,5	41,56		12,812		1,47E-04	
11	2,38	17,5	41,56		15,187		1,47E-04	
12	2,38	17,5	41,56		17,563		1,47E-04	
13	0,50	17,5	8,75	0,392	19,000	19,000	1,47E-04	4,16E-03
14	1,50	17,5	26,25		20,000		1,47E-04	
15	0,50	17,5	8,75	0,392	21,000	21,000	1,47E-04	4,16E-03
16	1,50	17,5	26,25		22,000		1,47E-04	
17	0,50	17,5	8,75	0,392	23,000	23,000	1,47E-04	4,16E-03
18	1,50	17,5	26,25		24,000		1,47E-04	
19	0,50	17,5	8,75	0,392	25,000	25,000	1,47E-04	4,16E-03
20	2,75	17,5	48,13		26,625		1,47E-04	

Для итерационных расчетов используются следующие формулы

Центр тяжести приведенного сечения

$$y_0 = \frac{S_{red}}{A_{red}} = 14,0 \text{ см (при } j = 0\text{)}.$$

Новое положение нейтральной линии определяется при выполнении следующих итерационных процедур

Приведенная площадь сечения

$$A_{red} = \sum A_{bi} + \sum A_{spi} + \sum A'_{sp}.$$

Приведенный статический момент

$$S_{red} = \sum A_{bi} \cdot y_{bi} + \sum A_{spi} \cdot y_{si} + \sum A'_{sp} \cdot y_{si}.$$

Новое положение нейтральной линии

$$y_{0j} = \frac{\sum E'_{bi} \cdot A_{bi} \cdot y_{bi} + \sum E'_{si} \cdot A_{spi} \cdot y_{si} + \sum E'_{si} \cdot A'_{sp} \cdot y_{si}}{\sum E'_{bi} \cdot A_{bi} + \sum E'_{si} \cdot A_{spi} + \sum E'_{si} \cdot A'_{spi}}. (1)$$

Кривизну элемента определяют по следующей формуле, основанной на известной формуле: $\frac{1}{r} = \frac{M}{D}$,

где:

$D = E \cdot J_{red}$ — изгибная жесткость приведенного поперечного сечения элемента.

$$\frac{1}{r_j} = \frac{M}{E \cdot J_{red}} = \frac{M_{ult1}}{\sum E'_{bi} \cdot A_{bi} \cdot (y'_{bi})^2 + \sum E'_{si} \cdot A'_{spi} \cdot (y'_{si})^2 + \sum E'_{si} \cdot A'_{spi} \cdot (y'_{si})^2}, (2)$$

где:

$y'_{bi} = y_{0j} - y_{bi}$; $y'_{si} = y_{0j} - y_{si}$ — расстояние от нейтральной линии до центра тяжести i -го малого участка бетона или арматуры.

Наибольшая (предельная) кривизна элемента обеспечивается при условии

$$\delta = \frac{\frac{1}{r_j} - \frac{1}{r_{j-1}}}{\frac{1}{r_{j-1}}} \cdot 100\% \leq 1,0\% (3)$$

Расчетные деформации малых участков:

$$\varepsilon_{bi} = \frac{1}{r_j} \cdot y'_{bi} + (-\varepsilon_{bpi}); \quad \varepsilon_{si} = \frac{1}{r_j} \cdot y'_{si} + \varepsilon_{spi}, (4)$$

где:

ε_{bpi} и ε_{spi} — начальные деформации бетона и арматуры от усилия предварительного напряжения на уровне центра i -го малого участка бетона и арматуры.

В зависимости от вычисленных деформаций малых участков определяются напряжения в бетоне и арматуре (в сжатой и растянутой зонах сечения). Напряжения и модули деформаций для класса бетона В40 растянутой и сжатой зонах определяются по диаграмме, предложенной на рис.6.

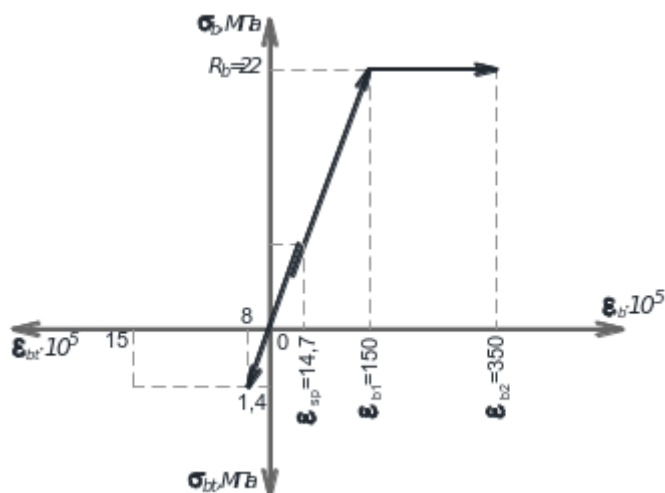


Рисунок 6. Диаграмма напряженно-деформированного состояния бетона класса В40 с учетом предварительного напряжения

При растянутом бетоне в пределах:

$$\bullet 0 < \varepsilon_{bi} < 8 \cdot 10^{-5} :$$

$$\sigma_{bi} = R_{bt} \cdot \frac{\varepsilon_{bi}}{8 \cdot 10^{-5}} (\text{МПа}); \quad E'_{bi} = \frac{R_{bt}}{8 \cdot 10^{-5}};$$

$$\bullet 8 \cdot 10^{-5} < \varepsilon_{bi} < 15 \cdot 10^{-5} :$$

$$\sigma_{bi} = R_{bt} = 1,4 \text{ МПа}; \quad E'_{bi} = \frac{1,4}{\varepsilon_{bi}} \text{ МПа}.$$

При сжатом бетоне в пределах:

$$\bullet 0 < \varepsilon_{bi} < 150 \cdot 10^{-5} :$$

$$\sigma_{bi} = R_b \cdot \frac{\varepsilon_{bi}}{150 \cdot 10^{-5}} (\text{МПа}); \quad E'_{bi} = \frac{R_b}{150 \cdot 10^{-5}} = 14666,7 \text{ МПа};$$

$$\bullet 150 \cdot 10^{-5} < \varepsilon_{bi} < 350 \cdot 10^{-5} :$$

$$\sigma_{bi} = R_b = 22 \text{ МПа}; \quad E'_{bi} = \frac{R_b}{\varepsilon_{bi}} = \frac{22}{\varepsilon_{bi}} (\text{МПа}).$$

Напряжения и модули деформаций арматуры класса Вр1400 в растянутой и сжатой зонах сечения элемента устанавливается по диаграмме, приведенной на рис. 7. При растяжении арматуры в упругой стадии работы с учетом ее предварительного напряжения, когда деформации устанавливаются в пределах величин: $0 < \varepsilon_{si} < 5,47 \cdot 10^{-3}$, σ_{si} и E'_{si} следующие :

$$\sigma_{si} = 1094 \frac{\varepsilon_{si}}{5,47 \cdot 10^{-3}} (\text{Мпа}); \quad E'_{si} = E_s.$$

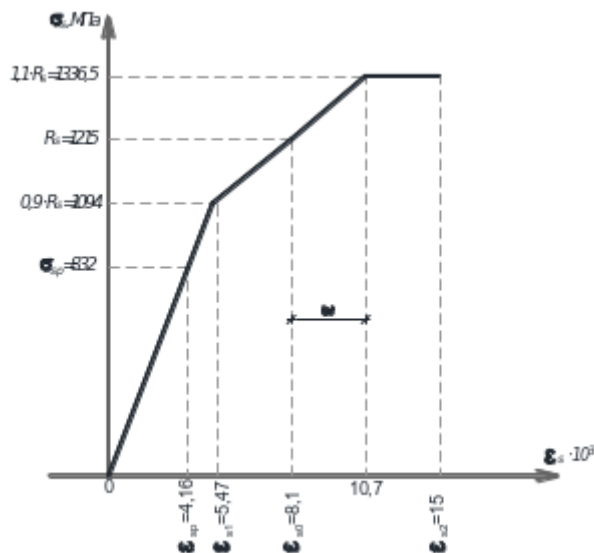


Рисунок 7. Диаграмма напряженно-деформированного состояния арматуры класса Вр1400 с учетом предварительного напряжения

Если деформации оказываются в пределах $5,47 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{si} < 10,7 \cdot 10^{-3}$, то напряжения $\sigma_{si} = 46367 \cdot \varepsilon_{si} + 840,37$ определяется из следующего равенства (см. рис. 7)

$$\frac{\sigma_{si} - 1094}{\varepsilon_{si} - 0,00547} = \frac{1336,5 - 1094}{0,0107 - 0,00547};$$

$$E'_{si} = \frac{\sigma_{si}}{\varepsilon_{si}}.$$

Наибольшая величина деформаций арматуры при напряжениях близких к критериальной величине $1,1R = 1336,5$ Мпа (см. рис. 7) устанавливается из следующего равенства

$$\varepsilon_{1,1R_s} = 8,1 \cdot 10^{-3} + \omega = 8,1 \cdot 10^{-3} + 2,62 \cdot 10^{-3} = 10,72 \cdot 10^{-3},$$

где:

$$\omega = \frac{(10,7 - 5,47) \cdot 10^{-3}}{(1336,5 - 1094)} \cdot (1336,5 - 1215) = 2,62 \cdot 10^{-3}.$$

При значениях расчетных деформаций, оказавшихся в пределах $10,72 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{si} < 15,0 \cdot 10^{-3}$, напряжения и модуль деформаций определяются из равенств: $\sigma_{si} = 1,1 R_s = 1336,5$ МПа;

$$E'_{si} = \frac{1,1 R_s}{\varepsilon_{si}} = \frac{1336,5}{\varepsilon_{si}} \text{ МПа.}$$

Следует отметить, что для проволочной арматуры, расположенной в сжатой зоне сечения A'_{spi} связь между деформациями ε_{si} и напряжениями σ_{si} при нагружении стойки следующая:

$$\varepsilon_{si} = \frac{\sigma_{spi}}{E_s},$$

где:

σ_{spi} –предварительное напряжение в арматуре с учетом всех потерь напряжений. При расположении проволочной арматуры в растянутой зоне сечения (A_{spi}):

$$\varepsilon_{si} + \frac{\sigma_{spi}}{E_s}.$$

Проверяется условие прочности по деформациям $\varepsilon_{bi} \leq [\varepsilon_{b2}]$,

$$\varepsilon_{si} < [\varepsilon_{s2}] \quad (4),$$

где:

$[\varepsilon_{b2}] = 350 \cdot 10^{-5}$; $\varepsilon_{si} = 15 \cdot 10^{-3}$ –предельные нормируемые значения для бетона и арматуры – см. рис. 4 и 5.

Условие прочности по усилиям, воспринимаемым малыми участками сечения балки, устанавливается по следующей формуле, с использованием соответствующих значений параметров, полученных при итерации, где наибольшая кривизна элемента обеспечивается при условии (3)

$$M_{ult} = \sum \sigma_{bi} \cdot A_{bi} \cdot y'_{bi} + \sum \sigma_{si} \cdot A_{si} \cdot y'_{si}. \quad (5)$$

Первая итерация проводится при соблюдении условия упругой работы бетона и арматуры в нормальном сечении балки. По формуле (1) определяется новое положение нейтральной линии, хотя фактически при первой итерации центр тяжести всего сечения (положение нейтральной линии) не меняется, т.е. $y_{01} = y_0 = 14$ см (табл.2). При известном значении нейтральной линии определяются расстояния от нейтральной линии до центра тяжести всех малых участков бетона и арматуры (y'_{bi} и y'_{si}). По формуле (2) определяется кривизна балки $(\frac{1}{r_1})$. В конце итерации по формуле (4) вычитаются деформации малых участков (ε_{bi} и ε_{si}) с учетом начальных деформаций бетона и арматуры от усилия

предварительного напряжения, а затем напряжения малых участков. Вычисленные деформации и напряжения малых участков бетона и арматуры сечения стойки при 1-ой итерации представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Первая итерация (j =1)

i	E'_{bi}	E'_{si}	y_{0j}	y'_{bi}	y'_{si}	$1/r_j$	ε_{bi}	σ_{bi}	ε_{si}	σ_{si}	M'_{calc}
	Мпа	Мпа	см	см	см	см		Мпа		Мпа	кН·м
1	30600		14,0	12,6		1,74E-05	7,27E-05	1,3			9,040
2	30600	200000		11,0	11,0		4,44E-05	0,8	0,00435	870	
3	30600			10,0			2,70E-05	0,5			
4	30600	200000		9,0	9,0		9,61E-06	0,2	0,00432	863	
5	30600			8,0			-7,79E-06	-0,1			
6	30600	200000		7,0	7,0		-2,52E-05	-0,4	0,00428	856	
7	30600			6,0			-4,26E-05	-0,6			
8	30600	200000		5,0	5,0		-6,00E-05	-0,9	0,00425	849	
9	30600			3,6			-8,50E-05	-1,2			
10	30600			1,2			-1,26E-04	-1,9			
11	30600			-1,2			-1,68E-04	-2,5			
12	30600			-3,6			-2,09E-04	-3,1			
13	30600	200000		-5,0	-5,0		-2,34E-04	-3,4	0,00407	815	
14	30600			-6,0			-2,51E-04	-3,7			
15	30600	200000		-7,0	-7,0		-2,69E-04	-3,9	0,00404	808	
16	30600			-8,0			-2,86E-04	-4,2			
17	30600	200000		-9,0	-9,0		-3,04E-04	-4,5	0,00400	801	
18	30600			-10,0			-3,21E-04	-4,7			
19	30600	200000		-11,0	-11,0		-3,38E-04	-5,0	0,00397	794	
20	30600			-12,6			-3,67E-04	-5,4			

В начале второй итерации (и всех последующих) определяются модули деформаций в зависимости от вычисленных величин деформаций малых участков при 1-ой итерации, которые используются для определения нового положения нейтральной линии (y_{0j}).

Результаты и обсуждение

Важно отметить, что во 2-ой итерации (табл. 3) положение нейтральной линии относительно высоты сечения снижается, т.е. значение y_{0j} — уменьшается. Хотя при имитации нагружения стойки y_{0j} должно увеличиться. Это происходит из-за того, что в 1-ой итерации деформации от нагружения стойки накладываются на деформации от предварительного напряжения, что приводит к снижению значения y_{02} при 2-ой итерации.

а)



б)

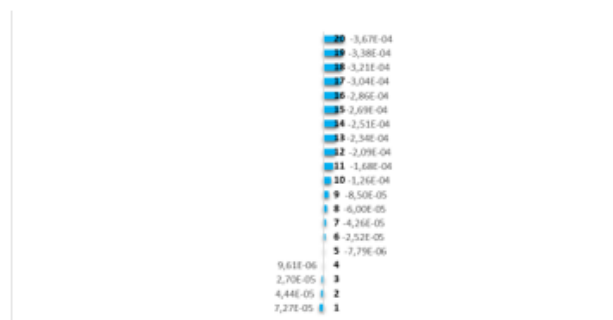


Рисунок 8. Эпюры деформаций бетона при 1-ой итерации: а) эпюра деформации от имитации нагружения стойки (ε_{bi}); б) эпюра деформации $\varepsilon_{bi} + \varepsilon_{bpi}$ (при наложении на эпюру деформаций (ε_{bi}) эпюры от обжатия бетона напрягаемой арматурой (ε_{bpi}) — см. рис. 4)

Таблица 3.

Вторая итерация (j =2)

i	E'_{bi}	E'_{si}	y_{0j}	y'_{bi}	y'_{si}	$1/r_j$	ε_{bi}	σ_{bi}	ε_{si}	σ_{si}	M'_{calc}
	Мпа	Мпа	см	см	см	см		Мпа		Мпа	кН·м
1	17500		13,6	12,3		3,26E-05	2,52E-04	0,0	0,00451		12,6
2	17500	200000		10,6	10,6		2,00E-04	0,0		901	
3	17500			9,6			1,67E-04	0,0	0,00444		
4	17500	200000		8,6	8,6		1,34E-04	0,0		888	
5	14667			7,6			1,02E-04	0,0	0,00438		
6	14667	200000		6,6	6,6		6,92E-05	1,2		875	
7	14667			5,6			3,66E-05	0,6	0,00431		
8	14667	200000		4,6	4,6		3,99E-06	0,1		862	
9	14667			3,2			-4,29E-05	-0,6			
10	14667			0,8			-1,20E-04	-1,8			
11	14667			-1,6			-1,98E-04	-2,9			
12	14667			-3,9			-2,75E-04	-4,0	0,00399		
13	14667	200000		-5,4	-5,4		-3,22E-04	-4,7		797	
14	14667			-6,4			-3,54E-04	-5,2	0,00392		
15	14667	200000		-7,4	-7,4		-3,87E-04	-5,7		784	
16	14667			-8,4			-4,20E-04	-6,2	0,00385		
17	14667	200000		-9,4	-9,4		-4,52E-04	-6,6		771	
18	14667			-10,4			-4,85E-04	-7,1	0,00379		
19	14667	200000		-11,4	-11,4		-5,17E-04	-7,6		758	
20	14667			-13,0			-5,70E-04	-8,4	0,00451		

В табл. 4 приведены расчетные значения деформационных характеристик сечения при 9-ой итерации. Здесь кривизна $\frac{1}{r_9} = 21,265 \cdot 10^{-5}$ см удовлетворяет (ε_{bi} и ε_{si}), которые соответствуют условию прочности по деформациям (3). Значит итерация можно считать последней.

Таблица 4.

Девятая итерация (j =9)

i	E'_{bi}	E'_{si}	y_{oj}	y'_{bi}	y'_{si}	$1/r_j$	ε_{bi}	σ_{bi}	ε_{si}	σ_{si}	M'_{calc}
	Мпа	Мпа	см	см	см	см		Мпа		Мпа	
1	0		22,21	20,8		0,000213	4,28E-03	0,0			35,1
2	0	148732		19,2	19,2		3,94E-03	0,0	0,00824	1223	
3	0			18,2			3,72E-03	0,0			
4	0	154283		17,2	17,2		3,51E-03	0,0	0,00782	1203	
5	0			16,2			3,30E-03	0,0			
6	0	160470		15,2	15,2		3,09E-03	0,0	0,00739	1183	
7	0			14,2			2,87E-03	0,0			
8	0	167410		13,2	13,2		2,66E-03	0,0	0,00697	1163	
9	0			11,8			2,36E-03	0,0			
10	0			9,4			1,85E-03	0,0			
11	0			7,0			1,35E-03	0,0			
12	0			4,6			8,40E-04	0,0			
13	0	200000		3,2	3,2		5,35E-04	0,0	0,00484	968	
14	0			2,2			3,22E-04	0,0			
15	13695	200000		1,2	1,2		1,09E-04	1,4	0,00442	883	
16	14667			0,2			-1,03E-04	-1,5			
17	14667	200000		-0,8	-0,8		-3,16E-04	-4,6	0,00399	798	
18	14667			-1,8			-5,29E-04	-7,8			
19	14667	200000		-2,8	-2,8		-7,41E-04	-10,9	0,00357	713	
20	14667			-4,4			-1,09E-03	-15,9			

Изменение напряженно-деформированного состояния сечения при имитации 1-го этапа нагружения до момента разрушения отражается эпюрами деформаций и напряжений полученных при 1-ой и 9-ой итерациях, приведенных на рис. 9.

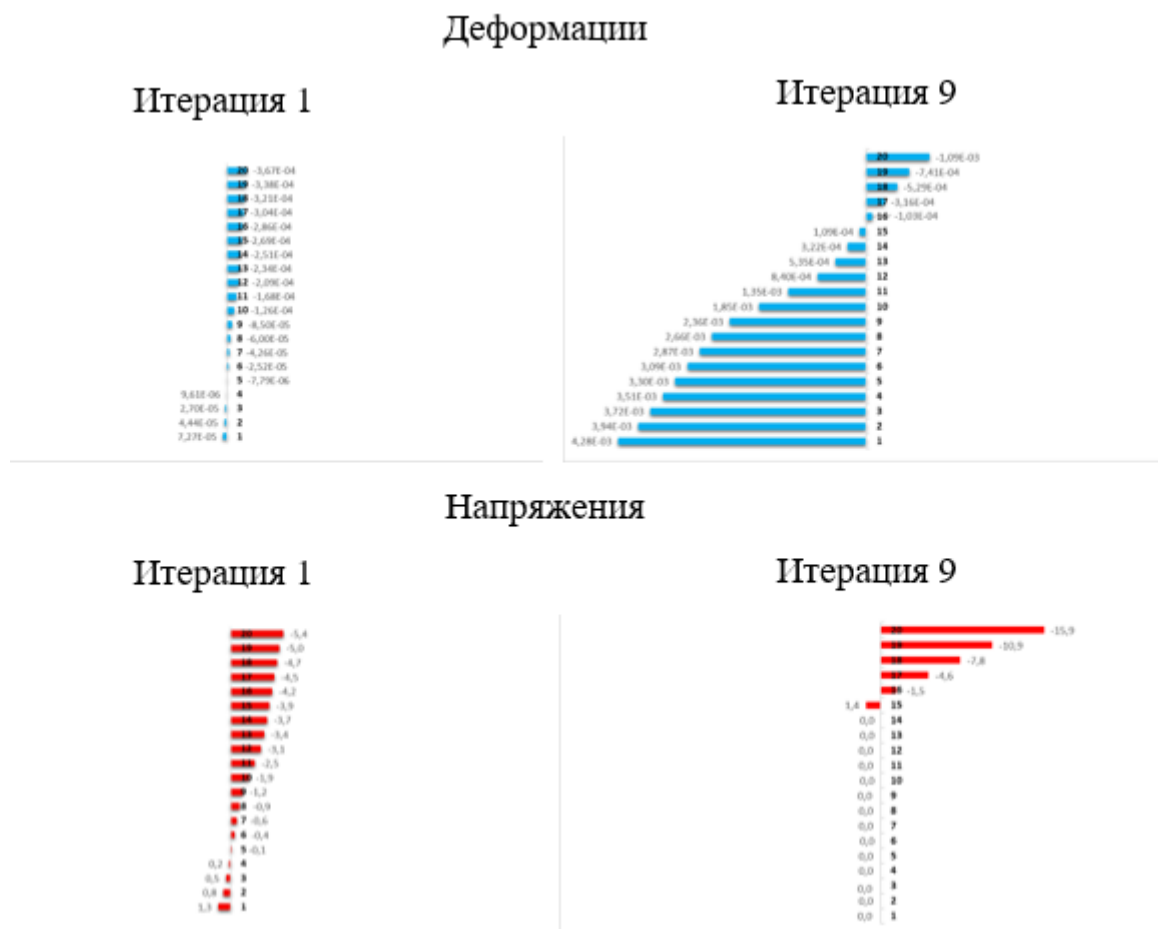


Рисунок 9. Эпюры деформаций и напряжений в бетоне по высоте сечения

Определяется прочность сечения (M_{ult}) по формуле (5), используя соответствующие параметры, вычисленные в 9-ой итерации (см. табл.4).

Таким образом, если прочность сечения по методу предельных усилий $M_{ult} = 34,51$ кНм, то прочность сечения, вычисленная по НДМ, равна 35,1кНм.

Опытные испытания двух стоек рассматриваемой конструкции, показали прочность, в среднем, $M_{test} = 40,6$ кНм (разрушение по бетону сжатой зоны).

Заключение

1. Прочность нормального сечения стойки по результатам расчета по НДМ согласуется с соответствующей величиной прочности, вычисленных по предельным состояниям, а также с результатами опытных испытаний стоек, что свидетельствует о достоверности рассмотренной инженерной методики расчета железобетонных предварительно напряженных элементов по НДМ на основе итерационных процедур.

2. Представляется, что использование итерационных процедур можно считать простым и эффективным средством в практической реализации, что может оказать существенную помощь проектировщикам, специализация которых связана с железобетонными конструкциями.

3. Предлагаемый деформационный метод оценки прочности предварительно напряженных конструкций на основе итерационных процедур, дает возможность:

- анализировать изменения, происходящие в элементе в процессе возрастания нагрузки, и следить за изменением напряженно-деформированного состояния нормального сечения от начала загрузки до момента разрушения;
- учитывать предыдущие нагружения и накопления повреждений (деформаций), что дает более точную оценку работы конструкции;
- автоматизации расчетов для удобства и простоты вычислений – даже с использованием простейших программ (например, MS Excel).

Список литературы

1. Арленинов П.Д., Крылов С.Б. Современное состояние нелинейных расчетов железобетонных конструкций // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2017. – № 3.
2. Ерышев В.А. Численные методы расчеты прочности железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели с использованием диаграмм деформирования материалов // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 6. – С. 17–26.
3. Коянкин А.А. О расчёте железобетонных изгибаемых элементов на основе нелинейной деформационной модели // Academia. Архитектура и строительство. – 2025. – № 1. – С. 152–159. – DOI: 10.22337/2077-9038-2025-1-152-159.
4. Краковский М.Б., Тихонов И.И. Особенности расчетов нормальных сечений железобетонных конструкций по СП 63.13330.2018 // Бетон и железобетон. – 2023. – № 4. – С. 5–11. – DOI: 10.37538/0005-9889-2023-4(618)-5-11.
5. Крылов С.Б., Арленинов П.Д. Достоинства и недостатки нелинейной деформационной модели при расчёте прочности железобетонных конструкций // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета (Известия КГАСУ). – 2025. – № 2. – С. 124–132. – DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.11.
6. Мирзаев П.Т., Шамансурова З.П. Инженерная методика оценки прочности и трещиностойкости опорных стоек высоковольтной линии без поперечной арматуры при изгибе с кручением // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2025. – № 5. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/20169>.
7. Морозов В.И., Опбул Э.К. Расчет изгибаемых сталефиброжелезобетонных элементов по нелинейной деформационной модели с использованием опытных диаграмм деформирования сталефибробетона // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. – 2022. – № 2. – С. 35–44.

8. Опбул Э.К., Дмитриев Д.А. Расчет прочности предварительно напряженных конструкций на основе нелинейной деформационной модели на примере многопустотной плиты перекрытия безопалубочной технологии // Строительство и реконструкция. – 2018. – № 6. – С. 26–36.
9. Опбул Э.К., Ондар Э.Э. Калар-оол А.-Х.Б. Деформационные модели расчета прочности изгибаемых железобетонных элементов // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. – 2019. – № 2. – С. 44–50.
10. Опбул Э.К. Калар-оол А.-Х.Б., Ле Куанг Хюн. Деформационная модель прочности изгибаемого элемента в среде MATLAB // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. – 2021. – № 1. – С. 38–46.
11. Свод правил СП 52–102 Предварительно напряжённые железобетонные конструкции. – Москва: ФГУП ЦПП, 2004. – 43 с.
12. Симбиркин В.Н., Матковский В.В. К расчету напряженно-деформированного состояния и прочности элементов железобетонных конструкций по нормальным сечениям // Строительная механика и расчет сооружений. – 2010. – № 4. – С. 20–26.
13. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003 (с Изменениями № 1, 2): утв. Приказом Минстроя России от 19.12.2018 № 832/пр: введ. 20.06.2019.
14. Тошин Д.С. Прикладные возможности деформационной модели железобетона // Молодой ученый. – 2016. – № 29. – С. 164–166.
15. Тошин Д.С. О дискретизации нормального сечения железобетонного элемента с неоднородными свойствами бетона при расчете по нелинейной деформационной модели // Молодой ученый. – 2016. – № 27. – С. 172–174.
16. Федоров В.С., Шавыкина М.В., Юсупова Е.В. Прогибы железобетонных конструкций в предельном состоянии // Строительство и реконструкция. – 2017. – № 4. – С. 80–85.
17. Шевченко А.В., Давидюк А.А., Баглаев Н.Н. Метод итераций для расчета железобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели // Инженерно-строительный журнал. – 2019. – № 8. – С. 28–41.
18. Engen M., Hendriks M.A. N., Øverli J.A., Åldstedt E. Non-linear finite element analyses applicable for the design of large reinforced concrete structures. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2019. Vol. 23, No. 11. P. 1381–1403. DOI: 10.1080/19648189.2017.1348993.
19. Kozlov A.V., et al. Research of the Stress Condition of the Normal Section of Reinforced Concrete Elements using Nonlinear Deformation Model. Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. P. 144–150. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.094.
20. Pangaribuan G. An Introduction to Excel for Civil Engineers. – 2016. – 387 P.

References

1. Arleninov P.D., Krylov S.B. [Current State of Nonlinear Calculations of Reinforced Concrete Structures] // Seismic Resistant Construction. Safety of Structures. – 2017. – № 3. – P. 50–53. (In Russ.)
2. Eryshev V.A. [Numerical methods for calculating the strength of reinforced concrete elements using a nonlinear deformation model with material stress-strain diagrams] // Vestnik NGIEI. – 2018. – № 6. – P. 17–26. (In Russ.)
3. Koyankin A.A. [On the calculation of reinforced concrete bending elements based on a nonlinear deformation model] // Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. – 2025. – № 1. – P. 152–159. – DOI: 10.22337/2077-9038-2025-1-152-159. (In Russ.)
4. Krakovskii M.B., Tikhonov I.I. [Features of calculating normal sections of reinforced concrete structures according to SP 63.13330.2018] // Beton i zhelezobeton. – 2023. – № 4. – P. 5–11. – DOI: 10.37538/0005-9889-2023-4(618)-5-11. (In Russ.)
5. Krylov S.B., Arleninov P.D. [Advantages and disadvantages of the nonlinear deformation model in calculating the strength of reinforced concrete structures] // Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta (Izvestiya KGASU). – 2025. – № 2. – P. 124–132. – DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.11. (In Russ.)
6. Mirzaev P.T., Shamansurova Z.P. [Engineering methodology for assessing the strength and crack resistance of high-voltage line support poles without transverse reinforcement under bending with torsion] // Universum: tekhnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn. – 2025. – № 5. – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/20169> (дата обращения: 13.08.2026). (In Russ.)
7. Morozov V.I., Opbul E.K. [Analysis of bending steel-fiber-reinforced concrete elements using a nonlinear deformation model with experimental stress-strain diagrams of steel-fiber-reinforced concrete] // Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki. – 2022. – № 2. – P. 35–44. (In Russ.)
8. Opbul E.K., Dmitriev D.A. [Strength analysis of prestressed structures based on a nonlinear deformation model using the example of a hollow-core floor slab manufactured by formwork-free technology] // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. – 2018. – № 6. – P. 26–36. (In Russ.)
9. Opbul E.K., Ondar E.E., Kalar-ool A.-Kh.B. [Deformation models for strength analysis of bending reinforced concrete elements] // Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki. – 2019. – № 2. – P. 44–50. (In Russ.)
10. Opbul E.K., Kalar-ool A.-Kh.B., Le Kuang Khyun. [Deformation model of the strength of a bending element in the MATLAB environment] // Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki. – 2021. – № 1. – P. 38–46. (In Russ.)
11. SP 52–102 [Prestressed concrete structures]. – 2004. (In Russ.)
12. Simbirkin V.N., Matkovskii V.V. [Analysis of the stress-strain state and strength of reinforced concrete structural elements in normal sections] // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii. – 2010. – № 4. – P. 20–26. (In Russ.)

13. [Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions]. (In Russ.)
14. Toshin D.S. [Applied capabilities of the deformation model of reinforced concrete] // Molodoi uchenyi. – 2016. – № 29. – P. 164–166. (In Russ.)
15. Toshin D.S. [On the discretization of the normal section of a reinforced concrete element with inhomogeneous concrete properties when calculating using a nonlinear deformation model] // Molodoi uchenyi. – 2016. – № 27. – P. 172–174. (In Russ.)
16. Fedorov V.S., Shavykina M.V., Iusupova E.V. [Deflections of reinforced concrete structures in the ultimate limit state] // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. – 2017. – № 4. – P. 80–85. (In Russ.)
17. Shevchenko A.V., Davidyuk A.A., Baglaev N.N. [Iteration method for calculating reinforced concrete elements based on a nonlinear deformation model] // Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal. – 2019. – № 8. – P. 28–41. (In Russ.)
18. Engen M., Hendriks M.A.N., Øverli J.A., Åldstedt E. Non-linear finite element analyses applicable for the design of large reinforced concrete structures. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2019. Vol. 23, No. 11. P. 1381–1403. DOI: 10.1080/19648189.2017.1348993.
19. Kozlov A.V., et al. Research of the Stress Condition of the Normal Section of Reinforced Concrete Elements using Nonlinear Deformation Model. Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. P. 144–150. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.094.
20. Pangaribuan G. An Introduction to Excel for Civil Engineers: From Engineering Theory to Excel Practice. – CreateSpace Independent Publishing Platform. – 2016. – 386 P.

Статья поступила в редакцию: 18.07.2026

Статья принята к публикации: 31.07.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 699.86:69.05

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23257

Совершенствование технологии процессов теплоизоляции наружных стен многоэтажных жилых зданий

Сайдахмедова Захрохон Рустам қизи

исследователь, Ташкентский архитектурно-строительный университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: zahroxonsaydaxmedova@gmail.com

Improvement of external wall thermal insulation processes for multi-storey residential buildings

Saydaxmedova Zahroxon Rustam qizi

Researcher

University of Architecture and Civil Engineering

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В статье разработана интегрированная организационно-технологическая модель выполнения наружной теплоизоляции стен многоэтажных жилых зданий. Модель объединяет теплотехническое проектирование, BIM-зонирование фасада, комплектную поставку материалов по захваткам, механизацию приготовления и нанесения клеевых составов, поточную синхронизацию бригад, контроль температурно-влажностных условий, цифровые чек-листы и приемочную инфракрасную термографию. Для демонстрации расчетной процедуры сформирован воспроизводимый сценарный массив из 30 сопоставимых фасадных захваток, каждая из которых рассчитана для базовой и усовершенствованной технологии; модельные значения не представляются как фактические данные конкретной строительной организации. Предложен индекс технологической зрелости теплоизоляционных работ, включающий семь групп факторов. Расчет для наружной стены из газобетона с минераловатным слоем толщиной 120 мм показывает снижение коэффициента теплопередачи с 0,59 до 0,21 Вт/(м²·К), то есть примерно на 64,4 %. По сценарным результатам средняя выработка возрастает с 9,65 до 12,91 м² на человеко-смену, продолжительность цикла на захватке сокращается на 21,0 %, доля дефектных участков — на 57,8 %, отходы теплоизоляционных плит — на 41,2 %, а организационные простои — на 38,9 %. Регрессионная модель указывает на положительную связь технологической зрелости

Библиографическое описание: Сайдахмедова З.Р.Қ. Совершенствование технологии процессов теплоизоляции наружных стен многоэтажных жилых зданий // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23257>

с производительностью и отрицательную — с дефектностью. Практический результат исследования представлен в виде поэтапной технологической карты и системы контрольных точек, пригодной для адаптации к проектам нового строительства и термомодернизации многоквартирных домов.

Abstract

This paper develops an integrated organisational and technological model for external wall insulation of multi-storey residential buildings. The model combines thermal design, BIM-based façade zoning, work-package material logistics, mechanised preparation and application of adhesives, flow-line coordination of crews, temperature and humidity monitoring, digital checklists and final infrared thermography. A reproducible scenario dataset of 30 comparable façade work zones is used to demonstrate the calculation procedure for both a conventional and an improved process; the modelled values are not presented as audited data of any particular contractor. A seven-dimensional Thermal Insulation Technology Maturity Index is proposed. For an aerated-concrete wall with 120 mm mineral-wool insulation, the calculated U-value decreases from 0.59 to 0.21 W/(m²·K), or by approximately 64.4 %. In the scenario results, labour productivity rises from 9.65 to 12.91 m² per person-shift, the work-zone cycle time falls by 21.0 %, defective area by 57.8 %, insulation waste by 41.2 % and organisational downtime by 38.9 %. Regression results indicate a positive association between technology maturity and productivity and a negative association with defects. The practical output is a staged process map and quality-control system adaptable to new construction and thermal renovation of apartment buildings.

Ключевые слова: наружная теплоизоляция, многоэтажный жилой дом, фасад, ETICS, минеральная вата, технологический поток, BIM, контроль качества, тепловые мосты, энергоэффективность.

Keywords: external thermal insulation, multi-storey residential building, façade, ETICS, mineral wool, flow-line construction, BIM, quality control, thermal bridges, energy efficiency.

1. Введение

Наружные стены являются одним из основных элементов теплового контура многоэтажного жилого здания. Их эксплуатационная надежность определяется не только толщиной и теплопроводностью утеплителя, но и качеством подготовки основания, непрерывностью теплоизоляционного слоя, правильностью устройства оконных откосов, балконных примыканий, деформационных швов и других узлов. Даже при корректном теплотехническом проектировании локальные нарушения технологии образуют тепловые мосты, повышают влажностную нагрузку и сокращают срок службы фасадной системы [4–6].

Повышение энергетической эффективности жилищного фонда особенно актуально в условиях роста стоимости энергетических ресурсов и необходимости снижения эксплуатационных расходов. Наружная теплоизоляция позволяет уменьшить теплопотери без сокращения полезной площади помещений, стабилизировать температурный режим несущей

стены и повысить комфорт внутренней среды. Одновременно фасадные работы на многоэтажных объектах связаны с высотной логистикой, погодными ограничениями, большой протяженностью фронта и необходимостью контроля скрытых операций.

Системы наружной теплоизоляции с тонкослойным штукатурным слоем (ETICS) представляют собой комплект взаимосвязанных компонентов: клеевой состав, теплоизоляционные плиты, механические крепления, базовый армированный слой, сетку, грунтовку и декоративное покрытие. Надежность системы определяется их совместимостью и соблюдением технологического регламента. Международные документы рассматривают ETICS как единую систему, поэтому произвольная замена компонентов или изменение схемы монтажа должно быть исключено [3, 9].

На строительной площадке наиболее распространены несинхронная работа звеньев, подача материалов без привязки к захваткам, неподтвержденная готовность основания, пропуск промежуточной приемки и позднее выявление дефектов. При традиционной организации контроль часто проводится после завершения слоя, когда часть критических параметров уже скрыта. Это приводит к переделкам, простоям и перерасходу материалов.

Цель исследования — разработать компактную организационно-технологическую модель, повышающую качество и производительность процессов наружной теплоизоляции стен многоэтажных жилых зданий. Для достижения цели решены задачи: проанализированы технологические риски; сформирована последовательность операций и контрольных точек; выполнен теплотехнический расчет; проведено сценарное сравнение базового и усовершенствованного вариантов; сформулированы рекомендации по внедрению.

2. Теоретические положения и постановка задачи

2. 1. Выбор фасадной системы

Для утепления многоэтажных жилых зданий применяются штукатурные системы ETICS, навесные вентилируемые фасады и префабрикованные утепленные панели. Выбор решения зависит от пожарных требований, архитектуры, состояния основания, доступной механизации, климатических условий и требований к ремонтпригодности. В настоящем исследовании в качестве расчетной принята ETICS с минераловатными плитами, поскольку такая система обеспечивает высокую теплотехническую непрерывность и позволяет детально исследовать влияние мокрых процессов, логистики и промежуточного контроля.

Таблица 1.

Сравнение основных решений наружной теплоизоляции

Система	Преимущества	Технологические ограничения	Рациональное применение
ETICS с минеральной ватой	непрерывный слой; высокая паропроницаемость; малое число металлических мостов	мокрые процессы; зависимость от погоды; строгий контроль клея, анкеров и армирования	новое строительство и термомодернизация многоэтажных жилых зданий
ETICS с EPS	небольшая масса; удобная резка; высокая тепловая эффективность	ограничения по пожарной безопасности и устройству расщечек	объекты и участки, допускаемые действующими нормами

Система	Преимущества	Технологические ограничения	Рациональное применение
Навесной вентилируемый фасад	сухой монтаж; ремонтно-пригодность; широкий выбор облицовки	мосты через кронштейны; высокая роль геодезии и анкеров	высотные объекты с повышенными требованиями к облицовке
Префабрикованные панели	заводская готовность; высокая скорость монтажа	требовательность к точности стыков и грузоподъемной логистике	серийное строительство и крупные программы реконструкции

2.2. Технологические риски и принципы совершенствования

Основные дефекты фасадного утепления формируются на стыке отдельных операций. Недостаточная площадь приклейки увеличивает деформации плит; совпадение вертикальных швов и незаполненные зазоры создают локальные теплопроводные включения; неправильная посадка анкеров снижает устойчивость системы; недостаточный нахлест сетки вызывает трещины. Особую опасность представляют откосы, парапеты, углы, балконные плиты и места прохождения инженерных элементов.

Совершенствование технологии должно основываться на пяти принципах: цифровая подготовка фасада; объективная оценка основания; комплектование материалов по захваткам; синхронизация специализированных звеньев по единому такту; приемка каждой скрытой операции до ее закрытия. Такой подход переносит контроль качества из завершающей стадии внутрь производственного потока.

Рабочая гипотеза состоит в том, что объединение перечисленных принципов повышает выработку не за счет форсирования ручных операций, а за счет уменьшения ожиданий, перемещений, повторного приготовления смесей, переделок и незавершенного производства. Научная новизна заключается в интеграции теплотехнического расчета, BIM-зонирования, поточной организации и цифровой прослеживаемости в единую технологическую модель.

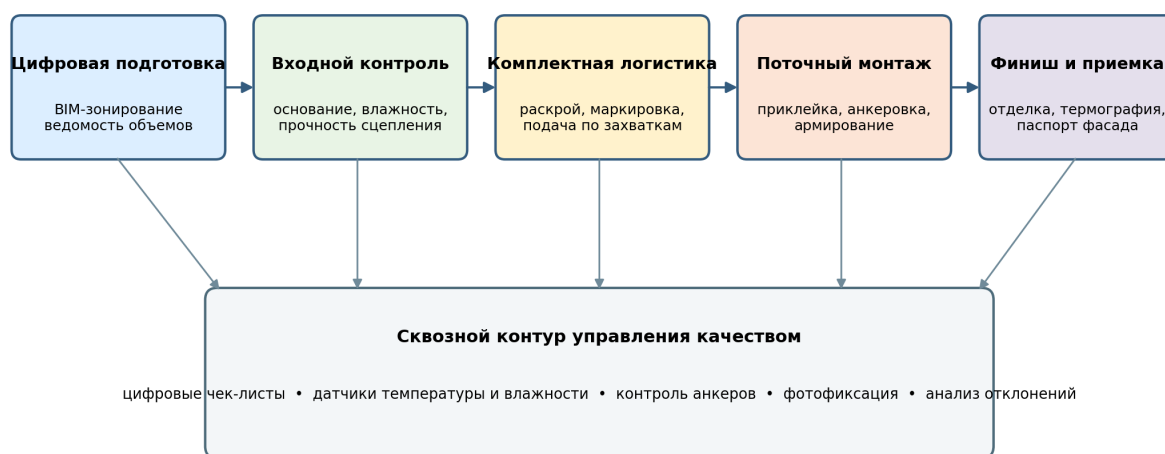


Рисунок 1. Интегрированная модель усовершенствованной технологии наружной теплоизоляции

3. Материалы и методы

3. 1. Расчетный объект и организация исследования

В качестве модельного объекта принят 12-этажный жилой дом с общей площадью фасадов 8640 м². Площадь непрозрачных участков после исключения оконных и дверных проемов составляет 6480 м². Фасад разделен на 30 сопоставимых технологических захваток средней площадью 288 м². Для каждой захватки рассмотрены два сценария: базовый и усовершенствованный.

Базовый сценарий отражает традиционную последовательность с разрозненной подачей материалов, периодическим контролем и ограниченной фиксацией скрытых работ. Усовершенствованный сценарий предусматривает BIM-разбивку, маркировку комплектов, подтверждение готовности основания, контроль климатических условий, пооперационные цифровые чек-листы и балансировку звеньев. Массив носит сценарный характер и используется для воспроизводимой демонстрации методики; при внедрении он должен быть заменен фактическим хронометражем.

3.2. Теплотехническая модель

Термическое сопротивление каждого однородного слоя определялось по выражению:

$$R_i = \delta_i / \lambda_i, (1)$$

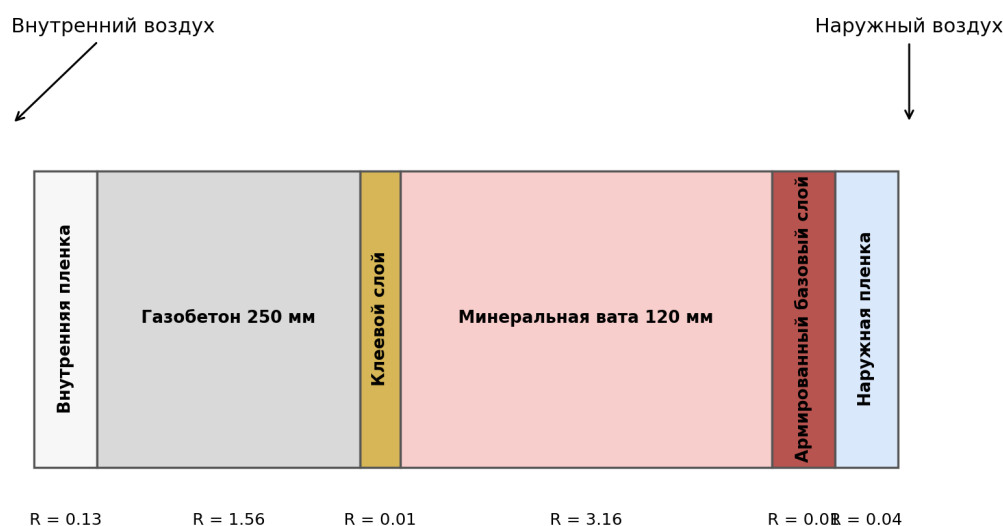
где δ_i — толщина слоя, м; λ_i — расчетная теплопроводность материала, Вт/(м·К).

Полное сопротивление теплопередаче плоского фрагмента стены рассчитывалось с учетом поверхностных сопротивлений:

$$R_0 = R_{si} + \sum(\delta_i / \lambda_i) + R_{se}; U = 1 / R_0. (2)$$

Для оценки влияния узлов учитывается приведенный коэффициент теплопередачи, включающий линейные ψ и точечные χ тепловые мосты. Расчетная экономия теплоты через непрозрачную часть фасада определялась через разность коэффициентов теплопередачи и градусо-сутки отопительного периода:

$$\Delta Q = 24 \cdot (U_0 - U_1) \cdot A \cdot HDD / 1000. (3)$$



Суммарное сопротивление $R_0 \approx 4,91 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; расчетный коэффициент теплопередачи $U \approx 0,204 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

Рисунок 2. Расчетная структура стены с наружной минераловатной теплоизоляцией

3.3. Технологическая последовательность и показатели

Таблица 2.

Основные этапы и встроенные контрольные точки

Этап	Основные операции	Контрольный результат
Подготовка	обмер, карта дефектов, пробные отрывы, BIM-зонирование	подтверждены прочность, влажность и геометрия основания
Комплектование	раскрой, маркировка, упаковка по захваткам	материалы соответствуют сменному заданию, отходы минимизированы
Монтаж плит	приклейка с перевязкой, заполнение швов, выравнивание	подтверждены площадь контакта и плоскостность
Анкеровка и узлы	крепление, откосы, углы, примыкания, рас-сечки	зафиксированы глубина, количество анкеров и непрерывность контура
Армирование и отделка	базовый слой, сетка, грунтовка, декоративное покрытие	подтверждены толщина, нахлесты и климатический режим
Приемка	визуальный контроль, простукивание, термо-графия, паспорт фасада	закрыты замечания и сформирована цифровая история участка

Производительность труда определялась как отношение принятой без замечаний площади $A_{асс}$ к суммарным трудозатратам T_l : $P = A_{асс}/T_l$. Доля дефектной площади рассчитывалась отношением площади дефектов к смонтированной площади, а коэффициент отходов — отношением сверхнормативного расхода утеплителя к нормативному. Продолжительность цикла измерялась от начала подготовки захватки до разрешения на переход к следующему завершённому слою.

Для комплексной характеристики применен индекс технологической зрелости (ИЗТ), включающий готовность основания, комплектную логистику, механизацию, поточную синхронизацию, климатический контроль, контроль скрытых работ и цифровую прослеживаемость. Каждый фактор оценивался по шкале 0–100 баллов; итоговый индекс рассчитывался как взвешенная сумма. Различия двух сценариев оценивались парным сравнением по 30 захваткам.

4. Результаты и обсуждение

4. 1. Теплотехнический результат

Таблица 3.

Расчет сопротивления теплопередаче утепленной стены

Слой	Толщина, м	λ , Вт/(м·К)	R , м ² ·К/Вт
Внутреннее поверхностное сопротивление	—	—	0,130
Газобетон	0,250	0,160	1,563
Клеевой слой	0,005	0,700	0,007
Минераловатная плита	0,120	0,038	3,158
Армированный базовый слой	0,005	0,700	0,007
Наружное поверхностное сопротивление	—	—	0,040
Итого R_0 / U	—	—	4,905 / 0,204

Для исходной стены коэффициент теплопередачи принят равным $0,59 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. После устройства наружного слоя минеральной ваты толщиной 120 мм расчетное значение составляет около $0,204 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, то есть снижается приблизительно на 65 %. При площади непрозрачной части фасада 6480 м^2 и $\text{HDD} = 2200 \text{ К} \cdot \text{сут}$ расчетное уменьшение передачи теплоты достигает около 130 тыс. кВт·ч в год. Значение характеризует сравнительный эффект ограждающей конструкции и не заменяет энергетическое моделирование здания

Практический результат зависит от качества узлов. Непрерывность слоя у перекрытий, откосов и балконных примыканий должна подтверждаться проектными деталями и приемкой до устройства отделки. При наличии металлических элементов и сложной геометрии требуется расчет тепловых мостов по ISO 10211 [5].

4.2. Организационно-технологические показатели

Таблица 4.

Сравнение результатов по 30 модельным захваткам

Показатель	Базовый вариант	Усовершенствованный вариант	Изменение
Выработка, $\text{м}^2/\text{чел.}\cdot\text{смену}$	$9,65 \pm 0,66$	$12,91 \pm 0,99$	+33,8 %
Цикл захватки, сут.	$2,64 \pm 0,18$	$2,08 \pm 0,16$	-21,0 %
Дефектная площадь, %	$5,67 \pm 0,73$	$2,39 \pm 0,65$	-57,8 %
Отходы плит, %	$7,10 \pm 0,55$	$4,17 \pm 0,34$	-41,2 %
Организационные простои, %	$13,54 \pm 1,08$	$8,27 \pm 0,76$	-38,9 %

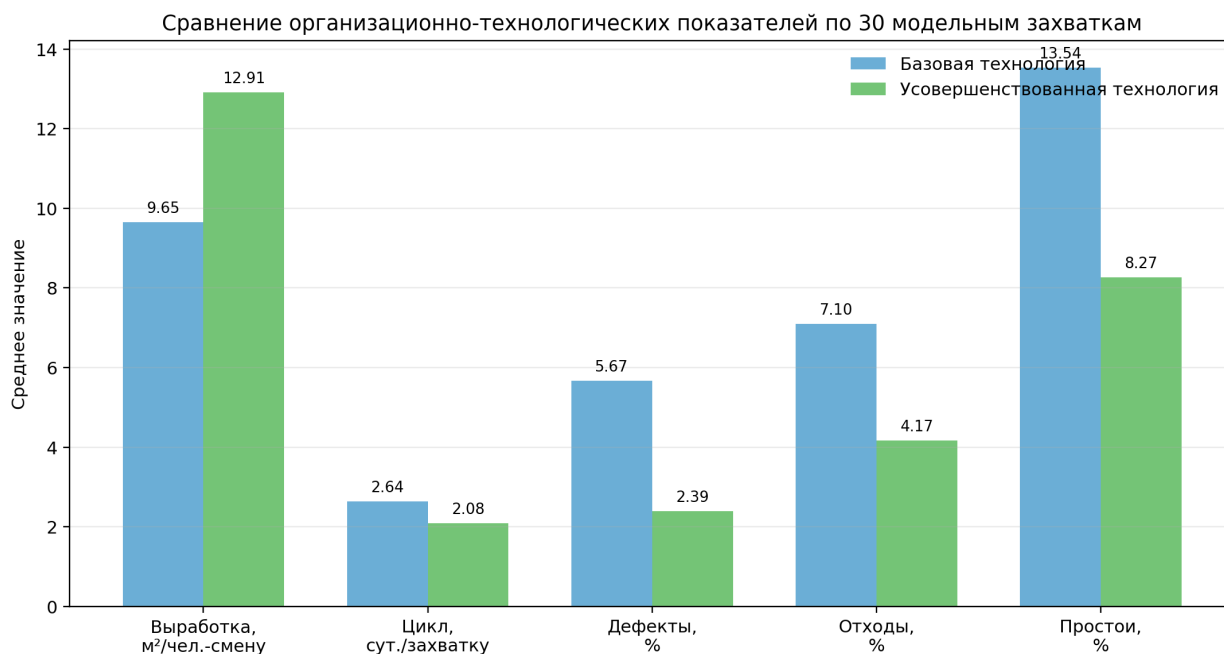


Рисунок 3. Сравнение средних показателей базовой и усовершенствованной технологии

Средняя выработка увеличилась с 9,65 до 12,91 м²/чел.-смену. Рост объясняется предварительным комплектованием материалов, уменьшением непроизводительных перемещений, устойчивой подачей смесей и снижением объема повторных операций. Продолжительность цикла захватки уменьшилась с 2,64 до 2,08 суток, что обеспечивает более равномерное перемещение звеньев и сокращает незавершенное производство.

Наибольшее относительное улучшение получено по дефектной площади — снижение на 57,8 %. Ключевым фактором является приемка скрытых работ: площадь приклейки, схема анкеров, нахлесты сетки и состояние узлов фиксируются до закрытия последующим слоем. Отходы плит уменьшились на 41,2 % благодаря раскрою и маркировке комплектов по захваткам. Организационные простои сократились на 38,9 %.

Сценарный сетевой расчет показал возможность сокращения суммарной продолжительности фасадного цикла со 118 до 93 рабочих дней без увеличения предельной численности основных звеньев. Эффект достигается за счет балансировки операций и ограничения фронта незавершенных работ, а не за счет нарушения технологических выдержек.

4.3. Экономическая и эксплуатационная интерпретация

Экономический эффект формируется из трех составляющих: снижения трудозатрат, уменьшения отходов и сокращения переделок. Для модельного объекта расчетная стоимость фасадного цикла уменьшилась с 356,4 до 333,8 тыс. сум/м². С учетом затрат на BIM-подготовку, обучение и цифровой контроль чистый эффект составил около 123,3 млн сум. Показатель является расчетным и должен уточняться по локальным ценам, составу механизации и договорной схеме конкретного проекта.

Эксплуатационная эффективность связана с сохранением проектного сопротивления теплопередаче. Дефекты приклейки и незаполненные швы могут существенно ухудшать фактическую тепловую защиту [10]. Поэтому термография целесообразна как приемочный инструмент, но ее следует проводить при достаточном температурном перепаде, без прямого солнечного облучения и сильного ветра в соответствии с общими процедурами ISO 6781 – 1 [8].

Полученные результаты подтверждают системный характер эффективности: увеличение толщины утеплителя без организационной дисциплины не обеспечивает устойчивого результата. Проектирование, логистика, монтаж и контроль должны рассматриваться как единая производственная система.

5. Практические рекомендации

Таблица 5.

Рекомендуемые мероприятия по внедрению

Направление	Рекомендуемое действие	Ожидаемый результат
Проектная подготовка	создать BIM-модель фасада, классифицировать узлы и зоны риска	точные объемы, отсутствие неучтенных элементов
Пробный участок	выполнить эталонную захватку и испытания сцепления	утвержденные нормы времени и образец качества

Направление	Рекомендуемое действие	Ожидаемый результат
Логистика	комплектовать и маркировать материалы на одну захватку	снижение перемещений, ожиданий и отходов
Контроль основания	измерять влажность, прочность и отклонение плоскости	предотвращение отслоений и перерасхода клея
Скрытые работы	не закрывать приклейку, анкера и сетку до цифровой приемки	прослеживаемость критических параметров
Климатический режим	фиксировать температуру, влажность и ветер; применять защитные сетки	стабильное твердение мокрых слоев
Финальная приемка	выполнить визуальный контроль, термографию и цифровой паспорт	выявление аномалий до сдачи объекта

Внедрение рекомендуется выполнять поэтапно. На первом этапе стандартизируются технологические карты, чек-листы и критерии приемки. На втором этапе вводятся BIM-зонирование, комплектная логистика и маркировка материалов. На третьем этапе формируется цифровой паспорт фасада с фотографиями скрытых операций, результатами испытаний и перечнем примененных компонентов.

Производственный поток следует балансировать по такту захватки. Подготовка основания должна опережать монтаж не более чем на одну-две захватки; монтаж плит — армирование на величину технологической выдержки. Чрезмерное расширение фронта создает незавершенное производство, усложняет защиту от осадков и увеличивает риск повреждения открытого утеплителя.

Минимальный набор измеримых критериев включает прочность и влажность основания, площадь контакта клея, плоскостность плит, глубину и количество анкеров, нахлест сетки, толщину базового слоя, температуру и влажность воздуха. Контроль должен быть связан с ответственным исполнителем и конкретной захваткой.

Для многоэтажных объектов технологические решения необходимо согласовывать с требованиями пожарной безопасности и охраны труда. Конкретная схема противопожарных рассечек, тип утеплителя и состав системы принимаются по национальным нормам и документам производителя. Средства подмащивания и подачи материалов выбираются с учетом геометрии фасада, ветровых условий и безопасной производительности.

6. Заключение

Разработана усовершенствованная технология процессов наружной теплоизоляции стен многоэтажных жилых зданий, объединяющая теплотехническое проектирование, BIM-зонирование, комплектную логистику, поточную синхронизацию и пооперационный цифровой контроль. В отличие от традиционного подхода объектом управления является законченная захватка с подтвержденным качеством скрытых операций.

Расчет модельной стены показал снижение коэффициента теплопередачи с 0,59 до 0,204 Вт/(м²·К). Сценарное сравнение 30 захваток установило увеличение выработки на 33,8 %, уменьшение цикла на 21,0 %, дефектной площади на 57,8 %, отходов на 41,2 % и простоев на 38,9 %. Эти результаты подтверждают целесообразность комплексного совершенствования технологических и организационных процедур.

Практическая ценность исследования состоит в переводе общих требований энергоэффективности и надежности в систему измеримых контрольных точек. Применение предложенной модели позволяет сократить переделки, обеспечить прослеживаемость качества и приблизить фактические характеристики фасада к проектным значениям.

Список литературы

1. Постановление Президента Республики Узбекистан от 10.07.2020 № ПП-4779 «О дополнительных мерах по сокращению зависимости отраслей экономики от топливно-энергетической продукции путем повышения энергетической эффективности экономики и использования имеющихся ресурсов».
2. Barreira E., de Freitas V.P. Experimental study of the hygrothermal behaviour of ETICS // Building and Environment. – 2013. – Т. 63.
3. EOTA. EAD 040083-01-0404. External thermal insulation composite systems with rendering system. European Assessment Document. EOTA.
4. ISO 6946:2017. Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation methods.
5. ISO 10211:2017. Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations.
6. ISO 13788:2012. Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature and interstitial condensation – Calculation methods.
7. ISO 9869–1:2014. Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance – Part 1: Heat flow meter method.
8. ISO 6781–1:2023. Performance of buildings – Detection of heat, air and moisture irregularities in buildings by infrared methods – Part 1: General procedures.
9. Michalak J. External Thermal Insulation Composite Systems from Industry and Academia Perspective // Sustainability. 2021. – 2021. – Т. 13.
10. Nardi I., Perilli S. de Rubeis T., Sfarra S., Ambrosini D. Influence of insulation defects on the thermal performance of walls: experimental and numerical investigation // Journal of Building Engineering. – 2019.
11. Parracha J.L. et al. Toward the Sustainable and Efficient Use of External Thermal Insulation Composite Systems // Buildings. -2023. -. – 2023. – Т. 13.
12. Sulakatko V., Lill I., Liisma E. Analysis of On-site Construction Processes for Effective ETICS Installation // Procedia Economics and Finance. 2015. -. – 2015. – Т. 21.

References

1. Decree of the President of the Republic of Uzbekistan No. PP-4779 dated 10.07.2020 'On Additional Measures to Reduce the Dependence of Economic Sectors on Fuel and Energy Products through Improving Energy Efficiency of the Economy and Utilizing Available Resources'] (In Russ.)

2. Barreira E., de Freitas V.P. Experimental study of the hygrothermal behaviour of ETICS. *Building and Environment*. 2013. Vol. 63. P. 31–39.
3. EOTA. EAD 040083-01-0404. External thermal insulation composite systems with rendering system. European Assessment Document. EOTA.
4. ISO 6946:2017. Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation methods.
5. ISO 10211:2017. Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations.
6. ISO 13788:2012. Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature and interstitial condensation – Calculation methods.
7. ISO 9869–1:2014. Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance – Part 1: Heat flow meter method.
8. ISO 6781–1:2023. Performance of buildings – Detection of heat, air and moisture irregularities in buildings by infrared methods – Part 1: General procedures.
9. Michalak J. External Thermal Insulation Composite Systems from Industry and Academia Perspective. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. 13705.
10. Nardi I., Perilli S. de Rubeis T., Sfarra S., Ambrosini D. Influence of insulation defects on the thermal performance of walls: experimental and numerical investigation // *Journal of Building Engineering*. – 2019.
11. Parracha J.L. et al. Toward the Sustainable and Efficient Use of External Thermal Insulation Composite Systems. *Buildings*. 2023. Vol. 13. 1664.
12. Sulakatko V., Lill I., Liisma E. Analysis of On-site Construction Processes for Effective ETICS Installation. *Procedia Economics and Finance*. 2015. Vol. 21. P. 297–305.

Статья поступила в редакцию: 09.06.2026

Статья принята к публикации: 16.06.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 691.3+666.9

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23016

Влияние микроволокон волластонита на свойства цементных композитов

Сатторов Зафар Мурадович
проф.

*Кафедры Строительство и инженерия окружающей среды, Ташкентский архитектурно-
строительный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: mr.s.zafar@mail.ru*

Отажонов Олмосбек Аскарали угли
*ст. преп., Ферганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Фергана
E-mail: olmosbekotajonov@gmail.com*

The effect of wollastonite microfibers on the properties of cement composites

Sattorov Zafar Muradovich
*prof. of the department Construction and environmental engineering Tashkent University of
Architecture and Civil Engineering
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Otajonov Olmosbek Askarali ugli
*senior Lecturer
Fergana State Technical University
Republic of Uzbekistan, Fergana*

Аннотация

В данной статье представлен анализ современных исследований, посвящённых применению микроволокон волластонита в цементных композиционных материалах и газобетоне. Актуальность работы обусловлена необходимостью снижения расхода природных ресурсов и уменьшения выбросов углекислого газа, связанных с производством цемента. В качестве перспективного минерального компонента рассматриваются микроволокна волластонита — природного минерала на основе метасиликата кальция, обладающего высокими эксплуатационными и экологическими преимуществами. На основе обзора научной литературы рассмотрено влияние волластонитовых микроволокон на процессы схватывания цементных композитов, прочность при сжатии, карбонизацию, а также на формирование микроструктуры материала. Установлено, что введение волластонита

Библиографическое описание: Сатторов З.М., Отажонов О.А.У. Влияние микроволокон волластонита на свойства цементных композитов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23016>

оказывает существенное влияние на свойства цементных систем. При оптимальном содержании микроволокон наблюдается уплотнение структуры цементного камня, повышение трещиностойкости, улучшение прочности при изгибе и увеличение долговечности композитов. Результаты электронно-микроскопических исследований подтверждают армирующую функцию волластонитовых волокон и их способность препятствовать развитию и распространению микротрещин. Проведённый анализ показал, что наиболее эффективным является замещение цемента волластонитовыми микроволокнами в количестве 5–15 %. При превышении данного уровня возможно снижение прочности при сжатии вследствие уменьшения количества продуктов гидратации цемента. Отмечено также, что применение волластонита способствует сокращению расхода цемента и снижению экологической нагрузки на окружающую среду. Полученные результаты подтверждают перспективность использования микроволокон волластонита при разработке современных энергоэффективных и экологически безопасных строительных материалов.

Abstract

This article presents an analysis of recent studies devoted to the application of wollastonite microfibers in cement-based composite materials and aerated concrete. The relevance of the research is associated with the need to reduce the consumption of natural resources and decrease carbon dioxide emissions related to cement production. Wollastonite microfibers, a natural calcium metasilicate mineral with favorable mechanical and environmental properties, are considered a promising mineral additive for sustainable construction materials.

Based on a review of scientific literature, the influence of wollastonite microfibers on the setting behavior of cement composites, compressive strength, carbonation processes, and microstructure development was investigated. The analysis revealed that the incorporation of wollastonite significantly affects the properties of cementitious systems. At optimal dosage levels, wollastonite microfibers contribute to the densification of the cement matrix, enhancement of crack resistance, improvement of flexural strength, and increased durability of composite materials. Scanning electron microscopy studies confirmed the reinforcing role of wollastonite fibers and their ability to inhibit the initiation and propagation of microcracks within the cement matrix.

The conducted review demonstrated that the most effective replacement level of cement with wollastonite microfibers ranges from 5 % to 15 %. Higher replacement ratios may lead to a reduction in compressive strength due to the decreased formation of cement hydration products. Furthermore, the use of wollastonite contributes to lowering cement consumption and reducing the environmental impact of construction materials. The obtained results confirm the potential of wollastonite microfibers for the development of modern energy-efficient, durable, and environmentally friendly building materials.

Ключевые слова: цементный композит, волластонит, газобетон, время схватывания, прочность, карбонизация.

Keywords: cementitious composite, wollastonite, aerated concrete, setting time, strength, carbonation.

Введение

Бурное развитие бетонной промышленности сопровождается значительным потреблением природных ресурсов и оказывает существенное воздействие на окружающую среду. В связи с этим в последние годы особое внимание уделяется поиску альтернативных материалов, способных частично заменить цемент и природный песок в составе бетонных смесей, что позволяет повысить экологическую устойчивость строительных материалов.

Одним из перспективных направлений является использование микроволокон волластонита — природного минерала на основе метасиликата кальция, обладающего широким распространением и доступной сырьевой базой. Благодаря своим физико-механическим характеристикам волластонит может применяться в качестве частичной замены цемента в цементных композиционных материалах. В последние годы данное направление исследований привлекает всё больший интерес научного сообщества во многих странах мира.

Газобетон представляет собой легкий пористый строительный материал, обладающий высокими теплоизоляционными свойствами и способностью поглощать ударную энергию. Благодаря этим качествам он широко применяется в системах наружного утепления зданий, при устройстве оснований, шумозащитных и аэродромных конструкциях, а также в других инженерных сооружениях. По сравнению с традиционным бетоном, газобетон лучше отвечает современным требованиям энергоэффективности и экологической безопасности строительства.

Однако затвердевший газобетон характеризуется развитой многомасштабной пористой структурой, вследствие чего он более подвержен образованию трещин под действием нагрузок, температурных колебаний и влажности по сравнению с обычными бетонами. Возникновение микротрещин негативно отражается на его эксплуатационных характеристиках.

Для повышения прочности и трещиностойкости газобетона в его структуру вводят равномерно распределенные волокна. Такие волокна способны уменьшать усадку при высыхании, повышать прочность на растяжение и сжатие, улучшать пластичность, вязкость разрушения и препятствовать развитию микротрещин. Волокнистое армирование делает процесс разрушения материала менее хрупким.

Волокна, применяемые для модификации газобетона, подразделяются на макроволокна, микроволокна и нановолокна. К макроволокнам относятся неорганические волокна (базальтовые, стеклянные, керамические, металлические) и органические волокна (полипропиленовые, поливинилспиртовые и др.). В качестве нановолокон наиболее часто используют углеродные нанотрубки и графеновые наноструктуры.

Большинство микроволокон волластонита получают путем переработки природной руды, образовавшейся в результате взаимодействия кремнезема и известняка при высокотемпературных магматических процессах. Производство порошка волластонита включает дробление, сортировку, обогащение и последующий помол до получения различных фракций.

Крупнейшими мировыми производителями волластонита являются Китай и США. Начиная с 1970-х годов, волластонит активно используется в промышленности как безопасная альтернатива асбесту. Согласно токсикологическим исследованиям, максимально допустимая концентрация волластонитовой пыли в воздухе примерно в два раза выше, чем для асбеста, что свидетельствует о значительно меньшей опасности материала. Учёные, изучая токсикологические и эпидемиологические аспекты применения волластонита, пришли к выводу о его относительной безопасности для здоровья человека.

Волластонит отличается хорошей биосовместимостью, низким коэффициентом теплового расширения, невысокой теплопроводностью и высокой термической стабильностью. Кроме того, его использование способствует улучшению механических характеристик материалов. Добавление волластонитовых микроволокон позволяет повысить трещиностойкость, прочность на растяжение и вязкость разрушения цементных материалов. В исследовании Лу [10] было установлено, что замещение до 7 % цемента волластонитом способствует улучшению микроструктуры и снижению усадочных деформаций цементных композитов.

С экологической точки зрения использование волластонитовые микроволокна в цементных материалах позволяет уменьшить расход цемента и сократить выбросы CO_2 , возникающие при его производстве. Поэтому применение волластонита в строительных композитах вызывает все больший интерес у исследователей. Несмотря на большое количество исследований, посвященных использованию волластонитовые микроволокна в цементных материалах, применение волластонитовых микроволокон для модификации газобетона до настоящего времени изучено недостаточно.

Материалы и методы

Время схватывания. Применение микроволокон волластонита в качестве добавки к композиционным материалам на основе обычного портландцемента (ОПС) оказывает существенное влияние на время схватывания смесей. В исследовании Ransinchung и Kumar [12] изучалось влияние различных дозировок микроволокон волластонита на время схватывания цементных композитов. Экспериментальные результаты показали, что при одинаковой нормальной густоте цементного теста увеличение содержания микроволокон волластонита приводит к увеличению как начального, так и конечного времени схватывания.

Для смесей ОПС–волластонит–микрокремнезем наблюдалась обратная тенденция: повышение содержания микрокремнезема сокращало время схватывания. Это объясняется тем, что введение микрокремнезема увеличивает количество активного SiO_2 и CaO в системе, что ускоряет процессы гидратации цемента.

Согласно данным Wahab и соавт. [16], при постоянном водоцементном отношении 0,5 введение микроволокон волластонита вместо цемента в количестве 10 %, 20 % и 30 % увеличивало начальное время схватывания соответственно на 1,3 %, 2,7 % и 4,6 %. В целом повышение доли волластонитовых микроволокон в составе цементного композита приводит к замедлению процессов схватывания. С одной стороны, это связано с эффектом разбавления:

уменьшается количество цемента на единицу объема смеси [12]. С другой стороны, ультратонкие волокна образуют плотные оболочки вокруг цементных частиц, препятствуя проникновению воды и замедляя гидратацию цемента [16].

Прочность при сжатии. Количество микроволокон волластонита существенно влияет на прочность цементных композитов при сжатии. По данным Wahab и соавт. [16], при замещении цемента волластонитовыми микроволокнами на 10 %, 20 % и 30 % прочность раствора в возрасте 28 суток уменьшалась соответственно на 12 %, 35 % и 35 % по сравнению с контрольным составом. Аналогичные результаты были получены Ransinchung и соавт. [12], которые также отметили значительное снижение прочности при увеличении содержания волластонита.

В ряде исследований установлено, что введение волластонитовых микроволокон лишь незначительно снижает прочность композитов. Так, Khan и соавт. [7] показали, что при замещении 30 % цемента микроволокнами размером 3,5 мкм прочность раствора на сжатие снизилась всего на 3 % через 7 суток и на 10 % через 28 суток. Zareei и соавт. [18] установили, что бетон с содержанием 50 % волластонитовых микроволокон имел прочность всего на 6 % ниже контрольного образца в возрасте 28 суток.

Снижение прочности объясняется уменьшением количества гидросиликатов кальция (C-S-H-геля), образующихся в процессе гидратации цемента. Эффект наполнителя, создаваемый микроволокнами, не способен полностью компенсировать снижение объема гидратационных продуктов.

Несмотря на это, отдельные исследования показывают положительное влияние волластонита на раннюю прочность. Soliman и Nehdi [14] установили, что ультравысокопрочный бетон (UHPC), содержащий 4 % и 12 % микроволокон волластонита, через 12 часов демонстрировал увеличение прочности примерно на 21 % и 61 % соответственно по сравнению с контрольным составом. Авторы связывают это с армирующим и мостиковым эффектом микроволокон.

По данным Wahab и соавт. [16], при замещении цемента на 10 %, 20 % и 30 % прочность раствора через 2 суток увеличивалась на 24 %, 64 % и 63 % соответственно. Это объясняется уплотнением структуры цементного камня за счет эффекта заполнителя.

Некоторые исследования посвящены также долговременной прочности. Mathur и соавт. [11] сообщили об увеличении прочности бетона на 28–35 % при введении 10 % микроволокон волластонита через 28 и 56 суток твердения. Kalla и соавт. исследовали бетон с различным содержанием волластонита (5–25 %) и установили, что прочность через 90 суток сначала возрастала, а затем снижалась. Максимальные значения были достигнуты при содержании волластонита около 10 %. При превышении уровня 15 % прочность становилась ниже, чем у контрольного бетона.

Yücel и соавт. [17] получили синтетический волластонит из кварца и кальцита и исследовали его влияние на прочность растворов. При содержании синтетического волластонита 9 % прочность на сжатие увеличивалась на 42,8 % через 7 суток и на 39,7 % через 28 суток по сравнению с контрольным составом. Высокая эффективность была обусловлена повышенной активностью синтетического материала.

Размер частиц волластонита также оказывает заметное влияние. Khan и соавт. [7] показали, что микроволокна размером 3,5 мкм обеспечивали более высокую прочность по сравнению с частицами размером 9 мкм. Deу и соавт. [3] установили, что оптимальное содержание составляло 5 % для крупных волокон (2000 и 850 мкм) и 10 % для мелких волокон (55 и 33 мкм).

Карбонизация. Карбонизация цементных композитов представляет собой физико-химический процесс взаимодействия углекислого газа воздуха с продуктами гидратации цемента. В результате уменьшается содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$, снижается pH порового раствора, повышается вероятность коррозии арматуры и образования трещин в железобетонных конструкциях [13].

Kalla и соавт. [5, 6] исследовали глубину карбонизации бетонов с различными водоцементными отношениями и содержанием волластонитовых микроволокон. Было установлено, что глубина карбонизации возрастает с увеличением возраста карбонизации и водоцементного отношения. Однако введение 5–15 % микроволокон волластонита способствовало снижению глубины карбонизации.

Карбонизация может использоваться и как способ твердения материалов с одновременным связыванием CO_2 [19]. Huang и соавт. [4] проводили ускоренную карбонизацию волластонит-портландцементных композитов в герметичной камере с атмосферой CO_2 чистотой более 99 %. Продолжительность обработки составляла 10, 30 и 120 минут при давлении 0,5–2,5 МПа.

Результаты показали, что при умеренном давлении поглощение CO_2 достигало 20 %. При этом прочность при сжатии возрастала до 80 МПа, что более чем на 350 % превышало показатели образцов, твердеющих в воздушной среде.

Ashraf и соавт. [2] с использованием методов XRD, SEM/EDS, статистического наноиндентирования и микромеханического моделирования установили, что карбонизация волластонита приводит к образованию карбоната кальция и аморфного силикагеля (Рисунок 1). Авторы также отметили, что модуль упругости карбонизированных паст увеличивается с ростом степени карбонизации. Аналогичные выводы были получены Svensson и соавт. [15].

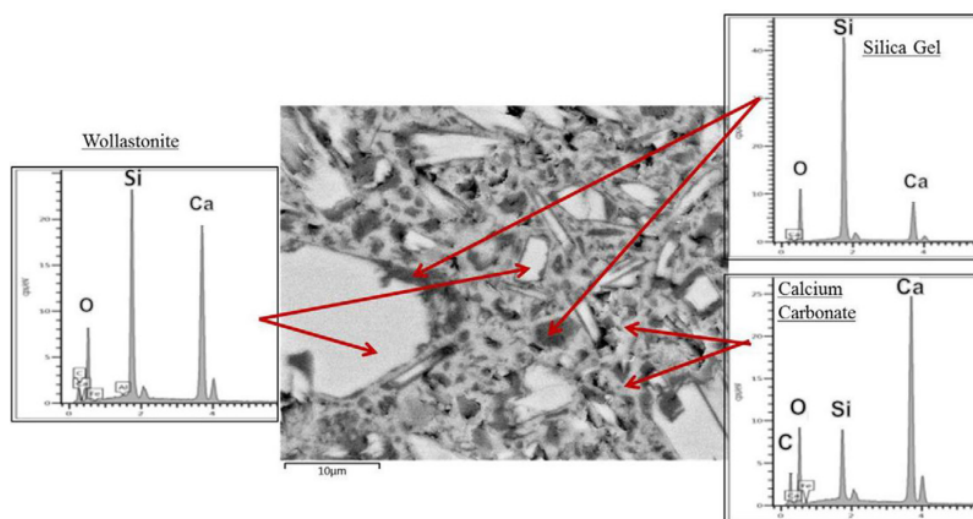


Рисунок 1. Изображение микроструктуры карбонизированной волластонитовой пасты, полученное методом сканирующей электронной микроскопии в режиме обратно рассеянных электронов (SEM) [18]

SEM-анализ. Согласно исследованиям [8], механизм действия волластонитовых микроволокон в цементных композитах активно изучался с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM).

Low и Beaudoin [9] показали, что волластонитовые микроволокна сохраняют стабильность в высоко щелочной цементной среде. На поверхности волокон не было выявлено признаков разрушения или образования посторонних отложений. Авторы также отметили равномерное и хаотичное распределение микроволокон в цементной матрице.

Исследование Khan и соавт. [7] показало, что добавление микроволокон размером 3,5 и 9 мкм способствует повышению плотности структуры цементного композита. Аналогичные результаты получили Kalla и соавт. [12]. Эти эффекты объясняются малым размером частиц и их способностью уплотнять структуру материала.

Микроволокна, размеры которых сопоставимы или превышают размеры цементных зерен, проявляют выраженные армирующие свойства [8]. SEM-анализ показал наличие механизмов разрушения, характерных для волокнистых композитов: разрыв волокон, их выдергивание, отклонение трещин и образование прочных межфазных связей между волокном и матрицей (Рисунок 2).

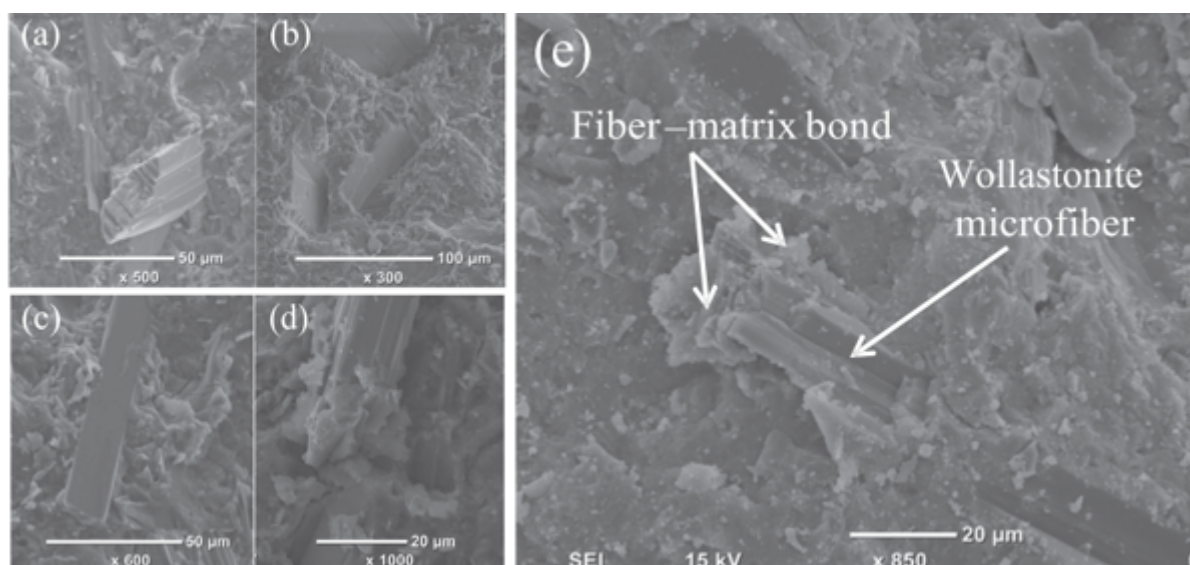


Рисунок 2. Микроструктурные изображения, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), отражающие механизмы армирования цементных композитов микроволокнами волластонита: (а) разрушение волокна; (б) выдергивание волокна из матрицы; (в) отклонение траектории распространения трещины; (г, д) адгезионное взаимодействие на границе раздела «микроволокно – цементная матрица» [16]

Волокнистая структура волластонита препятствует распространению микротрещин, что способствует повышению прочности на растяжение, изгиб и ударной вязкости цементных композитов.

Однако определить взаимодействие продуктов гидратации цемента с поверхностью волластонита методом SEM затруднительно, поскольку волокна обычно покрыты слоем гидратационных продуктов.

Результаты и обсуждение

Проведённый анализ научной литературы подтверждает возможность эффективного использования микроволокон волластонита в качестве частичного заменителя цемента при производстве цементных композитов. Вместе с тем ряд вопросов, связанных с механизмами взаимодействия волластонита с цементной матрицей, оптимальными дозировками и долгосрочными эксплуатационными характеристиками материалов, требует дальнейшего углублённого изучения.

Результаты исследований показали, что с увеличением доли замещения цемента волластонитом удобоукладываемость смесей, как правило, снижается. Основной причиной этого является высокая удельная поверхность тонкодисперсных волластонитовых микроволокон, требующая большего количества воды для смачивания частиц.

Заключение

Истощение природных ресурсов и значительные выбросы углекислого газа являются одними из основных факторов, оказывающих влияние на производство цемента. В связи с этим поиск альтернативных цементу материалов и разработка экологически безопасных композиционных вяжущих систем в последние годы стали одним из приоритетных направлений научных исследований.

Анализ литературных данных свидетельствует о наличии определённых расхождений в оценке влияния волластонита на прочность цементных композитов при сжатии. В большинстве случаев установлено, что замещение цемента небольшими количествами волластонита позволяет либо повысить прочность на сжатие, либо сохранить её на уровне традиционных цементных материалов. Однако при увеличении степени замещения наблюдается тенденция к снижению прочности. Кроме того, результаты большинства исследований подтверждают, что оптимальное содержание и правильно подобранный размер частиц волластонитовых микроволокон способствуют повышению прочности при изгибе, улучшению сопротивления усадочному растрескиванию и увеличению долговечности цементных композитов. Особое внимание было уделено изучению влияния волластонита на микроструктуру цементного камня. Полученные данные показывают, что волластонит является относительно инертным материалом и обладает ограниченной способностью вступать в химическое взаимодействие с гидроксидом кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

На основании анализа существующих исследований установлено, что наиболее эффективный уровень замещения цемента микроволокнами волластонита находится в пределах 5–15 %. Оптимальный размер частиц волластонита следует выбирать с учётом функционального назначения цементного композита. Более мелкие частицы преимущественно выполняют роль микронаполнителя, уплотняя структуру материала, тогда как частицы, размеры которых сопоставимы или превышают размеры цементных зёрен, в большей степени проявляют армирующий эффект и функционируют как волокнистый компонент.

Список литературы

1. Сатторов З.М., Отажонов О.А. Изучение микроморфологии волластонита при улучшении свойств ячеистых бетонов // Вестник науки Южного Казахстана. – 2025. – № 2. – С. 45–50.
2. Ashraf W., Olek J., Tian N.N. Multiscale characterization of carbonated wollastonite paste and application of homogenization schemes to predict its effective elastic modulus // Cem. Concr. Compos. – 2016. – Т. 72. – Р. 284–298.
3. Dey V., Kachala R., Bonakdar A., Mobasher B. Mechanical properties of micro and sub-micron wollastonite fibers in cementitious composites // Constr. Build. Mater. – 2015. – Т. 82. – Р. 351–359.
4. Huang H., Guo R.N., Wang T., Hu X.T., Garcia S., Fang M.X. et al. Carbonation curing for wollastonite-Portland cementitious materials: CO₂ sequestration potential and feasibility assessment // J. Clean. Prod. – 2019. – Т. 211. – Р. 830–841.
5. Kalla P., Rana A., Chad Y.B., Misra A., Csetenyi L. Durability studies on concrete containing wollastonite // J. Clean. Prod. – 2015. – Т. 87. – Р. 726–734.
6. Kalla P., Misra A., Gupta R.C., Csetenyi L., Gahlot V., Arora A. Mechanical and durability studies on concrete containing wollastonite–fly ash combination // Constr. Build. Mater. – 2013. – Т. 40. – Р. 1142–1150.

7. Khan R.I., Ashraf W. Effects of ground wollastonite on cement hydration kinetics and strength development // *Constr. Build. Mater.* – 2019. – Т. 218. – P. 150–161.
8. Kwon S., Nishiwaki T., Choi H., Mihashi H. Effect of wollastonite microfiber on Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Cement-Based Composites based on application of multi-scale fiber-reinforcement system // *J. Adv. Concr. Technol.* – 2015. – Т. 13. – P. 332–344.
9. Low N.M.P., Beaudoin J.J. Stability of Portland cement-based binders reinforced with natural wollastonite micro-fibres // *Cem. Concr. Res.* – 1994. – Т. 24. – P. 874–884.
10. Lu Z.Y., Yao J., Leung C.K.Y. Using graphene oxide to strengthen the bond between PE fiber and matrix to improve the strain hardening behavior of SHCC // *Cem. Concr. Res.* – 2019. – Т. 126.
11. Mathur R., Misra A.K., Goel P. Influence of wollastonite on mechanical properties of concrete // *J. Sci. Ind. Res.* – 2007. – Т. 66. – P. 1029–1034.
12. Ransinchung G.D., Kumar B. Investigations on pastes and mortars of ordinary Portland cement admixed with wollastonite and microsilica // *J. Mater. Civ. Eng.* – 2010. – Т. 22. – P. 305–313.
13. Shi C.J., Wang D.H., Jia H.F., Liu J.H. Role of limestone powder and its effect on durability of cement-based materials // *J. Chin. Ceram. Soc.* – 2017. – Т. 45. – P. 1582–1593.
14. Soliman A.M., Nehdi M.L. Effect of natural wollastonite microfibers on early-age behavior of UHPC // *J. Mater. Civ. Eng.* – 2012. – Т. 24. – P. 816–824.
15. Svensson K., Neumann A., Menezes F.F., Lempp C., Pöllmann H. The conversion of wollastonite to CaCO₃ considering its use for CCS application as cementitious material // *Appl. Sci-Basel.* – 2018. – Т. 8.
16. Wahab M.A., Latif I.A., Kohail M., Almasry A. The use of wollastonite to enhance the mechanical properties of mortar mixes // *Constr. Build. Mater.* – 2017. – Т. 152. – P. 304–309.
17. Yücel H.E. Özcan S. Strength characteristics and microstructural properties of cement mortars incorporating synthetic wollastonite produced with a new technique // *Constr. Build. Mater.* – 2019. – Т. 223. – P. 165–176.
18. Zareei S.A., Ameri F., Shoaee P., Bahrami N. Recycled ceramic waste high strength concrete containing wollastonite particles and micro-silica: A comprehensive experimental study // *Constr. Build. Mater.* – 2019. – Т. 201. – P. 11–32.
19. Zhang D., Ghoulah Z., Shao Y.X. Review on carbonation curing of cement-based materials // *J. CO₂ Util.* – 2017. – Т. 21. – P. 119–131.

References

1. Z.M. Satterov O.A. Otazhonov [Study of Wollastonite Micromorphology in Improving the Properties of Cellular Concretes] *Journal: Bulletin of Science of South Kazakhstan.* No.2(30) 2025 (In Russ.)
2. W. Ashraf, J. Olek N.N. Tian, Multiscale characterization of carbonated wollastonite paste and application of homogenization schemes to predict its effective elastic modulus, *Cem. Concr. Compos.* 72 (2016) P. 284–298.

3. V. Dey, R. Kachala, A. Bonakdar, B. Mobasher, Mechanical properties of micro and sub-micron wollastonite fibers in cementitious composites, *Constr. Build. Mater.* 82 (2015) P. 351–359.
4. H. Huang R.N. Guo, T. Wang X.T. Hu, S. Garcia M.X. Fang, et al., Carbonation curing for wollastonite-Portland cementitious materials: CO₂ sequestration potential and feasibility assessment, *J. Clean. Prod.* 211 (2019) – P. 830–841.
5. P. Kalla, A. Rana Y.B. Chad, A. Misra, L. Csetenyi, Durability studies on concrete containing wollastonite, *J. Clean. Prod.* 87 (2015) P. 726–734.
6. P. Kalla, A. Misra R.C. Gupta, L. Csetenyi, V. Gahlot, A. Arora, Mechanical and durability studies on concrete containing wollastonite–fly ash combination, *Constr. Build. Mater.* 40 (2013) – P. 1142–1150.
7. R.I. Khan, W. Ashraf, Effects of ground wollastonite on cement hydration kinetics and strength development, *Constr. Build. Mater.* 218 (2019) – P.150–161.
8. S. Kwon, T. Nishiwaki, H. Choi, H. Mihashi, Effect of wollastonite microfiber on Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Cement-Based Composites based on application of multi-scale fiber-reinforcement system, *J. Adv. Concr. Technol.* 13 (7) (2015) P. 332–344.
9. N.M.P. Low J.J. Beaudoin, Stability of Portland cement-based binders reinforced with natural wollastonite micro-fibres, *Cem. Concr. Res.* 24 (5) (1994) P.- 874–884.
10. Z.Y. Lu, J. Yao C.K.Y. Leung, Using graphene oxide to strengthen the bond between PE fiber and matrix to improve the strain hardening behavior of SHCC, *Cem. Concr. Res.* 126 (2019) 105899.
11. R. Mathur A.K. Misra, P. Goel, Influence of wollastonite on mechanical properties of concrete, *J. Sci. Indus. Res.* 66 (2007) – P. 1029–1034.
12. G.D. Ransinchung R.N., B. Kumar, Investigations on pastes and mortars of ordinary Portland cement admixed with wollastonite and microsilica, *J. Mater. Civ. Eng.* 22 (4) (2010) – P. 305–313.
13. C.J. Shi D.H. Wang H.F. Jia J.H. Liu, Role of limestone powder and its effect on durability of cement-based materials, *J. Chin. Ceram Soc.* 45 (11) (2017) – P. 1582–1593 (in Chinese).
14. A.M. Soliman M.L. Nehdi, Effect of natural wollastonite microfibers on earlyage behavior of UHPC, *J. Mater. Civ. Eng.* 24 (7) (2012) – P. 816–824.
15. K. Svensson, A. Neumann F.F. Menezes, C. Lempp, H. Pöllmann, The conversion of wollastonite to CaCO₃ considering its use for CCS application as cementitious material, *Appl. Sci-Basel.* 8 (304) – (2018) – P.18.
16. M.A. Wahab I.A. Latif, M. Kohail, A. Almasry, The use of Wollastonite to enhance the mechanical properties of mortar mixes, *Constr. Build. Mater.* 152 (2017) P. 304–309.
17. H.E. Yücel, S. Özcan, Strength characteristics and microstructural properties of cement mortars incorporating synthetic wollastonite produced with a new technique, *Constr. Build. Mater.* 223 (2019) – P. 165–176.
18. S.A. Zareei, F. Ameri, P. Shoaee, N. Bahrami, Recycled ceramic waste high strength concrete containing wollastonite particles and micro-silica: A comprehensive experimental study, *Constr. Build. Mater.* 201 (2019) – P. 11–32.

-
19. D. Zhang, Z. Ghoulch Y.X. Shao, Review on carbonation curing of cementbased materials, J. CO2 Util. 21 (2017) – P. 119–131.

УДК 691.32+624.172

**Экспериментальное исследование физико-механических и
микроструктурных свойств бетона на основе резинового порошка,
полученного из отработанных автомобильных шин и модифицированного
химической добавкой**

Хасанов Собир Садыкович

канд. техн. наук

доц., Ташкентский университет архитектуры и строительства

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Шакиров Икрам Исламович

докторант

кафедры, Технология строительных материалов и конструкций, Ташкентский

архитектурно-строительный университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: ikrom.shakirov404@gmail.com

Соттикулов Элёр Сотимбоевич

д-р техн. наук

вед. научн. сотр. ООО Ташкентский научно-исследовательский институт химической

технологии

Республика Узбекистан, п/о Ибрат

**Experimental investigation of the physicomachanical and microstructural
properties of concrete incorporating rubber powder derived from end-of-life
tires and modified with a chemical admixture**

Khasanov Sobir

candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Tashkent University of Architecture and Civil Engineering

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Shakirov Ikram

PhD, researcher

of the Department of Construction Materials and Structural Engineering Technology Tashkent

University of Architecture and Civil Engineering

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Sottikulov Elyor

doctor of Technical Sciences, Leading Researcher

LLC Tashkent Research Institute of Chemical Technology

Republic of Uzbekistan, Ibrot p.o

Библиографическое описание: Хасанов С.С., Шакиров И.И., Соттикулов Э.С. Экспериментальное исследование физико-механических и микроструктурных свойств бетона на основе резинового порошка, полученного из отработанных автомобильных шин и модифицированного химической добавкой // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23274>

Аннотация

В настоящее время увеличение объёма отработанных автомобильных шин делает их экологически безопасную переработку и эффективное использование при производстве строительных материалов одним из наиболее актуальных направлений научных исследований. В настоящем исследовании резиновый порошок, полученный из отработанных автомобильных шин, использовался в качестве материала для замещения 20 % объёма природного мелкого заполнителя песка в составе бетона, а физико-механические и микроструктурные свойства бетона изучались экспериментально. В ходе исследования с использованием оптической микроскопии была проанализирована морфология поверхности частиц резинового порошка фракции 0,6–1,5 мм. Подготовленные бетонные образцы сравнивались с контрольным составом, а их прочность при сжатии определялась через 3, 7 и 28 суток твердения. Кроме того, для улучшения сцепления между резиновым порошком и цементным камнем поверхность частиц предварительно обрабатывали латексная добавка Sika Latex, после чего анализировали её влияние на механические свойства бетона. Результаты исследования показали, что применение резинового порошка снижает прочность бетона при сжатии. Микроструктурный анализ подтвердил, что качество сцепления между резиновым порошком и цементным камнем является одним из основных факторов, определяющих механические свойства бетона.

Abstract

At present, the increasing volume of end-of-life automobile tires has made their environmentally safe recycling and effective utilization in the production of construction materials one of the most important areas of scientific research. In this study, rubber powder obtained from end-of-life automobile tires was used as a material to replace 20 % by volume of the natural fine aggregate sand in concrete, and the physico-mechanical and microstructural properties of the concrete were investigated experimentally. During the study, the surface morphology of rubber powder particles with a particle size of 0.6–1.5 mm was analyzed using optical microscopy. The prepared concrete specimens were compared with the control mixture, and their compressive strength was determined after 3, 7, and 28 days of curing. In addition, to improve the bond between the rubber powder and the cement matrix, the surface of the rubber particles was pre-treated with the chemical admixture Sika Latex, after which its effect on the mechanical properties of the concrete was analyzed. The results showed that the incorporation of rubber powder reduced the compressive strength of the concrete. Microstructural analysis confirmed that the quality of the bond between the rubber powder and the cement matrix is one of the main factors determining the mechanical properties of concrete.

Ключевые слова: резиновый порошок, отработанные автомобильные шины, прочность при сжатии, утилизация, микроструктура, природный мелкий заполнитель, бетон, химическая добавка.

Keywords: rubber powder, waste tires, compressive strength, recycling, microstructure, natural fine aggregate, concrete, chemical admixture.

Введение

В настоящее время природные ресурсы добываются, перерабатываются, используются в качестве готовой продукции, а по окончании срока службы выбрасываются. В результате это приводит к сокращению природных ресурсов, увеличению объема отходов и усилению негативного воздействия на окружающую среду [9]. В качестве примера можно привести отходы, образующиеся из автомобильных шин.

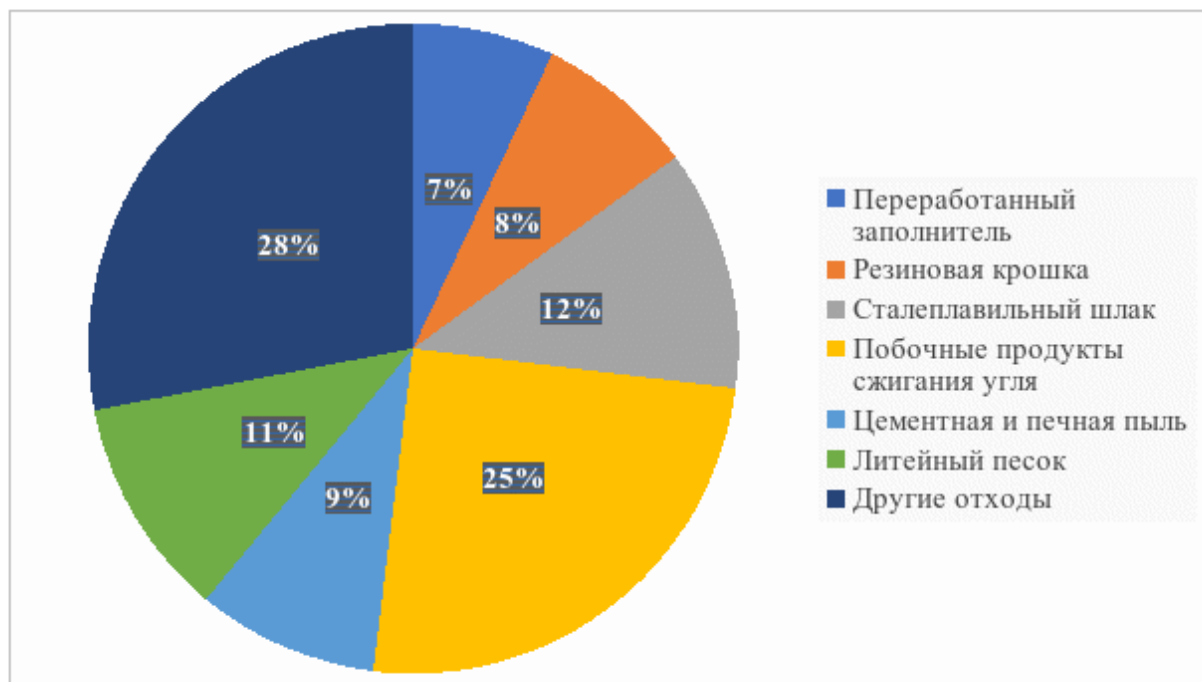


Рисунок 1. Показатели использования различных видов отходов

В настоящее время в мире ежегодно производится примерно 1,5 миллиарда автомобильных шин. В результате этого ежегодно образуется 1 миллиард отработанных автомобильных шин. Автомобильные шины являются биологически неразлагаемым материалом, и в процессе их сжигания или разложения выделяются токсичные соединения, такие как диоксины, мышьяк, кадмий и бензол, загрязняющие атмосферу, почву и водные ресурсы [12].

Во многих исследованиях подробно изучено влияние различных форм и размеров резиновых материалов, включая резиновый порошок и резиновую крошку, на свойства материалов. Так, в исследовании Н. Liu и соавт. [7] было установлено, что при обработке резинового порошка смолой прочность на сжатие увеличилась на 12 %, а прочность на растяжение — на 40 %. J. Lafta и соавт. [6] исследовали бетон с заменой песка 5–15 % резинового порошка, а также влияние 2,5–5 % микрокремнезема. В результате было установлено, что введение микрокремнезема улучшает плотность и водостойкость. Y.C. Khern и соавт. [3] изучали улучшение механических свойств бетона в результате химической обработки 8 % резинового порошка растворами NaOH и $\text{Ca}(\text{ClO})_2$. При химической обработке прочность практически достигала уровня контрольного бетона. В других исследованиях были предложены различные способы предварительной обработки

резины с использованием таких химических добавок, как перманганат калия (KMnO_4) и гидросульфит натрия (NaHSO_3) [13], (H_2SO_4 , HCl , HNO_3 и CH_3COOH), хлорид кальция (CaCl_2) и перекись водорода (H_2O_2) [1]. Многочисленные исследования показывают, что влияние применения измельченной резины автомобильных шин в качестве заполнителя для бетона на его механические, физические и эксплуатационные свойства до настоящего времени изучено недостаточно. В особенности влияние этих материалов на свойства бетона, оптимальная степень замещения, а также оптимальный способ предварительной обработки поверхности резиновой крошки до сих пор исследованы недостаточно.

Целью настоящего исследования является экспериментальное изучение применения измельченной резины автомобильных шин в составе бетона в качестве материала для частичной замены природных заполнителей, а также ее влияния на физико-механические свойства бетона.

Материалы и методы

Цемент: В настоящем научном исследовании был выбран портландцемент типа ЦЕМ I 42,5 Н произведенный АО «Бекабад цемент» Ташкентской области.

Таблица 1.

Физико-механические свойства портландцемента

Нормальная густота, %	Сроки схватывания, мин		Истинная плотность, г/см ³	Насыпная плотность, кг/м ³	Насыпная плотность в уплотненном состоянии, кг/ м ³	Остаток на сите, %	ПСХ
	начало	окончание					
27	165	285	3.124	1170	1570	8	3296

Таблица 2.

Химический состав портландцемента

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO(свободный)
64.58	21.54	4.63	4.62	1.68	0.63

Таблица 3.

Минералогический состав портландцемента

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
61.54	15.32	4.43	14.04

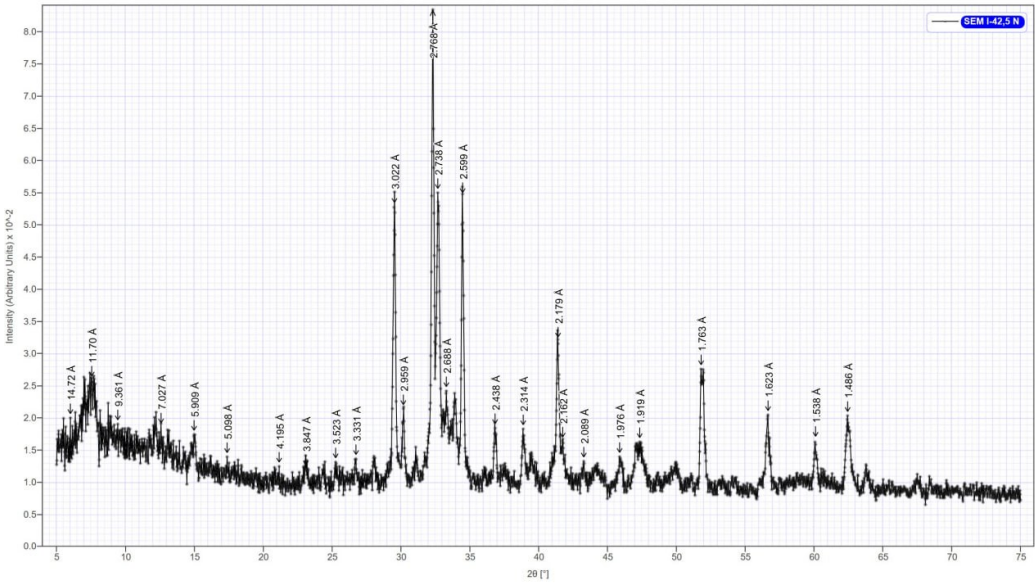


Рисунок 2. Дифрактограмма рентгеновской дифракции (XRD) цемента

Крупный заполнитель: В настоящем исследовании использовался щебень фракции 5–20 мм, полученный в Чиназском районе Ташкентской области.

Таблица 4.

Основные физико-механические свойства щебня, используемого в качестве крупного заполнителя для бетона

№	Показатели	Единица измерения	Крупный заполнитель (щебень)
1	Истинная плотность	кг/см ³	2600
2	Насыпная плотность	кг/см ³	1400
3	Модуль крупности	мм	5-10
4	Пустотность	%	46.2

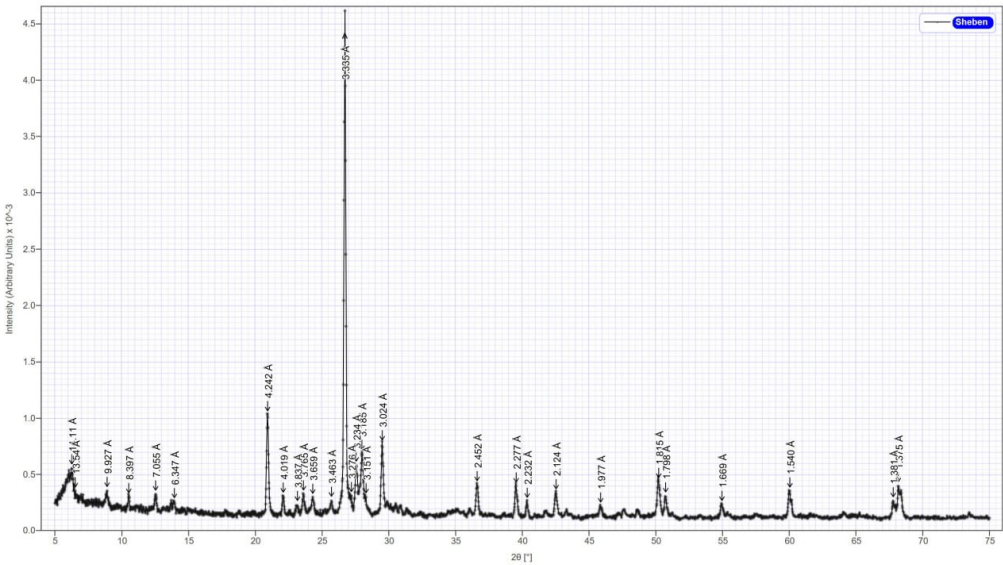


Рисунок 3. Дифрактограмма рентгеновской дифракции (XRD) образца щебня

Мелкий заполнитель: В настоящем исследовании в качестве мелкого заполнителя использовался природный песок, полученный в Чиназском районе Ташкентской области.

Таблица 5.

Основные физико-механические свойства мелкого заполнителя

№	Показатели	Единица измерения	Значение показателей
1	Модуль крупности	-	2.25
3	Истинная плотность	кг/см ³	2610
4	Насыпная плотность	кг/см ³	1360
5	Пустотность	%	47
6	Содержание пылевидных и глинистых частиц	%	1

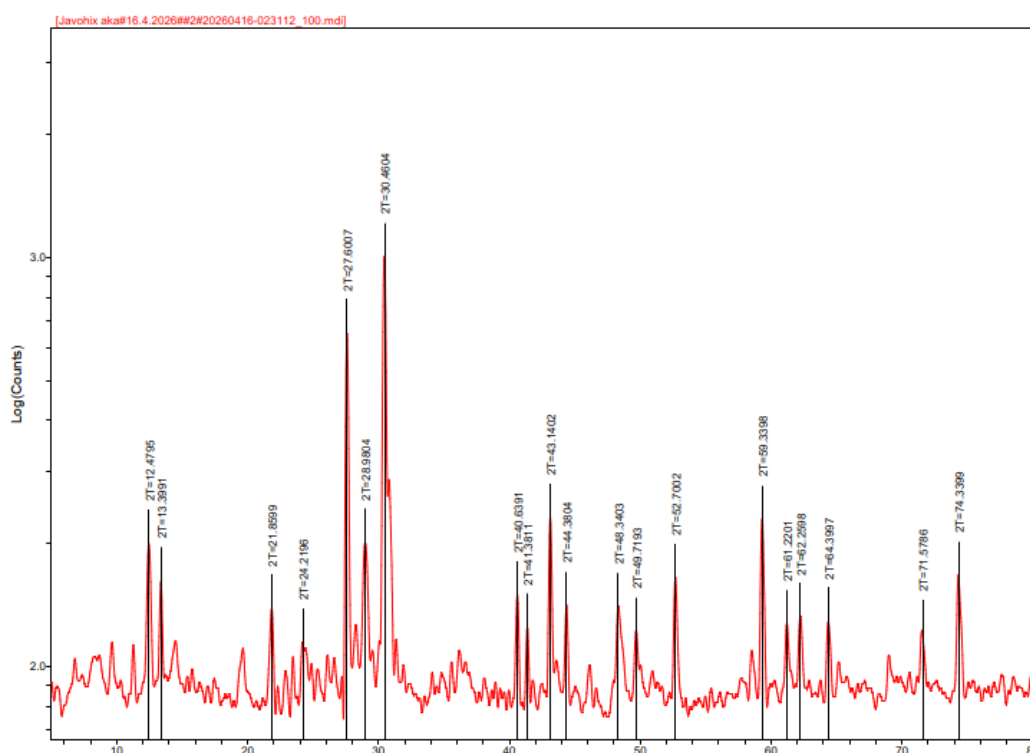


Рисунок 4. Дифрактограмма рентгеновской дифракции (XRD) образца песка

Резиновый порошок: В исследовании использовался мелкий резиновый порошок фракции 0,6–1,5 мм

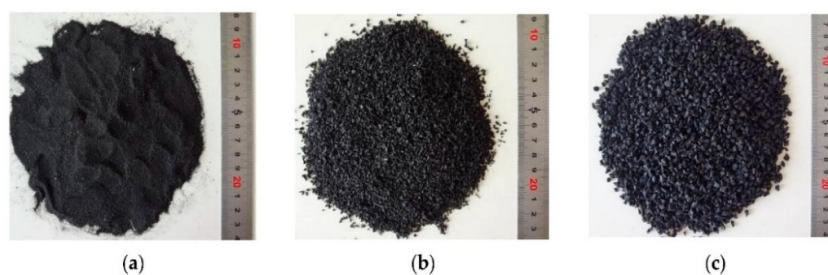


Рисунок 5. Разделение резинового порошка по фракциям

Таблица 6.

Основные физико-механические свойства резинового порошка

№	Основные свойства	Единица измерения	Значение показателей
1	Фракция резинового порошка	мм	0,6-1,5
2	Истинная плотность	кг/м ³	1100
3	Насыпная плотность	кг/м ³	407
4	Пустотность	%	63

Вода: для приготовления бетонной смеси использовалась вода питьевого качества. Применялась вода с показателем pH не ниже 4. Вода не содержала вредных химических и органических примесей, способных отрицательно повлиять на процесс твердения бетона.

Химические добавки: В настоящем исследовании для повышения прочности сцепления между резиновым порошком и цементом, а также с целью снижения расхода цемента использовались химические добавки. В качестве химической добавки применялся суперпластификатор Sika Latex, произведённый ООО «Sika» (г. Ташкент).

Результаты и их обсуждения

В настоящем исследовании в качестве частичной замены мелкого заполнителя (песка) использовался резиновый порошок фракцией 0,6–1,5 мм в количестве 20 % по объёму. Согласно многочисленным исследованиям, увеличение содержания резинового порошка может отрицательно влиять на механические свойства бетона, при этом наиболее приемлемым диапазоном замещения мелкого заполнителя считается 5–20 % [1, 2, 8, 10, 4, 11]. В связи с этим в настоящем исследовании были изготовлены бетонные образцы с содержанием резинового порошка 0 % (контрольный образец) и 20 % по объёму (фракция 0,6–1,0 мм). Образцы бетона с содержанием 20 % резинового порошка были предварительно обработаны латексная добавка Sika Latex, после чего были исследованы их механические свойства и изображения, полученные с использованием оптического микроскопа. Для бетонных образцов были проведены испытания на прочность при сжатии в возрасте 3, 7 и 28 суток. По результатам исследования установлено, что бетонные образцы, подвергнутые поверхностной обработке, латексная добавка Sika Latex, продемонстрировали более низкие механические показатели по сравнению с другими составами. Для определения прочности бетона на сжатие были изготовлены образцы кубической формы размером 100×100×100 мм. Образцы выдерживали в течение 28 суток при температуре 20±2 °С и относительной влажности не менее 95 %, после чего проводили испытания. Образец помещали в гидравлический пресс и прикладывали нагрузку 0,4 – 0,6 МПа, после чего полученные результаты были проанализированы.

В ходе эксперимента результаты испытаний на прочность при сжатии бетонных образцов с содержанием 0 % резинового порошка (контрольный бетон) и 20 % резинового порошка в возрасте 3, 7 и 28 суток представлены в таблице 7. Согласно полученным результатам, применение резинового порошка привело к снижению прочности на сжатие по сравнению с контрольным бетоном до 59,2 %, 51,8 % и 50,2 % в возрасте 3, 7 и 28 суток соответственно. Такое снижение прочности бетона на сжатие обусловлено главным образом изменением структуры бетонной матрицы вследствие замещения 20 % объёма песка

резиновым порошком. Из-за низкого модуля упругости и гидрофобной природы резинового порошка не формируется прочное сцепление с цементным камнем. В результате микропустоты и микротрещины развиваются более интенсивно.

Таблица 7.

Состав резинобетона и его прочность на сжатие

№	Тип состава	Цемент (кг)	Резиновый порошок (кг)	Щебень (кг)	Песок (кг)	Вода (л)	Прочность на сжатие, (МПа)		
							3 суток	7 суток	28 суток
1	Контрольный образец (0 %)	5.59	0	10.42	6.66	2.19	32.6	36.5	43,2
2	20 % резинового порошка	5.59	0.56	10.42	5.33	2.19	13.3	17.6	21,5

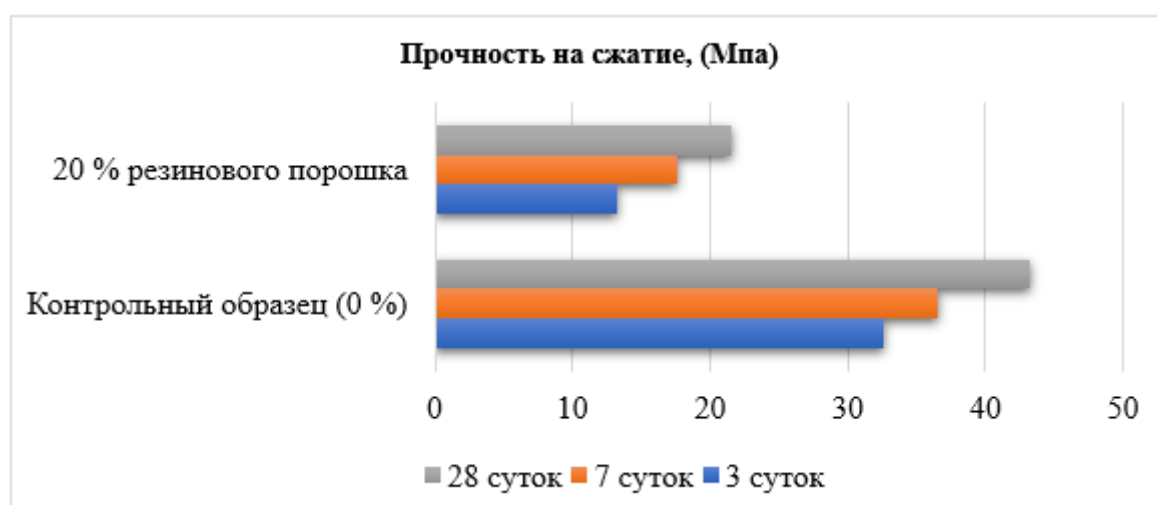


Рисунок 6. Результаты испытаний бетонных образцов на прочность при сжатии

Полученные результаты согласуются с данными исследования К. Batayneh и соавт. [1], в котором при замещении мелкого заполнителя (песка) 20 % его объема резиновым порошком прочность бетона на сжатие в возрасте 28 суток составила 18,96 МПа. Аналогичные результаты были получены в исследованиях Y. Hu и соавт. [4] — 15,63 МПа, T. Uygunoğlu и соавт. [11] — 17,5 МПа, а также S. Thomas и соавт. [10] — 20 МПа. Во всех указанных исследованиях также было установлено, что применение 20 % резинового порошка приводит к значительному снижению прочности бетона на сжатие. Вместе с тем в исследованиях Liu и соавт. [8] при использовании 20 % резинового порошка была получена прочность 33,41 МПа, а в работе A. Dharsan и соавт. [2] — 34,25 МПа, что свидетельствует о сравнительно более высоких показателях прочности.



Рисунок 7. Поверхность сечения бетонного образца с добавлением резинового порошка

В настоящем исследовании для уменьшения количества микропустот и микротрещин в структуре бетона, а также улучшения сцепления между цементным камнем и резиновым порошком наиболее эффективным решением рассматривается модификация поверхности резинового порошка посредством её предварительной обработки. С этой целью в эксперименте были исследованы показатели прочности бетона на сжатие с использованием 20 % резинового порошка по объёму и латексная добавки Sika Latex, предназначенной для модификации цементных композиций. Полученные результаты были сопоставлены с результатами контрольного бетона. В ходе исследования поверхность резинового порошка обрабатывали латексная добавка Sika Latex в трёх различных составах, после чего полученные результаты были сравнительно проанализированы.

В первом составе сравнивались бетонные образцы, в которых для предварительной обработки поверхности резинового порошка использовалось 200 г Sika Latex и 100 г Sika Latex. При уменьшении количества Sika Latex до 100 г прочность на сжатие в возрасте 3, 7 и 28 суток снизилась на 8,0 %, 7,2 % и 6,6 % соответственно. При дальнейшем уменьшении содержания Sika Latex до 50 г снижение прочности оказалось ещё более выраженным и составило 16,0 %, 14,4 % и 13,1 % соответственно. Наилучшие результаты были получены при использовании 200 г Sika Latex. Однако даже в этом случае прочность на сжатие оказалась на 54,17 % ниже по сравнению с контрольным образцом и на 7,91 % ниже по сравнению с бетоном, содержащим 20 % резинового порошка по объёму без предварительной обработки. Основной причиной данного явления, вероятно, является снижение содержания Sika Latex, вследствие чего на поверхности частиц резинового порошка не формируется непрерывное и однородное полимерное покрытие. В таких условиях гидрофобная природа резины ограничивает её смачивание и взаимодействие с цементным тестом, что приводит к снижению прочности адгезионного контакта на границе раздела между цементным камнем и частицами резины. Это, в свою очередь, может способствовать развитию микропор и микротрещин в переходной зоне и, как следствие, снижению прочности бетона при сжатии.

Таблица 8.

Прочность на сжатие бетонов с резиновым порошком при использовании различных дозировок латексная добавки Sika Latex

№	Тип состава	Цемент (кг)	Резиновый порошок (кг)	Щебень (кг)	Песок (кг)	Вода (л)	Прочность на сжатие, (Мпа)		
							3 суток	7 суток	28 суток
1	200 г Sika Latex	5.59	0.56	10.42	5.33	2.19	12.5	16.7	19.8
2	100 г Sika Latex	5.59	0.56	10.42	5.33	2.19	11.5	15.5	18.5
3	50 г Sika Latex	5.59	0.56	10.42	5.33	2.19	10.5	14.3	17.2

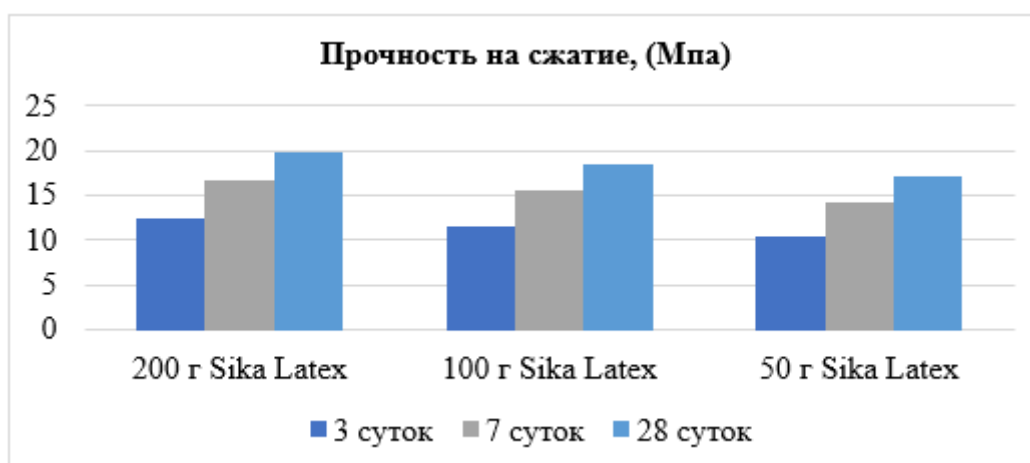


Рисунок 8. Изменение прочности на сжатие бетона на основе резинового порошка во времени при использовании различных дозировок латексная добавки Sika Latex

Кроме того, в настоящем исследовании был проведён микроструктурный анализ с целью изучения полимерного слоя, сформированного латексной добавкой Sika Latex на поверхности резинового порошка, оценки его равномерности распределения, степени покрытия поверхности частиц, а также его влияния на сцепление с цементным камнем



Рисунок 9. Микроскопическое изображение резинового порошка с добавлением 200 г Sika Latex

В образце, приготовленном с использованием 100 г Sika Latex и 100 г воды, наблюдалось лишь частичное формирование полимерного слоя

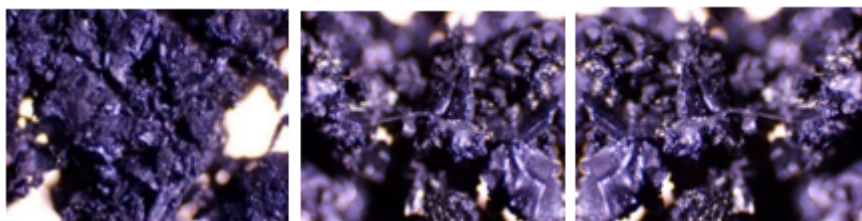


Рисунок 10. Микроскопическое изображение резинового порошка с добавлением 100 г Sika Latex и 100 г воды

В образце, приготовленном с использованием 150 г воды и 50 г Sika Latex, практически не наблюдалось формирования полимерного слоя на поверхности частиц резинового порошка. Микроструктурный анализ выявил наличие многочисленных пустот и неоднородных контактных поверхностей.



Рисунок 11. Микроскопическое изображение резинового порошка с добавлением 50 г Sika Latex и 150 г воды

Заключение

По результатам экспериментальных исследований установлено, что частичная замена мелкого заполнителя в составе бетона резиновым порошком, полученным из отработанных автомобильных шин, в количестве до 20 % по объёму оказывает существенное влияние на микроструктуру и физико-механические свойства бетона. Это обусловлено низким модулем упругости частиц резинового порошка, вследствие чего ухудшается качество сцепления между цементным камнем и резиной, образуются микропустоты и, как следствие, снижается прочность бетона на сжатие. Предварительная обработка резинового порошка латексная добавка Sika Latex не позволила повысить прочность бетона на сжатие до уровня контрольного образца. Это подтверждает необходимость дальнейшего совершенствования методов модификации поверхности резинового порошка. Использование резинового порошка, полученного из отработанных автомобильных шин, при производстве бетона является целесообразным для инженерных сооружений, спортивных площадок и конструкций, предназначенных для снижения вибрационных воздействий, где важное значение имеют такие эксплуатационные характеристики, как акустическая и теплоизоляционная эффективность.

Список литературы

1. Batayneh K., Marie I., Asi I. Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries [Электронный ресурс] // Waste Management. – 2008. – Т. 28, № 11. – P. 2171–2176. – DOI: 10.1016/j.wasman.2007.09.035.
2. Dharsan A., Arunsahayaraj S., Manikandan S., Satheesh Kumar P. Experimental investigation on properties of scrap rubber tyre as fine aggregate in concrete [Электронный ресурс] // E3S Web of Conferences. – 2023. – Т. 455. – DOI: 10.1051/e3sconf/202345503005.
3. He L., Ma Y., Liu Q., Mu Y. Surface modification of crumb rubber and its influence on the mechanical properties of rubber cement concrete [Электронный ресурс] // Construction and Building Materials. – 2016. – Т. 120. – P. 403–407. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.018.
4. Hu Y., Sun X., Ma A., Gao P.Y. An experimental study on the basic mechanical properties and compression size effect of rubber concrete with different substitution rates [Электронный ресурс] // Advances in Civil Engineering. – 2020. – Т. 2020. – DOI: 10.1155/2020/8851187.
5. Khern Y.C., Paul S.C., Kong S.Y., Babafemi A.J., Anggraini V. Miah.J., Šavija B. Impact of chemically treated waste rubber tire aggregates on mechanical, durability and thermal properties of concrete [Электронный ресурс] // Frontiers in Materials. – 2020. – Т. 7. – DOI: 10.3389/fmats.2020.00090.
6. Lafta M.J., Tobeia S.B., Khattab M.M., Mahdi F.Kh., Alhadi M.M. Investigating the mechanical properties of concrete using non-treated crumb rubber and silica fume [Электронный ресурс] // Research on Engineering Structures and Materials. – 2026. – Т. 12, № 1. – P. 441–450. – DOI: 10.17515/resm2025-939me0602rs.
7. Liu H., Wang X., Jiao Y., Sha T. Experimental investigation of the mechanical and durability properties of crumb rubber concrete [Электронный ресурс] // Materials. – 2016. – Т. 9, № 3. – DOI: 10.3390/ma9030172.
8. Liu H., Wang X., Jiao Y., Sha T. Experimental investigation of the mechanical and durability properties of crumb rubber concrete [Электронный ресурс] // Materials. – 2016. – Т. 9, № 3. – DOI: 10.3390/ma9030172.
9. Oluleye B.I., Chan D.W., Olawumi T.O., Saka A.B. Assessment of symmetries and asymmetries on barriers to circular economy adoption in the construction industry towards zero waste: a survey of international experts [Электронный ресурс] // Building and Environment. – 2023. – Т. 228. – DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109885.
10. Thomas B.S., Gupta R.C. Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber [Электронный ресурс] // Journal of Cleaner Production. – 2015. – Т. 113. – P. 86–92.
11. Uygunoğlu T., Topçu I.B. The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars [Электронный ресурс] // Construction and Building Materials. – 2010. – Т. 24, № 7. – P. 1141–1150. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.005.

-
12. Wu M., Tian W., He J., Liu F., Yang J. Seismic isolation effect of rubber-sand mixture cushion under different site classes based on a simplified analysis model [Электронный ресурс] // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2023. – Т. 166. – DOI: 10.1016/j.soildyn.2022.107738.
 13. Youssf O., Hassanli R., Mills J.E. Skinner., Ma X., Zhuge Y., Roychand R., Gravina R. Influence of mixing procedures, rubber treatment, and fibre additives on rubcrete performance [Электронный ресурс] // Journal of Composites Science. – 2019. – Т. 3, № 2.

UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Электронный научный журнал

№ 8(149)

Август 2026 г.

Часть 6

Свидетельство о регистрации СМИ: ЭЛ № ФС 77 – 54434 от 17.06.2013

Мнение авторов может не совпадать с позицией редакции.

Издание содержит научную информацию и в соответствии с ч. 4 ст. 1
Федерального закона от 29.12.2010 № 436-ФЗ «О защите детей от информации,
причиняющей вред их здоровью и развитию» не подлежит классификации
(маркировке) по возрастным категориям

Издательство ООО «Юниверсум»

Объём издания: 72 с.

Минимальные системные требования: процессор с частотой от 1,3 ГГц; ОЗУ от
512 МБ; программа для чтения PDF-файлов; доступ к сети Интернет

Дата размещения в сети Интернет: 28.08.2026

Журнал размещается в:

CYBERLENINKA

e НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
LIBRARY.RU

Google
scholar

U **ULRICHSWEB**
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

>BASE

СОЦИОНЕТ

OpenAIRE



Registry of Open Access
Repositories (ROAR)