



**ОРЕНБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

СОВРЕМЕННАЯ МЕХАНИКА В ЦИФРОВУЮ ЭПОХУ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

**IV ВСЕРОССИЙСКАЯ
МОЛОДЕЖНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ,**

посвящённая 70-летию юбилею
Оренбургского государственного университета



**ОРЕНБУРГ,
3-4 июня 2025**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»



СОВРЕМЕННАЯ МЕХАНИКА В ЦИФРОВУЮ ЭПОХУ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Материалы IV Всероссийской молодежной научно-практической
конференции

3-4 июня 2025

Рекомендовано ученым советом федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Оренбург
2025

УДК 62
ББК 30в6 + 30.121 + 34.22
С 55

Редактор – Пояркова Е.В., доктор технических наук, доцент

- С 55 **Современная механика в цифровую эпоху: проблемы и перспективы** [Электронный ресурс]: материалы IV Всероссийской молодежной научно-практической конференции / под редакцией Е.В. Поярковой; Оренбург. гос. ун-т. – Электронные текстовые данные. – Оренбург: ОГУ, 2025. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): зв., цв.; 12 см. – Систем. требования: IBM PC 686 (Pentium II, K6-2); MS Windows 9.x/NT 5.x; процессор 233 МГц; оперативная память 128 Мб; доп. программные средства: веббраузер; Adobe Acrobat Reader XI. – Загл. с этикетки диска.
ISBN 978-5-7410-3463-7

В настоящем издании представлены материалы IV Всероссийской молодежной научно-практической конференции, посвященные актуальным проблемам прочности и диагностики технического состояния конструкций, исследованиям в области разрушения и прогнозирования механического поведения материалов, а также применению методов компьютерного инжиниринга в цифровом проектировании и производстве.

Данные материалы предназначены для студентов, аспирантов, молодых исследователей и широкого круга специалистов, заинтересованных в современном состоянии механики и перспективах развития студенческой науки..

*Ответственность за ошибки, опечатки и неточности в материалах статьи
несут авторы*

УДК 62
ББК 30в6 + 30.121 + 34.22

ISBN 978-5-7410-3463-7

© Коллектив авторов, 2025
© Оренбургский государственный
университет, 2025

Оглавление

Предисловие.....	8
Приветственное слово председателя Оргкомитета конференции.....	9
СЕКЦИЯ 1 «СОВРЕМЕННАЯ МЕХАНИКА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ, МАШИН, СООРУЖЕНИЙ».....	12
ВЕРЕВОЧНО-СТЕРЖНЕВАЯ МОДЕЛЬ ПЛОСКОЙ ФЕРМЫ	
<i>Астионова Анастасия Владимировна, Каверина Александра Сергеевна, Милохина Анастасия Валентиновна, Щедромирская Виктория Дмитриевна, Дырдина Елена Васильевна</i>	<i>13</i>
АВТОМАТИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ: ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТОВ И 3D-ПЕЧАТИ	
<i>Волошин Константин Георгиевич, Бухтояров Дмитрий Игоревич</i>	<i>20</i>
ТЕНСЕГРИТИ В РАЗРАБОТКЕ УНИКАЛЬНЫХ ПЕШЕХОДНЫХ МОСТОВ И ПЕРЕХОДОВ	
<i>Гизатуллина Элиза Рэстамовна, Манилкина Виктория Александровна, Струков Тимофей Дмитриевич.....</i>	<i>27</i>
ВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ КАК ПРИМЕР КОНСТРУКТИВНОГО ВЫРАЖЕНИЯ АРХИТЕКТУРНОЙ ИДЕИ	
<i>Дусаева Аделина Рустамовна, Джазыкбаева Виктория Ильдаровна, Дырдина Елена Васильевна.....</i>	<i>35</i>
КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ФЕРМ	
<i>Пояркова Екатерина Васильевна, Добрынина Дарья Владимировна, Кульбулекова Рита Панкириевна.....</i>	<i>42</i>
АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ: РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ И МЕТОДОВ СТРОИТЕЛЬСТВА	
<i>Догадов Кирилл Сергеевич, Лученко Илья Денисович, Пояркова Екатерина Васильевна.....</i>	<i>58</i>
АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЁТА ЯДРА СЕЧЕНИЯ КАК СРЕДСТВО СНИЖЕНИЯ ОШИБОК В ПРОЕКТИРОВАНИИ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	
<i>Сергеев Михаил Александрович, Суховеев Александр Владимирович.....</i>	<i>66</i>
СЕКЦИЯ 2 «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЧНОСТИ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ»	73
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРОКА И УСЛОВИЙ ПРОДЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТРУБОПРОВОДА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОРРОЗИИ НА ОБЪЕКТ ПОДГОТОВКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА	
<i>Береговая Ая Алексеевна</i>	<i>74</i>

РЕМОНТ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО СТАНКА КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Гафарова Виктория Александровна, Тимербаев Азамат Зиннурович, Кузеев Артем Максимович.83

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Тулибаев Егор Сагитович, Пояркова Екатерина Васильевна 88

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: ОТ ДРОНОВ ДО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Кожеевникова Арина Павловна, Никулина Анастасия Игоревна.....99

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ АГРЕССИВНЫХ СРЕД НА СОСТОЯНИЕ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Филимошин Данил Дмитриевич 108

НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ФИЛЬТРА УСТАНОВКИ ХИМВОДООЧИСТКИ

Фролова Олеся Александровна, Галушкин Максим Евгеньевич..... 114

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ КОРРОЗИИ В ФЮЗЕЛЯЖЕ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Шпенёв Евгений Евгеньевич..... 118

МЕТОДЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Атасян Нарек Давидович, Шевчук Никита Михайлович, Пояркова Екатерина Васильевна..... 125

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСИЛЕНИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Языкова Юлия Михайловна, Байчеркесова Алина Талгатовна, Пояркова Екатерина Васильевна 136

СЕКЦИЯ 3 «ПРОЦЕССЫ РАЗРУШЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ»..... 145

ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ ПОЖАРА: ПОЧЕМУ КОНСТРУКЦИИ ТЕРЯЮТ НАДЕЖНОСТЬ

Андреева Елизавета Андреевна, Иноземцева Екатерина Евгеньевна, Мельников Максим Александрович..... 146

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА РАЗРУШЕНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Асанова Анастасия Эльдаровна..... 154

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛА ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЧИН ЕГО РАЗРУШЕНИЯ

Гафарова Виктория Александровна, Лановик Алексей Валентинович, Нургалиева Карина Азатовна Шерматов Джамишед Наимджонович, Хисамов Марс Хамитович..... 162

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НАРАЩИВАНИИ НОГТЕЙ	
<i>Карнаева Карина Валерьевна, Ктиторова Екатерина Васильевна</i>	167
АКТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СТАРЕЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	
<i>Золотов Никита Станиславович, Королихин Никита Владиславович</i>	171
АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЗРЫВНЫХ НАГРУЗОК	
<i>Труфанова Полина Сергеевна, Рябова Анастасия Александровна, Пояркова Екатерина Васильевна</i>	178
ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ТЕРМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ МАГНЕЗИТОВОГО СЫРЬЯ	
<i>Махновская Ангелина Сергеевна</i>	187
ПРОГРЕССИВНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ОДНОКАРБИДНОГО ТВЕРДОГО СПЛАВА	
<i>Свиденко Екатерина Валерьевна, Мозгунова Виктория Сергеевна</i>	192
ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕЖИМЫ КАРБОНИТАЦИИ, ПОВЫШАЮЩИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ТВЕРДОГО СПЛАВА МАРКИ ВК10	
<i>Свиденко Екатерина Валерьевна, Мозгунова Виктория Сергеевна</i>	196
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ	
<i>Валиева Назгуль Азатовна, Хамитова Лилия Камилевна, Наумова Анастасия Владимировна, Пояркова Екатерина Васильевна</i>	201
ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ТЕРМОДИФфуЗИОННОГО СИЛИЦИРОВАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЗМЕЕВИКОВ РЕАКЦИОННОЙ ПЕЧИ ИЗ СТАЛИ 10Х23Н18	
<i>Шерматов Джамиед Наимджонович, Тазетдинов Руслан Муслимович, Хисамов Марс Хамитович</i>	214
СЕКЦИЯ 4 «ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИНЖЕНЕРНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ»	221
МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ	
<i>Богодухова Ангелина Сергеевна, Ишмуратов Ильмир Ринатович</i>	222
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА БАЗЕ КАРТЫ ПОТОКА СОЗДАНИЯ ЦЕННОСТИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ	
<i>Жумашева Бибигуль Капуовна, Сафонова Мария Владимировна</i>	226

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ

*Воропаева Полина Владимировна, Инсебаева Алина Мухамбеткалиевна, Пояркова Екатерина
Васильевна* 230

РОЛЬ И ВЛИЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Архапчева Мария Владимировна, Лихацкий Андрей Дмитриевич 239

ЦИФРОВИЗАЦИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: BIM-ТЕХНОЛОГИИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО

*Передереев Михаил Андреевич, Кагарманов Ильгиз Русланович, Рубанов Александр Андреевич,
Прихода Владислав Александрович* 243

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ И ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ

*Поярков Климент Никитич, Архипенко Татьяна Викторовна, Едыгеева Альбина Темирбулатовна,
Рябова Анастасия Александровна, Труфанова Полина Сергеевна* 250

СЕКЦИЯ 5 «СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ» 260

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ МЕТОДОВ И ИНСТРУМЕНТОВ ЗАЩИТЫ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

*Архипенко Татьяна Викторовна, Едыгеева Альбина Темирбулатовна,
Поярков Климент Никитич* 261

УСТОЙЧИВОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО: ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ БУДУЩЕГО

Алеманова Анна Михайловна, Загалко Эллина Вадимовна, Пояркова Екатерина Васильевна 267

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПАУНДЫ: СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ, МЕТОДЫ ПРОИЗВОДСТВА И ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Тимощенко Даниил Сергеевич, Решетов Сергей Юрьевич 278

ОБЗОР ВОЗМОЖНЫХ СПОСОБОВ ПЕРЕРАБОТКИ ШЛАМА ХРОМАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Орехова Александра Вячеславовна, Пояркова Екатерина Васильевна 278

СЕКЦИЯ 6 «КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ» 295

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «КОНСТРУКТИВ»

Фролова Олеся Александровна, Батталов Егор Римович 296

АРОЧНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПРОТИВ ТРАДИЦИОННЫХ БАЛОК: АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ И ЭФФЕКТИВНОСТИ	
<i>Фролова Олеся Александровна, Едачёв Игорь Андреевич, Долгополов Вадим Борисович</i>	302
РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА АРОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ БАЛКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ PYTHON	
<i>Фролова Олеся Александровна, Васильченко Фёдор Вячеславович</i>	309
РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СЕТЧАТОЙ КУПОЛЬНОЙ КРЫШИ РЕЗЕРВУРА	
<i>Закирничный Евгений Григорьевич</i>	315
ИССЛЕДОВАНИЕ РАСЧЕТОВ ПРОСТЕЙШИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ (SCAD, ЛИРА)	
<i>Габдрафикова Алина Арсеновна, Николаева Анна Владимировна</i>	320
СЕКЦИЯ 7 «ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИКИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ»	325
ПРОГРАММА ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА БАЗЕ ПРОЦЕССОРА TMS320F28379D	
<i>Рассохин Сергей Александрович</i>	326
РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ВЫБОРА КОМПЛЕКТА «САМОСВАЛ-ЭКСКАВАТОР»	
<i>Габдрафикова Алина Арсеновна, Николаева Анна Владимировна, Гаврилов Александр Александрович</i>	336
МЕХАНИЗМ ПОДЪЁМА МОСТОВОГО КРАНА, ГРУЗОПОДЪЁМНОСТЬЮ 200 ТОНН	
<i>Строев Иван Андреевич, Прядкин Максим Алексеевич, Решетов Сергей Юрьевич</i>	342
ПРОЧНОСТНЫЕ РАСЧЕТЫ НА ЭВМ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСМИССИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	
<i>Черноусов Егор Александрович, Кашапов Тимур Динарович, Касимов Роман Андреевич</i>	349
СЕКЦИЯ 8 «КРЕАТИВНАЯ МЕХАНИКА И КОНСТРУКТИВНОЕ ТВОРЧЕСТВО» (специальная секция для школьников)	358
ГАЙД ПО ЭФФЕКТИВНОМУ ПОДНЯТИЮ ГРУЗОВ ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ	
<i>Иванова Виктория Станиславовна, Иванова Вероника Александровна</i>	359
ОТ ЗАМАХА ДО УДАРА: МЕХАНИКА ТЕЛА В БОЛЬШОМ ТЕННИСЕ	
<i>Подольяк Наталья Ярославовна, Подольяк Ярослав Александрович</i>	366
ОРЕХОКОЛ: МАЛЕНЬКИЙ ИНСТРУМЕНТ С БОЛЬШОЙ СИЛОЙ	
<i>Иванова Виктория Станиславовна, Иванов Владислав Александрович</i>	372

Предисловие

Уважаемые коллеги, участники и гости конференции!

Представляем вашему вниманию материалы IV Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Современная механика в цифровую эпоху: проблемы и перспективы», посвящённой 70-летию юбилею Оренбургского государственного университета.

В эпоху стремительных технологических изменений, где конструктивные решения, автоматизация и внедрение новых материалов играют ключевую роль, наша конференция становится площадкой для обсуждения самых актуальных вопросов современной механики.

Среди ключевых тем, представленных в сборнике: разработка новых конструкций, в том числе с применением 3D-печати и композитных материалов, автоматизация строительных процессов, актуальные проблемы прочности и диагностики технического состояния конструкций, а также вопросы коррозионной стойкости и мониторинга состояния сооружений. Отдельное внимание уделено цифровым технологиям в инженерном производстве, включая проектирование интеллектуальных систем и применение информационных технологий в строительстве.

Молодые ученые, аспиранты и студенты представляют инновационные подходы к решению сложных задач, демонстрируя высокий уровень интеллектуальной активности и стремление к развитию знаний и технологий.

Конференция призвана стимулировать обмен знаниями и опытом, способствовать развитию новых идей и проектов в области механики и смежных дисциплин. Мы уверены, что представленные научные исследования и инновационные разработки позволят сформировать новое поколение инженеров, способных эффективно использовать возможности цифровой эпохи для решения задач любой сложности.

Благодарим всех участников за активное участие и надеемся, что материалы конференции станут ценным вкладом в развитие науки и технологий, вдохновят на новые открытия и помогут внедрить передовые решения в практику.

Желаем всем приятного и полезного чтения, интересных решений и вдохновляющих открытий!

*Оргкомитет IV Всероссийской
молодежной научно-практической конференции
«Современная механика в цифровую эпоху: проблемы и перспективы»*

Приветственное слово председателя Оргкомитета конференции

Уважаемые авторы и читатели материалов докладов IV Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Современная механика в цифровую эпоху: проблемы и перспективы»!

Как председатель оргкомитета, я рад представить вам данный сборник материалов, отражающий передовой край современной инженерной мысли. Особую значимость этой конференции придает ее проведение в год 70-летия Оренбургского государственного университета. Эта юбилейная дата – отличный повод отметить достижения университета в подготовке молодых специалистов и развитии науки.

Перед вами – результат работы молодых ученых, аспирантов и студентов, которые смело принимают вызовы цифровой эпохи и предлагают инновационные решения в области механики. На страницах сборника вы найдете актуальные исследования, посвященные применению новых материалов и технологий в строительстве, нефтегазовой отрасли, машиностроении, автоматизации процессов, созданию интеллектуальных систем проектирования и мониторинга, а также многим другим важным направлениям.

Особо отмечу участие школьников в специальной секции конференции. Это уникальная возможность для будущих инженеров представить свои первые научные работы и получить ценный опыт от общения с профессионалами. Мы видим в этом важный шаг в развитии инженерного образования и привлечении талантливой молодежи в науку.

Я убежден, что этот сборник станет ценным источником информации для специалистов, преподавателей и студентов, интересующихся современными тенденциями в механике. Надеюсь, что он вдохновит вас на новые исследования, разработки и открытия, которые помогут нам сделать мир вокруг нас более безопасным, эффективным и устойчивым.

Желаю вам продуктивного чтения и успешного применения представленных знаний на практике!

*С уважением,
председатель Оргкомитета конференции,
проректор по научной работе
Оренбургского государственного университета,
доктор физико-математических наук, профессор
Сергей Николаевич Летута*



СЕКЦИЯ 1

«СОВРЕМЕННАЯ МЕХАНИКА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ, МАШИН, СООРУЖЕНИЙ»

ВЕРЕВОЧНО-СТЕРЖНЕВАЯ МОДЕЛЬ ПЛОСКОЙ ФЕРМЫ

**Астионова Анастасия Владимировна, Каверина Александра Сергеевна,
Милохина Анастасия Валентиновна, Щедромирская Виктория Дмитриевна,
студенты бакалавриата, 1 курс, Дырдина Елена Васильевна, кандидат
технических наук, доцент кафедры механики материалов, конструкций и машин**

Оренбургский государственный университет

Аннотация. В данной работе исследуются работа плоской фермы при различных условиях закрепления и вариантах загрузки. Описано изготовление и применение веревочно-стержневой модели для анализа напряженного состояния плоской фермы при различных типах закрепления и нагружения. Приведено сравнение полученных результатов натурного эксперимента с расчетами. Показана образовательная ценность проекта и его значимость для студентов младших курсов, изучающих работу стержневых конструкций.

Ключевые слова: модель, ферма, усилия в стержнях фермы, деформации стержней, растяжение, сжатие, методы исследования деформаций.

Код и рубрика: 67.00.00 Строительство. Архитектура.

Фермы являются одной из ключевых конструкций в строительстве и архитектуре, широко применяясь в мостах, крышах зданий, башнях и других инженерных сооружениях. Их эффективность обусловлена способностью выдерживать значительные нагрузки при минимальном расходе материала. Однако понимание принципов работы ферм, распределения усилий в их элементах и влияния условий закрепления требует глубокого изучения, особенно на начальных этапах обучения. Для студентов первого курса, только начинающих осваивать строительную механику, эти темы могут представлять значительную сложность из-за абстрактности теоретических концепций.

Студенты часто испытывают трудности при изучении работы стержневых систем, таких как фермы, из-за отсутствия наглядных примеров. Теоретические расчёты, без визуализации, могут казаться абстрактными и сложными для понимания. Создание физической модели, демонстрирующей распределение усилий в стержнях, позволяет преодолеть этот барьер, делая учебный материал более доступным и понятным.

Современное образование в области строительства и архитектуры требует не только теоретических знаний, но и умения применять их на практике. Веревно-стержневая модель фермы служит мостом между теорией и реальными конструкциями, позволяя студентам наглядно увидеть, как нагрузки передаются через узлы и стержни, а также как тип закрепления влияет на работу всей системы.

Работа с моделью помогает студентам развивать навыки анализа и проектирования конструкций. Они учатся идентифицировать слабые места, понимать важность геометрической неизменяемости и оценивать влияние

различных факторов на устойчивость фермы. Эти навыки критически важны для будущих инженеров и архитекторов.

Таким образом, разработка и исследование веревочно-стержневой модели плоской фермы является актуальной задачей, сочетающей образовательные, практические и научные аспекты. Результаты проекта имеют значительную ценность как для учебного процесса, так и для дальнейшего применения в инженерной практике.

Плоские фермы конструируют таким образом, что приложенная к ферме нагрузка приложена в узлах, вследствие чего, каждый отдельно взятый стержень находится в равновесии под действием двух сил. Следовательно, стержень испытывает одноосное напряженное состояние – растяжение или сжатие.

Цель проекта – создание упрощенной модели фермы, позволяющей визуально определить вид деформации в стержнях фермы.

Для создания модели мы использовали: конструктор металлический школьный, деревянные бруски, леску.

Последовательность сборки: сначала из трех стержней путем шарнирного соединения концов получили жесткий треугольник, затем последовательно добавляя еще два стержня, получаем новый узел.



Рисунок 1 – Последовательность сборки (этапы изготовления модели)

Таким образом, из 11 элементов металлического конструктора длиной 9,5 см мы собрали 7 узловую ферму с параллельными поясами. Добавив еще 2 стержня, получили 8 узловую ферму с параллельными поясами. В обоих случаях получили жесткую, геометрически неизменяемую конструкцию.

Теперь мы убедились в формуле для проверки геометрической неизменяемости плоской фермы: $k=2n-3$, где k -число стержней, n -число узлов.

Для 7-узловой фермы: $k=11$, $n=7$, проверяем условие $2 \cdot 7 - 3 = 11$;

Для 8-узловой фермы: $k=13$, $n=8$, проверяем условие $2 \cdot 8 - 3 = 13$).

Далее, для каждого стержневого элемента создали элемент-дублер, выполненный из лески (нити, веревки) натянув ее на болтики в узлах фермы. При выполнении данной операции, предусмотрели возможность удаления металлических стержней.

Деревянные бруски использовали для имитации основания.

Шарнирно-неподвижное закрепление конца фермы к неподвижному основанию (бруску) обеспечили с помощью двух коротких (1 см) элементов конструктора (рис. 2, 3).

Шарнирно-подвижное закрепление смоделировали простым опирание другого конца фермы на деревянную опору, обозначив место закрепление направляющей (П-образный маленький элемент конструктора) (рис. 2, 3).

Жесткое защемление одного конца фермы обеспечили, добавив к шарнирно-неподвижной опоре еще один стержень, как показано на рисунке 4.

Разработанная конструкция позволяет визуализировать следующие расчетные схемы фермы:

1. Балочная схема (рисунок 2): две опоры по концам фермы, одна – шарнирно-неподвижная (В), другая – шарнирно-подвижная (А) обеспечивают неподвижность фермы относительно основания.

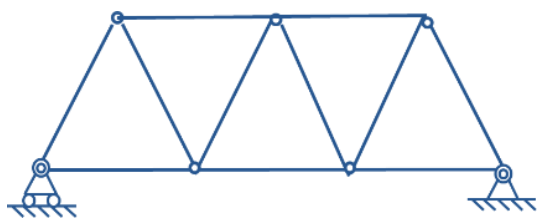


Рисунок 2 – Ферма на двух опорах

2. Ферма с консолью (рисунок 3): две опоры, одна – шарнирно-неподвижная, другая – шарнирно-подвижная, смещена относительно конца фермы.

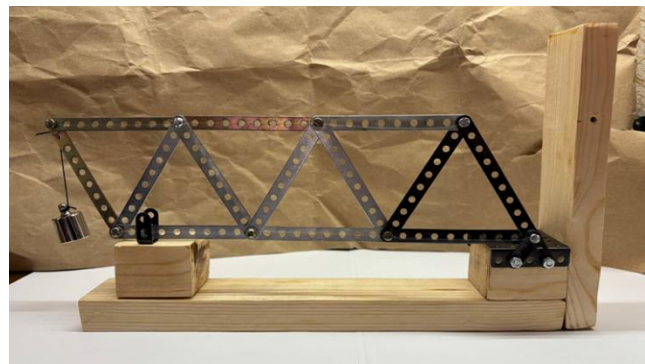
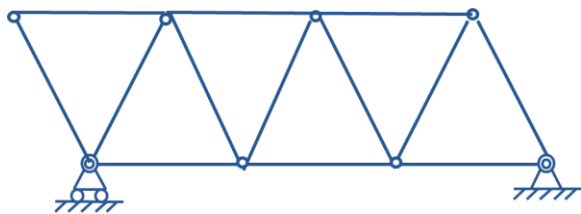


Рисунок 3 – Ферма на двух опорах с консолью

3. Консоль (рисунок 4): один конец фермы жестко закреплен (связь препятствует как линейным, так и вращательным перемещениям), другой – свободный.

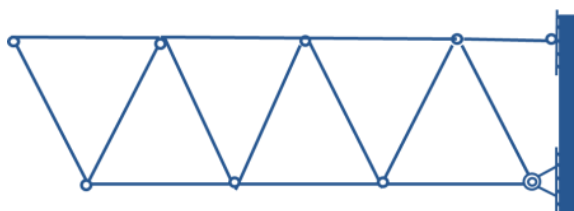


Рисунок 4 – Ферма-консоль

Следующим этапом нашего проекта было исследование поведения полученных моделей под нагрузкой, роль которой выполняли гири подвешиваемые к узлам ферм (см. фото рис. 5 – 7).

Балочная схема (простая балочная ферма однопролетная, двухопорная)

Аналитический расчет такой конструкции (рисунок 5) показал, что все стержни верхнего пояса работают на сжатие, все стержни нижнего пояса работают на растяжение. Нисходящие раскосы растянуты, восходящие – сжаты.

Эти результаты подтверждаются поведением модели, при удалении растянутых металлических стержней. Их функцию выполняют нити (леска). Поскольку нить может сопротивляться растягивающим усилиям, форма конструкции фермы сохраняется неизменной. Кроме визуального эффекта, то, что нить натянута можно ощутить, потрогав ее пальцем. Если же удалить металлический стержень, который испытывает сжатие – ферма потеряет заданную форму, так как нить не может сопротивляться сжатию.



а)



б)



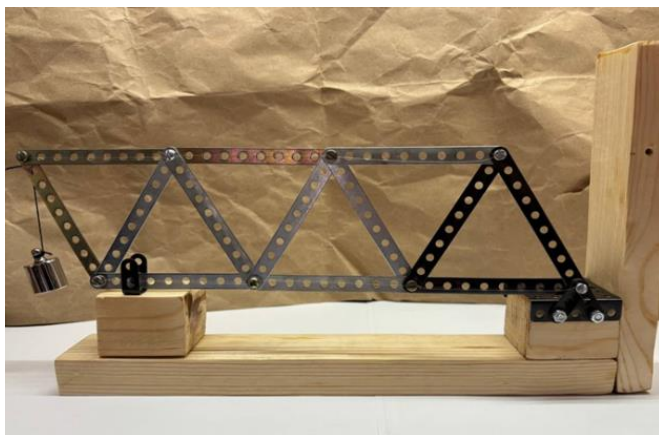
в)

Рисунок 5 – Ферма на двух опорах (под нагрузкой):

- а) модель простой балочной фермы из металлических стержней;
- б) модель простой балочной фермы, в которой часть стержней нижнего пояса заменена леской;
- в) модель простой балочной фермы, в которой часть стержней нижнего пояса и нисходящие раскосы заменены леской

Ферма с консолью

В случае, фермы с консольной частью (рисунок 6) при нагрузке, приложенной к крайнему узлу консоли, согласно расчёту, стержни верхнего пояса фермы испытывают различное напряженное состояние: над опорой растянуты, в пролете – сжаты. В стержнях нижнего пояса наблюдается обратная картина.



а)



б)

Рисунок 6 – Ферма на двух опорах с консолью (под нагрузкой):

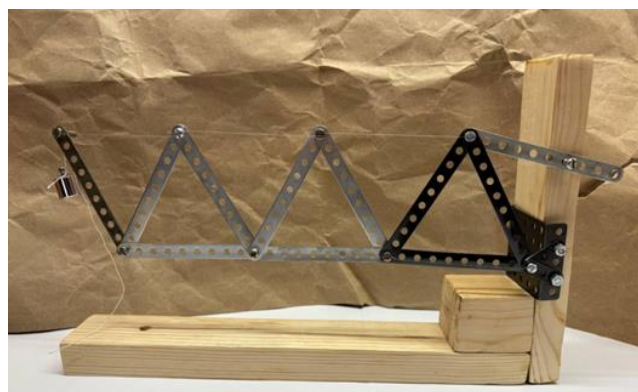
- а) модель балочной фермы с консолью из металлических стержней;
- б) модель балочной фермы с консолью из металлических стержней, в которой часть стержней верхнего пояса заменена леской

Ферма-консоль

Аналитический расчет такой конструкции (рисунок 7) показал, что все стержни верхнего пояса работают на растяжение, все стержни нижнего пояса работают на сжатия. Раскосы работают на сжатие и растяжение через один.



а)



б)

Рисунок 7 – Ферма-консоль (под нагрузкой):

- а) модель фермы-консоли из металлических стержней;
- б) модель фермы-консоли, в которой все стержни верхнего пояса заменены леской

Эти результаты также подтверждаются поведением нагруженной модели, в которой убрали металлические стержни, заменив их леской. Форма конструкции не изменилась.

Основные выводы:

- 1) Визуализация напряженного состояния подтверждает теоретические расчеты.
- 2) Тип закрепления существенно влияет на распределение усилий в стержнях фермы.
- 3) Модель позволяет наглядно увидеть слабые места конструкции.

Таким образом, можно утверждать, что веревочно-стержневая модель представляет собой весьма эффективный инструмент визуализации напряженного состояния фермы.

Представленный проект помог авторам лучше понять, почувствовать работу ферм.

В дальнейшем планируется использовать подобные модели для анализа более сложных ферм, а также продумать вопрос количественной оценки возникающих в элементах модели усилий (натурных измерений с помощью соответствующих приборов).

Предложенная модель может быть использована не только в рамках данного проекта, но и как учебное пособие для других студентов. Она позволяет проводить наглядные демонстрации на лекциях и практических занятиях, что повышает эффективность обучения и интерес студентов к предмету.

Список использованной литературы

1. Дырдина, Е. В. Основы статики сооружений: теоретическая и строительная механика для архитекторов [Электронный ресурс] : учебное пособие для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 07.03.01 Архитектура и 07.03.03 Дизайн архитектурной среды: в 2 т. / Е. В. Дырдина; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Оренбург. гос. ун-т». – Т. 1. – Электрон. текстовые дан. – Оренбург: ОГУ. – 2023. – 359 с.

ROPE-ROD MODEL OF A FLAT TRUSS

**Anastasia Vladimirovna Astionova, Alexandra Sergeevna Kaverina,
Anastasia Valentinovna Milokhina, Victoria Dmitrievna Shchedromirskaya,
undergraduate students, 1st year,**

**Elena Vasilievna Dyrkina, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of
Mechanics of Materials, Structures and Machines**

Orenburg State University

Abstract. This paper examines the operation of a flat truss under various fastening conditions and loading options. The paper describes the manufacture and application of a rope-rod model for analyzing the stress state of a flat truss under various types of fastening and loading. A comparison of the results of a full-scale experiment with calculations is given. The educational value of the project and its significance for junior students studying the operation of rod structures are shown.

Key words: model, truss, forces in truss rods, rod deformations, tension, compression, methods of deformation research.

АВТОМАТИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ: ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТОВ И 3D-ПЕЧАТИ

Волошин Константин Георгиевич, Бухтояров Дмитрий Игоревич, студенты бакалавриата 2 курса

Оренбургский государственный университет

Аннотация: Работа выполнена на кафедре механики материалов, конструкций и машин Оренбургского государственного университета **под руководством Поярковой Екатерины Васильевны**, доктора технических наук, доцента, заведующего кафедрой механики материалов, конструкций и машин. В работе представлено исследование современных тенденций, преимуществ и вызовов, связанных с интеграцией роботов и технологии 3D-печати в строительные процессы.

Ключевые слова: 3D-печать, строительные материалы, строительство, инновационные технологии, роботы.

Код и рубрика: 67.17.19 Машины, механизмы, оборудование и инструмент для бетонных и арматурных работ.

Применение аддитивных технологий, то есть 3D-печати, стало в последнее время одной из наиболее актуальных тенденций в строительстве. Если при обычном способе производства, например, стены панельного дома происходит заливка бетоном сразу всей формы, то при 3D печати она возводится постепенно, слой за слоем. Причём без необходимости установки опалубки, как потребовалось бы при монолитном строительстве [2].

Идея возведения домов с помощью примитивного прототипа 3D-принтера появилась еще более 100 лет назад в США. Первая же действительно работающая машина для быстрой заливки домов из бетона была продемонстрирована позже: 70 лет назад устройство спроектировал инженер Роберт Гилмор ЛеТорно. Попытки строить с помощью 3D-принтеров предпринимались в абсолютно разных концах света. В России же первое целиком напечатанное на 3D-принтере здание появилось в 2017 году – в подмосковном Ступине при помощи строительного принтера Apis Cor был возведен 38-метровый дом [4].

Стоит отметить, что аддитивные технологии и способы 3D печати бывают разные: лазерное плавление, спекание, стереолитография, наплавления. Следовательно, устройства принтеров тоже различны.

В строительстве используется два типа печати:

1. Метод экструзии LDM (метод осаждения жидкости), аналогичный FDM (метод пословного наплавления), но без нагрева.
2. 3DP или 3D печать сухим порошковым материалом. Данный способ аналогичен SLS (лазерному спеканию), но вместо лазера материал склеивают связующим раствором.

Метод экструзии является самый распространённым. С его помощью можно создавать отдельные строительные элементы, а также полностью возводить здание

непосредственно на участке. Второй способ применяется в основном для изготовления декоративных строительных элементов, малых архитектурных форм.

Печать осуществляется специально печатающей головкой, оснащённой шнековым экструдером и бункером для смеси. Специальная мелкозернистая смесь подаётся в бункер вручную или с помощью насоса и послойно выдавливается на участок согласно проектной документации. Таким образом формируются отдельные детали или стены дома.

Существует четыре основных вида строительного принтера:

- порталный;
- с дельтовидным приводом(трёхосевой);
- кранового типа;
- манипулятор.

Портальный строительный принтер напоминает козловой кран (рисунок 1), но вместо крюка на тросе у него ферма с печатающей головкой. Такие принтеры способны печатать отдельные детали, малые архитектурные формы, а также небольшие здания целиком, при условии, что они помещаются под аркой устройства.



Рисунок 1 – Портальный 3D-принтер [5]

Конструкция трёхосевых принтеров похожи на порталную (рисунок 2). Основой конструкции также является металлическая ферма. Но она не перемещается на рельсах, а фиксирована. Бункер с экструдером закреплены на рычагах, представляющих собой перевёрнутый штатив с телескопическими «ногами», которые закреплены на направляющих. Таким образом обеспечивается большая подвижность печатающего устройства, но ограничивается площадь печати.

Крановые принтеры напоминают башенные строительные краны (рисунок 3). Их обычно размещают внутри здания, поскольку рабочая зона такого оборудования ограничена вылетом стрелы. Однако они имеют небольшие габариты и вес, что позволяет легко транспортировать.



Рисунок 2 – Трёхосевой 3D-принтер [6]



Рисунок 3 – Крановый 3D-принтер [7]

Принтеры-манипуляторы используют роботизированную руку для перемещения печатающей головки (рисунок 4). Они мобильны, имеют большую гибкость по сравнению с оборудованием кранового типа. Но из-за своей технологичности их цена гораздо выше аналогов.

Применение аддитивной технологии при строительстве частных домов позволяет ускорить процесс возведения строения, снизить затраты и влияние человеческого фактора. Кроме этого, к безусловным плюсам строительной 3D печати стоит отнести:

1. Возможность создания уникальных дизайнерских решений, включая плавные изгибы стен.
2. Полость между внутренней и наружной стеной удаляет тепловые мосты (мостик холода).
3. Возможность прокладки коммуникаций внутри стен.
4. Создание декоративных элементов с меньшими трудозатратами.
5. Меньшее количество человек в бригаде, чем при традиционном способе строительства.

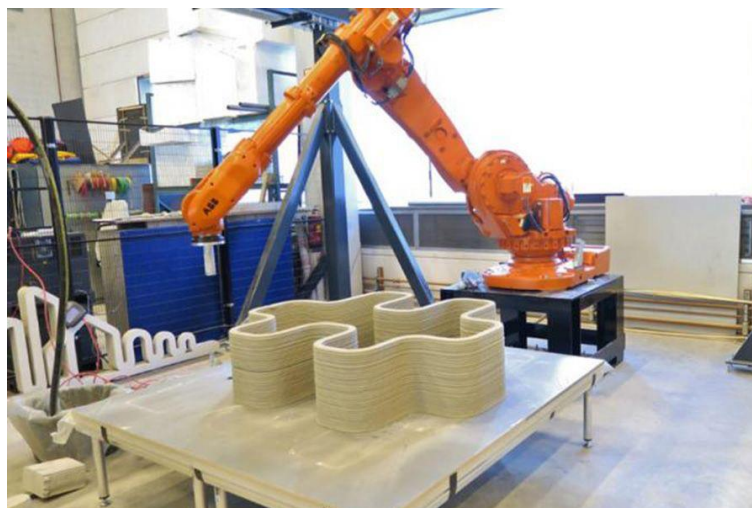


Рисунок 4 – Принтер-манипулятор [8]

Однако есть у аддитивных технологий и свои недостатки. В частности, с помощью 3D печати нельзя построить фундамент, горизонтальные плиты перекрытия. Да и стоимость первоначальных вложений в оборудование достаточно высока. Но несмотря на это, в ближайшем будущем эти технологии внесут существенные изменения в строительную отрасль.

Уже сегодня на помощь человеку, а иногда и на замену ему, приходят строительные роботы. Под роботами мы подразумеваем автоматизированные агрегаты с определенным функционалом, помогающие в выполнении тех или иных строительных работ.

Строительные роботы ускоряют и точно выполняют задачи, которые раньше требовали многочасового человеческого труда. Они могут укладывать кирпичи, возводить стены и даже создавать карты местности – все это с высокой степенью точности и безопасности [1].

Роботы-каменщики чрезвычайно полезны в строительстве зданий (рисунок 5). Устройство, опираясь на возможности искусственного интеллекта, способно самостоятельно возводить стены из кирпича. Хотя без помощи человека ему не обойтись. Робот способен самостоятельно наносить раствор и аккуратно устанавливать кирпичи в общую кладку стен. При этом робот-каменщик передвигается самостоятельно [1]. Однако в процессе работы по-прежнему необходима помощь человека-каменщика, который поможет выровнять раствор, установить анкеры и в целом проследить за работой машины.

3D-печать активно используется в строительстве для создания объектов различной сложности. Эта технология позволяет значительно сократить время строительства и снизить его стоимость. Дома, построенные с использованием строительных 3D-принтеров (рисунок 6), уже продемонстрировали свою устойчивость и долговечность.



Рисунок 5 – Робот-каменщик [9]



Рисунок 6 – Строительный 3D-принтер [10]

Дроны находят широкое применение в строительной отрасли (рисунок 7). Они используются для выполнения самых разных задач, включая мониторинг строительного процесса, инспекцию объектов и создание карт местности. Применение дронов может быть очень эффективным: при мониторинге они не нарушают технологические процессы на площадке, управляются дистанционно, меняют точки обзора [3].

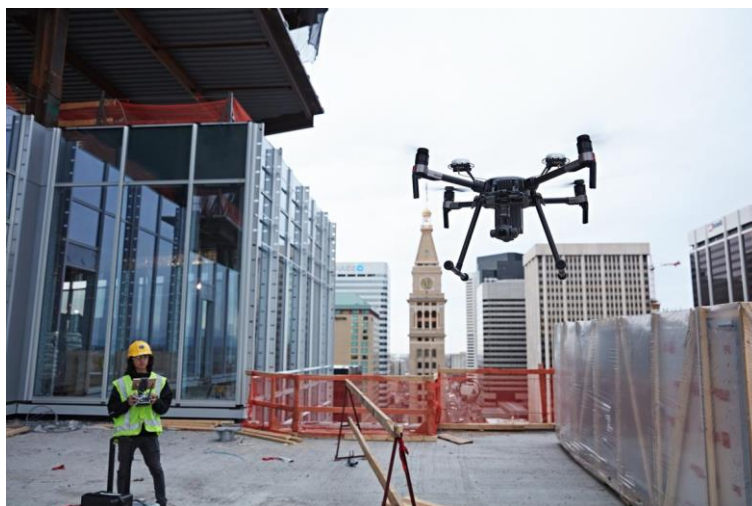


Рисунок 7 – Дрон в строительстве [11]

В то время как дроны занимаются воздушными работами, роботизированные экзоскелеты совершают революцию в наземном строительстве (рисунок 8). Эти надеваемые устройства призваны повысить силу, выносливость и безопасность человека. Потенциальные преимущества использования роботизированных экзоскелетов в строительстве заключаются в повышении производительности, снижении травм на работе и улучшении самочувствия рабочих [2].



Рисунок 8 – Экзоскелет [12]

Роботизация строительства открывает новые горизонты для инженеров и архитекторов, позволяя создавать проекты, которые раньше казались невозможными. Современные технологии позволяют сделать процесс строительства быстрее, уменьшить потребность в человеческих ресурсах, снизить количество травм. Использование автоматизации в строительстве – это залог успеха в развитии строительной отрасли.

Список использованной литературы

1. Кладова, Т. О. Использование роботов в современном строительстве / Т. О. Кладова. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2019. – № 26 (264). – С. 107-109. – URL: <https://moluch.ru/archive/264/61231/> (дата обращения: 06.05.2025).
2. Булгаков, А. Г. Автоматизация строительного производства: учеб. Пособие для вузов / ЮРГУ (НПИ) / А. Г. Булгаков, В. А. Воробьев, С. И. Евтушенко [и др.]. – Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ (НПИ), 2006. – 268 с.
3. Тихонов, А. Ф. Автоматизация и роботизация технологических процессов и машин в строительстве / А.Ф. Тихонов. – Москва: Изд-во Ассоциации строительных вузов (АСВ), 2005. – 456 с.
4. Компания Apis Cor возвела 3D-печатный дом в Ступине – Режим доступа: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/the-company-apis-cor-built-a-3dprinted-house-in-stupino> (дата обращения: 28.05.2025).
5. Портальный 3D-принтер. – Режим доступа: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/building-a-3d-printer-amtspetsavia-presented-at-the-exhibition-bauma20> (дата обращения: 28.05.2025).
6. Трёхосевой 3D-принтер. – Режим доступа: <https://www.trikvetra.ru/blog/tehnologii/ofisnaya-tehnika/top-5-interesneyshikh-modeley-stroitelnykh-3d-printerov/?currency=GBP> (дата обращения: 28.05.2025).
7. Крановый 3D-принтер. – Режим доступа: <https://3dtoday.ru/blogs/levontiy/building-the-printer-is-alive> (дата обращения: 28.05.2025).

8. Принтер манипулятор. – Режим доступа: <https://academycrafts.ru/info/articles/pechat-na-3-d-printere/> (дата обращения: 28.05.2025).
9. Робот-каменщик. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=Xe5v0OT7iCk> (дата обращения: 28.05.2025).
10. Строительный 3D-принтер. – Режим доступа: <https://vk.com/public180903710> (дата обращения: 28.05.2025).
11. Дрон. – Режим доступа: <https://yandex.ru/maps/org/stavropol-geodeziya/101272011727/?ll=41.965283%2C45.030215&z=16> (дата обращения: 28.05.2025).
12. Экзоскелет. – Режим доступа: <https://3dtoday.ru/blogs/top3d-shop/ekzoskelety-suitx-opyt-ispolzovaniya-v-realnyx-usloviyax> (дата обращения: 28.05.2025).

AUTOMATION OF CONSTRUCTION PROCESSES: THE USE OF ROBOTS AND 3D PRINTING

Voloshin Konstantin Georgievich, Bukhtoyarov Dmitry Igorevich, 2nd year undergraduate students

Orenburg State University

Abstract: *The work was performed at the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines of Orenburg State University under the supervision of Ekaterina Vasilyevna Poyarkova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines. The paper presents a study of current trends, advantages and challenges associated with the integration of robots and 3D printing technology into construction processes.*

Keywords: *3D printing, building materials, construction, innovative technologies, works.*

ТЕНСЕГРИТИ В РАЗРАБОТКЕ УНИКАЛЬНЫХ ПЕШЕХОДНЫХ МОСТОВ И ПЕРЕХОДОВ

Гизатуллина Элиза Рэстамовна, Манилкина Виктория Александровна,
Струков Тимофей Дмитриевич, студенты бакалавриата, 2 курс

Оренбургский государственный университет

Аннотация. В работе рассматриваются принципы тенсегрити для создания инновационных и эстетически привлекательных пешеходных мостов. Проведен анализ существующих концептуальных проектов и реализованных сооружений с элементами тенсегрити, выделены особенности их конструктивного решения и отмечены основные преимущества и недостатки использования конструкций «тенсегрити» в мостостроении с рассмотрением вопросов обеспечения жесткости и безопасности при динамических нагрузках.

Работа выполнена на кафедре механики материалов, конструкции и машин Оренбургского государственного университета **под руководством доцента кафедры Дырдиной Елены Васильевны**, кандидата технических наук, доцента.

Ключевые слова: тенсегрити, пешеходный мост, конструкция, архитектура.

Код и рубрика: 67.07.00 Архитектура

В современном мире архитектура и инженерия стремятся создавать не только функциональные, но и эстетически привлекательные, экологически устойчивые сооружения. Особенно это актуально для пешеходных мостов и переходов, которые являются неотъемлемой частью городской среды и играют важную роль в обеспечении безопасности и комфорта пешеходов. В условиях стремительного роста городов и увеличения нагрузки на транспортную инфраструктуру, поиск инновационных конструктивных решений становится первоочередной задачей. В этом контексте технологии тенсегрити представляют собой перспективное направление, позволяющее создавать легкие, прочные и визуально выразительные мостовые конструкции, гармонично вписывающиеся в архитектурный облик города.

История применения принципов тенсегрити в строительстве началась в середине XX века с работ Ричарда Бакминстера Фуллера, который в 1962 году запатентовал конструкции, основанные на принципе соединения элементов, работающих на растяжение и сжатие. Эти конструкции доказали свою эффективность благодаря высокому соотношению прочности и легкости, а также способности равномерно распределять нагрузки. С тех пор тенсегрити нашли применение в различных областях – от архитектуры до авиации и мостостроения, включая уникальные пешеходные мосты и переходы, которые благодаря этим технологиям приобретают новые формы и функциональные возможности.

На рисунке 1 представлен двадцатигранный модуль тенсегрити, разработанный Б. Фуллером в 1949 году. Эта модель иллюстрирует базовые принципы формирования

конструкций тенсегрити – сочетание жестких стержней и натянутых элементов, что обеспечивает устойчивость и прочность всей системы при минимальном весе.

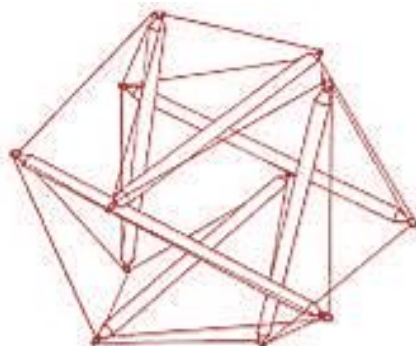


Рисунок 1 – Двадцатигранный модуль «тенсегрити» Б. Фуллера (1949 г.)

На сегодняшний день существует несколько общепринятых определений понятия «тенсегрити» (от англ. *tension* – напряжение, растяжение, и *integrity* – целостность). Впервые концепция была формализована Ричардом Бакминстером Фуллером в 1962 году в его патенте «Конструкции с соединением путем натяжения» (англ. *Tensile Integrity Structures*) [1]. Фуллер охарактеризовал тенсегрити как системы, представляющие собой «острова напряжения в океане сжатия», где жесткие элементы работают на сжатие, а гибкие – на растяжение, создавая устойчивую и саморегулируемую структуру.

По определению Роберта Мотро, одного из ведущих исследователей в области тенсегрити, эта система представляет собой структурное целое, находящееся в статическом равновесии, и состоящее из взаимосвязанных элементов, работающих на сжатие и растяжение [2]. Такая взаимозависимость обеспечивает устойчивость конструкции за счет перераспределения внутренних сил.

Ричард Скелтон предложил более точную формулировку, определив тенсегрити как устойчивую конструкцию, состоящую из жестких стержней, соединенных в узлах с элементами, работающими исключительно на растяжение. При этом сжимаемые элементы не контактируют друг с другом, что позволяет минимизировать вес конструкции и повысить ее прочностные характеристики [3].

Таким образом, тенсегрити представляет собой структурную систему, обеспечивающую свою целостность и устойчивость за счет баланса сил растяжения и сжатия, где элементы сжатия дискретны и не соприкасаются, а элементы растяжения образуют непрерывную сеть. Это позволяет добиться высокой эффективности использования материала и оптимального распределения нагрузок по всей конструкции.

Ключевым преимуществом тенсегрити является значительное снижение массы конструкции при сохранении высокой прочности и жесткости. Жесткие элементы (распорки) воспринимают только сжимающие нагрузки, а гибкие элементы (кабели, ванты) работают исключительно на растяжение. Полезные нагрузки равномерно распределяются по всей структуре, что обеспечивает эффективное использование материалов и высокое отношение прочность/масса. Это качество делает тенсегрити

особенно перспективными для применения в легких архитектурных и инженерных сооружениях, включая пешеходные мосты и переходы [4].

Для наглядного понимания принципа работы конструкций тенсегрити можно провести аналогию с воздушным шаром, наполненным воздухом. Давление воздуха внутри шара растягивает оболочку, которая, в свою очередь, сопротивляется этому растяжению за счет собственной прочности. Баланс между внутренним давлением и натяжением оболочки обеспечивает сохранение формы шара. В конструкциях тенсегрити аналогичную роль выполняют кабели, которые воспринимают растягивающие усилия, в то время как жесткие стержни функционируют как внутренние элементы, воспринимающие сжимающие нагрузки. При этом стержни не соприкасаются друг с другом, а соединены системой натянутых связей, что обеспечивает устойчивость и прочность всей системы, а также создает характерный визуальный эффект «парящих» распорок (floating struts).

Конструкции тенсегрити можно рассматривать как подкласс подвесных или вантовых систем. Однако их принципиальное отличие заключается в том, что растягивающие усилия не передаются на опоры или анкера, как в традиционных подвесных конструкциях, а замыкаются внутри самой структуры за счет взаимного уравновешивания напряжений.

Стабильность и жесткость систем тенсегрити обеспечиваются механизмом самоуравновешивания и самонапряжения, который формируется взаимосвязью растянутых и сжатых элементов. Важной особенностью таких конструкций является то, что сжимаемые элементы не контактируют друг с другом и не передают сжимающие усилия взаимно, а растягивающие элементы образуют непрерывную сеть, распределяющую нагрузки. Принцип самонапряжения позволяет создавать сложные геометрические формы, которые трудно или невозможно реализовать традиционными методами строительства.

На рисунке 2 представлен пример применения принципов тенсегрити в виде пешеходного моста.



Рисунок 2 – Пешеходный мост тенсегрити

Иллюстрация демонстрирует легкость и прозрачность конструкции, характерные для тенсегрити, а также визуальный эффект «парящих» распорок, обеспечивающих устойчивость моста при минимальном весе элементов. Такой подход позволяет создавать архитектурно выразительные и функциональные сооружения, отвечающие современным требованиям городской среды.

Ниже представлен обзор наиболее известных пешеходных мостов и переходов в мире, выполненных с использованием технологии тенсегрити. Эти сооружения демонстрируют уникальные инженерные решения, сочетающие легкость, прочность и эстетическую выразительность.

Одним из первых и наиболее знаменитых примеров является *Пешеходный мост Мики Бу (Miki Bridge)* в Японии, построенный в 1992 году. Этот мост выделяется своей легкой и прозрачной конструкцией, в которой использованы элементы тенсегрити для обеспечения устойчивости при минимальном весе. Его уникальная форма и использование натяжных элементов позволяют создавать большие пролеты без массивных опор.

Мост Клэйтон (Clayton Bridge) в Великобритании, введенный в эксплуатацию в 2005 году, также является примером применения тенсегрити в пешеходном мостостроении. Особенностью конструкции является использование кабельных систем, которые равномерно распределяют нагрузки, обеспечивая высокую жесткость при минимальном расходе материала.

В США известен *Мост Коннектикут (Connecticut Bridge)*, заверченный в 2010 году. Этот мост отличается инновационной системой натяжения, позволяющей изменять форму и жесткость конструкции в зависимости от внешних условий, что значительно повышает долговечность и безопасность.

Пешеходный мост Курилпа Bridge в Австралии, открытый в 2009 году, является одним из крупнейших тенсегрити мостов в мире. Его конструкция состоит из 250 стальных стержней и 580 кабелей, обеспечивающих устойчивость и легкость. Этот мост отличается динамичным дизайном и интеграцией с городской средой, служа примером успешного сочетания инженерного искусства и архитектуры.

В Германии находится *Мост Tensegrity Bridge* в городе Хамбург, построенный в 2013 году. Он демонстрирует применение модульных тенсегрити элементов, что облегчает монтаж и обслуживание, а также позволяет адаптировать конструкцию под различные условия эксплуатации.

В Швейцарии был построен *Мост Ponte Tensegrity* в 2015 году, который выделяется своей инновационной системой натяжения с использованием современных композитных материалов. Это позволило снизить вес конструкции и повысить ее коррозионную стойкость.

В Южной Корее реализован проект *Пешеходного моста Seoul Tensegrity Walkway* в 2017 году, отличающийся легкостью конструкции и высокой эстетической ценностью. Мост использует принцип самонапряжения, что обеспечивает его устойчивость при значительных ветровых нагрузках.

В Канаде построен *Мост Vancouver Tensegrity Footbridge* в 2018 году, который является примером интеграции тенсегрити с устойчивыми технологиями. В конструкции применены экологичные материалы и энергоэффективные решения, что соответствует современным требованиям к городской инфраструктуре.

Эти примеры демонстрируют, что техника тенсегрити позволяет создавать мосты и переходы с уникальными архитектурными формами, повышенной прочностью и сниженным весом, что открывает новые возможности в развитии городской среды и инженерии.

Несмотря на очевидные преимущества технологии тенсегрити, её применение в строительстве пешеходных мостов и переходов остается относительно редким явлением. Это обусловлено комплексом факторов, среди которых ключевыми являются высокая сложность инженерных расчётов, необходимость обеспечения точности изготовления и монтажа элементов конструкции, а также ограниченный опыт эксплуатации подобных систем в масштабах мостостроения. Кроме того, вопросы долговечности материалов и их поведения в условиях длительной эксплуатации и воздействия внешних факторов требуют дополнительного изучения и подтверждения.

Целью данного исследования являлся анализ потенциала использования принципов тенсегрити для создания инновационных, функциональных и эстетически привлекательных пешеходных мостов и переходов. В работе предполагалось выявить основные технические и конструктивные проблемы, ограничивающие широкое внедрение данной технологии, а также предложить пути их решения с учётом современных материалов и методов проектирования.

В рамках исследования рассматривались вопросы обеспечения устойчивости и жёсткости конструкций тенсегрити при динамических нагрузках, характерных для пешеходных мостов: колебаниях от шагов пешеходов, ветровых воздействиях и температурных деформациях. Особое внимание уделяется анализу архитектурных и эстетических качеств таких сооружений, включая их лёгкость, прозрачность и гармоничную интеграцию в окружающую среду, что является важным аспектом современного градостроительства.

Тенсегрити представляет собой инновационную структурную концепцию, основанную на сбалансированном взаимодействии элементов, работающих на сжатие (жёсткие стержни) и элементы, работающие на растяжение (кабели, ванты). Эта технология позволяет создавать конструкции с высокой прочностью при минимальном весе, что особенно ценно в мостостроении, где снижение массы напрямую влияет на экономичность и долговечность сооружений. Более того, принцип самонапряжения и самоуравновешивания внутренних сил обеспечивает устойчивость конструкции без необходимости применения массивных опор или анкерных креплений, что расширяет возможности применения тенсегрити в сложных инженерных условиях [2, 3].

Современные исследования показывают, что применение тенсегрити в мостостроении способствует значительному снижению расхода строительных материалов и повышению энергетической эффективности сооружений. В частности, использование высокопрочных композитных материалов и инновационных методов натяжения кабелей позволяет увеличить долговечность и снизить эксплуатационные затраты. При этом сложность расчётов компенсируется развитием цифровых технологий, включая методы конечных элементов и оптимизационные алгоритмы, что делает проектирование таких конструкций более доступным и точным [4, 5].

Важно отметить, что несмотря на значительный прогресс, внедрение тенсегрити в массовое строительство требует дальнейших исследований, направленных на стандартизацию проектных решений, разработку методик контроля качества и

мониторинга состояния конструкций в процессе эксплуатации. Также необходима интеграция данных технологий в существующие строительные нормы и правила, что будет способствовать более широкому принятию и применению тенсегрити в инженерной практике [6].

Таким образом, конструкции тенсегрити обладают высоким потенциалом для дальнейшего развития в области мостостроения и архитектуры. Их уникальные свойства (высокая прочность при малом весе, способность к саморегулированию напряжений и эстетическая выразительность) делают их перспективным решением для создания инновационных пешеходных переходов, отвечающих современным требованиям устойчивого развития и функциональной интеграции в городскую среду. Ожидается, что с развитием материаловедения и цифровых технологий использование тенсегрити будет значительно расширяться, способствуя появлению новых архитектурно-инженерных решений [7, 8].

На рисунке 3 представлен концептуальный проект пешеходного моста будущего, подвешенного к фасаду здания с использованием принципов тенсегрити, что демонстрирует возможности интеграции легких и прочных конструкций в плотную городскую среду [8] для повышения функциональности городского пространства.



Рисунок 3 – Пешеходный мост будущего, подвешенный к зданию

В заключение, технологии тенсегрити представляют собой перспективное направление в развитии инженерных и архитектурных решений для пешеходных мостов и переходов. Их уникальная способность обеспечивать высокую прочность при минимальном весе (рисунок 4), а также возможность самонапряжения и

самоуравновешивания внутренних сил создают условия для реализации инновационных конструкций с улучшенными эксплуатационными характеристиками и эстетическими качествами. Несмотря на существующие сложности, связанные с проектированием, производством и внедрением таких систем, современные исследования и практический опыт подтверждают их потенциал для широкого применения в городской инфраструктуре. Перспективы дальнейшего развития тесно связаны с совершенствованием методов расчёта [9, 10], использованием новых материалов и интеграцией цифровых технологий в процессы проектирования и мониторинга конструкций. Таким образом, внедрение тенсегрити в мостостроение способствует не только повышению технической эффективности сооружений, но и формированию нового архитектурного облика городов будущего.



Рисунок 4 – Макет моста из модулей «тенсегрити», выполненный авторами статьи

Список использованных источников

1. Fuller, R. B. Tensile Integrity Structures : патент США № 3,063,521. – 1962.
2. Motro, R. Tensegrity: Structural Systems for the Future. – Oxford : Butterworth-Heinemann. – 2003. – 248 p.
3. Skelton R. E., de Oliveira M. C. Tensegrity Systems. – New York : Springer. – 2009. – 276 с.
4. Paul C., Skelton R. E. Tensegrity Structures in Architectural and Engineering Applications // International Journal of Space Structures. – 2010. – Vol. 25, №3. – Pp. 123–134.
5. Fraternali F., Amendola A. Optimization and Control of Tensegrity Structures: A Review // Engineering Structures. – 2015. – Vol. 97. – Pp. 10-22.
6. Tibert G. Deployable Tensegrity Structures for Space Applications // International Journal of Space Structures. – 2014. – Vol. 29, № 1. – Pp. 3-13.
7. Adriaenssens S., Block P., Veenendaal D., Williams C. Structural Engineering: The Art and Science of Innovative Structures. – London : Routledge. – 2014. – 320 p.

8. Paul C., Skelton R. E. Advances in Tensegrity Structures: Materials, Analysis, and Applications // Journal of Structural Engineering. – 2019. – Vol. 145, № 6. – Article 04019024. – DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002285.

9. Дырдина, Е. В. Основы статики сооружений: теоретическая и строительная механика для архитекторов [Электронный ресурс]: учебное пособие для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 07.03.01 Архитектура и 07.03.03 Дизайн архитектурной среды: в 2 т. / Е. В. Дырдина; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Оренбург. гос. ун-т». – Т. 1. – Оренбург : ОГУ, 2023. – ISBN 978-5-7410-3145-2. – 359 с. – Загл. с тит. экрана.

10. Овчинников И.Г., Кокодеев А.В. Самонапряженные конструкции «тенсегрити» / Сборник трудов 15-ой Международной научно-технической конференции: «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии», 30 июня – 3 июля, 2015 г. / ТулГУ, г. Тула. – 2015. – С. 80-81. – [Self-stressed structures - «Tensegriti» / Tula, 2015].

TENSEGRITY IN THE DEVELOPMENT OF UNIQUE PEDESTRIAN BRIDGES AND CROSSINGS

Gizatullina Eliza Rastamovna, Manilkina Victoria Aleksandrovna

Orenburg State University

Abstract. *The paper considers the principles of tensegrity for the creation of innovative and aesthetically attractive pedestrian bridges. The analysis of existing conceptual projects and implemented structures with tensegrity elements is carried out, the features of their design solution are highlighted and the main advantages and disadvantages of using tensegrity structures in bridge construction are noted with consideration of issues of ensuring rigidity and safety under dynamic loads.*

The work was carried out at the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines of the Orenburg State University under the supervision of Associate Professor of the Department Elena Vasilievna Dyrkina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

Keywords: *tensegrity, pedestrian bridge, structure, architecture.*

ВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ КАК ПРИМЕР КОНСТРУКТИВНОГО ВЫРАЖЕНИЯ АРХИТЕКТУРНОЙ ИДЕИ

Дусаева Аделина Рустамовна, Джазыкбаева Виктория Ильдаровна, студенты
бакалавриата, 2 курс

Дырдина Елена Васильевна, кандидат технических наук, доцент кафедры
механики материалов, конструкций и машин

Оренбургский государственный университет

Аннотация. В данной работе исследуются вантовые системы, которые дают возможность реализовывать сложные и оригинальные архитектурные идеи, обеспечивая свободу в формировании форм и обеспечивая перекрытие больших пролетов. Проведен анализ известных архитектурных проектов, использующих вантовые системы, выявлены их конструктивные особенности и влияние на эстетический вид зданий

Ключевые слова: вантовые конструкции, большепролетные перекрытия, статический расчет вантовых систем.

Код и рубрика: 67.00.00 Строительство. Архитектура.

Современные подходы к расчету строительных конструкций основываются на методе конечных элементов и использовании сложных программных систем для вычислений на компьютерах. Тем не менее, архитектор, создавая конструкцию, должен осознавать, как она функционирует, и чувствовать взаимодействие сил. В этом контексте незаменимыми инструментами остаются методы графической статики, которые на протяжении многих веков успешно использовались архитекторами, но в последние годы, к сожалению, были несколько забыты (аналогично тому, как устные вычисления отошли на второй план с появлением калькуляторов). Компьютерные программы для расчета строительных конструкций работают как «черный ящик»: пользователь вводит исходные данные и получает результат, но критически оценить этот результат невозможно без понимания принципов работы конструкции

Современная архитектура сталкивается с множеством вызовов, связанных с необходимостью создания функциональных, эстетически привлекательных и устойчивых зданий. В этом контексте вантовые системы становятся важным инструментом для архитекторов и инженеров. Их способность перекрывать большие пролеты и создавать сложные формы открывает новые горизонты для архитектурного дизайна. Однако использование этих конструкций требует глубокого понимания их статических характеристик и поведения под действием различных нагрузок.

Вантовые конструкции, состоящие из натянутых стержней (вантов), позволяют не только достигать больших пролетов, но и формировать уникальные архитектурные образы. Они представляют собой синтез эстетики и инженерной мысли, где каждая линия и форма имеют свое конструктивное обоснование. Тем не менее, проектирование таких систем требует от архитектора не только творческого подхода, но и технических знаний о поведении материалов и силовых взаимодействиях.

К сожалению, с развитием компьютерных технологий и программного обеспечения для расчета строительных конструкций, традиционные методы графической статики стали забываться. Архитекторы могут полагаться на результаты программных расчетов, не всегда понимая физику процессов, происходящих в конструкции. Это может привести к ошибкам в проектировании и недостаточной надежности построенных объектов.

Таким образом, актуальность исследования вантовых систем заключается в необходимости объединения современных вычислительных методов с традиционными графическими подходами. Это позволит архитекторам более глубоко понимать динамику своих проектов и создавать более безопасные и эффективные конструкции. Проведение сравнительного анализа различных конструктивных схем вантовых мостов поможет выявить их сильные и слабые стороны, а также даст возможность оценить влияние этих решений на общую архитектурную концепцию.

В данной работе показано, как вантовые системы могут служить не только средством достижения инженерной эффективности, но и важным элементом архитектурного выражения, способствуя созданию уникальных пространств и форм.

Цель данного исследования – провести сравнительный анализ конструктивных схем вантовых мостов и показать эффективность методов графической статики на этапах разработки концепции конструктивного решения.

Ниже рассмотрены конструктивные схемы вантовых мостов и возможности графических методов анализа их статической работы.

Виадук Мийо (Франция) – самый необычный мост Франции

В качестве примера для анализа в данной работе рассмотрен виадук Мийо во Франции – одно из самых выдающихся вантовых сооружений современности. Общая длина моста составляет 2460 м, при этом длина основного пролёта достигает 342 м. Виадук пересекает долину реки Тарн на высоте порядка 270 м над уровнем земли, что делает дорожное полотно одним из самых высоко расположенных в мире. Ширина проезжей части составляет 32 м, включая четыре полосы движения и две резервные полосы, что обеспечивает высокую пропускную способность и безопасность движения.

Конструктивной особенностью моста являются семь пилонов высотой от 77 м до 343 м, при этом пилон P_2 является самым высоким в мире, превышая высоту Эйфелевой башни (324 м). Высота пилонов значительно превосходит аналогичные показатели других вантовых мостов, таких как виадук Кохерталь в Германии (181 м) и виадук Тюлля во Франции (141 м). Общая высота пилона с опорой P_2 достигает 343 м, что установило мировой рекорд для вантовых мостов.

Строительство виадука Мийо велось с 2001 по 2004 год и включало сложные инженерные решения, направленные на обеспечение максимальной устойчивости и долговечности конструкции. Дорожное полотно моста состоит из преднапряжённого бетона и стальных элементов, а вантовая система включает 154 стальных каната, натянутых под разными углами для равномерного распределения нагрузок. Максимальная нагрузка, которую способен воспринимать каждый из канатов, составляет несколько сотен тонн, что позволяет мосту выдерживать интенсивное движение и воздействие ветровых нагрузок.

Данный объект является наглядным примером использования вантовых систем для создания крупных пролётов с минимальным количеством опор, что позволяет архитектурно выразительно интегрировать сооружение в природный ландшафт. Высокотехнологичные конструктивные решения, применённые при проектировании виадука Мийо, демонстрируют эффективность сочетания инженерного расчёта с архитектурным замыслом, что соответствует современным тенденциям в проектировании сложных строительных конструкций.

Таким образом, анализ конструктивных особенностей виадука Мийо подтверждает, что вантовые системы являются эффективным инструментом реализации сложных архитектурных идей, обеспечивая одновременно высокую несущую способность, устойчивость и эстетическую выразительность. Это подчёркивает необходимость интеграции современных вычислительных методов расчёта с творческим подходом архитектора при проектировании подобных сооружений.

Русский мост (Россия) – символ Владивостока

Русский мост, открытый в 2012 году, является символом города Владивостока и крупнейшим вантовым мостом России. Мост соединяет материковую часть с островом Русский, пересекает пролив Восточный Босфор и имеет ключевое значение для транспортной инфраструктуры региона, существенно улучшая доступность острова и способствуя развитию Приморского края.

Общая длина моста с учётом эстакад составляет 3100 м, при этом длина центрального пролёта достигает 1104 м – это самый длинный центральный пролёт среди вантовых мостов в мире. Ширина моста составляет 29,5 м, из которых 23,8 м занимает проезжая часть, рассчитанная на четыре полосы движения (по две в каждом направлении). Высота моста над уровнем моря составляет около 70 м, что обеспечивает свободное прохождение морских судов под пролётом.

Конструктивной особенностью моста являются два пилона высотой 324 м, что ставит их в число самых высоких опорных сооружений вантовых мостов мирового уровня, уступая по высоте лишь пилонам виадука Мийо во Франции. Пилоны имеют А-образную форму, что требует индивидуальной разработки форм опалубки, так как стандартные решения были признаны нецелесообразными. Для бетонирования использовались специальные самоподъёмные опалубки высотой 4,5 м, что позволило повысить качество и существенно сократить сроки строительства. Переходы между типами секций осуществлялись на высотах 66,26 м и 191,48 м, что обеспечивало плавность геометрии. Фундамент опор выполнен на сваях, забитых на глубину до 77 м под землёй и 120 м с островной стороны.

Центральный пролёт моста имеет аэродинамическое поперечное сечение, оптимизированное для устойчивости к сильным ветровым нагрузкам, характерным для региона. Максимальная скорость ветра в шторм достигает 36 м/с (130 км/ч), а волны могут достигать высоты до 6 м. Толщина ледяного покрова зимой может достигать 70 см, что также учитывалось при проектировании конструкции.

Вантовая система состоит из 168 кабельных стоек, выполненных из параллельных стальных жил диаметром 15,7 мм каждая. Длина кабельных стяжек варьируется от 135,77 м до 579,83 м. Кабели изготовлены из оцинкованных проволок и

защищены оболочками из полиэтилена высокой плотности (HDPE), устойчивого к ультрафиолетовому излучению и агрессивным климатическим условиям. Такая конструкция обеспечивает долговечность и надёжность элементов вантовой системы.

Конструкция пролёта выполнена из крупногабаритных сборных секций, которые доставлялись на монтажный участок баржами и поднимались кранами на высоту около 76 м. Для соединения элементов использовались сварные соединения и высокопрочные болты, обеспечивающие необходимую жёсткость и прочность конструкции.

Русский мост является примером успешного применения современных инженерных и архитектурных решений в сложных природно-климатических условиях, включая суровые зимы, сильные ветровые и сейсмические нагрузки. Его строительство стоило порядка 1,1 миллиарда долларов США и стало важным этапом развития транспортной сети Владивостока.

Таким образом, Русский мост демонстрирует возможности вантовых систем для создания крупнопролётных, надёжных и эстетически выразительных инженерных сооружений, интегрирующих высокотехнологичные методы расчёта и материалы с архитектурным замыслом. Его параметры — рекордная длина пролёта, высота пилонов, сложная геометрия и адаптация к климатическим условиям — делают его одним из ключевых объектов современного мостостроения.

Оба моста (виадук Мийо во Франции, и Русский мост в России) иллюстрируют ключевые преимущества вантовых систем: возможность создавать крупные пролёты с минимальной опорной структурой, обеспечивая при этом высокую несущую способность и устойчивость к динамическим нагрузкам. Кроме того, они демонстрируют, как инженерные решения могут служить выразительным архитектурным образам, формируя уникальные пространственные и визуальные эффекты.

Мост Единства (Мексика) соединяет Монтеррей

Мост Единства (Puente de la Unidad), расположенный в Монтеррее в Мексике, представляет собой важное инженерное сооружение и ключевой транспортный объект агломерации. Построенный в 2003 году, этот вантовый мост пересекает реку Рио-Санта-Катарина, соединяя муниципалитеты Монтеррей и Сан-Педро-Гарса-Гарсия. Общая длина моста составляет 304 метра, что соответствует длине единственного пролёта — 304 м, что является значительным показателем для вантовых мостов с одним пилоном.

Конструктивно мост выполнен по схеме с одним центральным пилоном, который служит единственной опорой для всей конструкции. Пилон поддерживает систему стальных тросов, расположенных в характерной «гармоничной» конфигурации, придающей сооружению высокую визуальную привлекательность и обеспечивающей равномерное распределение нагрузок. Такое расположение вантовых канатов, расходящихся радиально от пилона, формирует аркообразный силуэт, напоминающий классические арки, что одновременно способствует эффективной передаче сил и эстетической выразительности.

Высота пилона составляет порядка 160 м, что позволяет обеспечивать необходимый угол натяжения стальных канатов и минимизировать прогибы пролёта под воздействием эксплуатационных нагрузок. Используемые тросы выполнены из

высокопрочной стали с антикоррозийным покрытием, что гарантирует долговечность конструкции в условиях местного климата. Ширина проезжей части моста составляет около 20 м, что обеспечивает двухполосное движение в каждом направлении, способствуя значительному снижению транспортных заторов в агломерации.

Мост Единства играет ключевую роль в транспортной инфраструктуре региона, обеспечивая жизненно важное сообщение между центральными районами Монтеррея и прилегающими муниципалитетами. Его конструкция позволяет выдерживать интенсивные автомобильные нагрузки и обладает высокой устойчивостью к ветровым и сейсмическим воздействиям, что особенно важно для данного региона с учётом сейсмической активности.

Таким образом, мост Единства является примером эффективного применения вантовых систем с одним пилоном для создания крупного пролёта, сочетающего техническую надёжность и архитектурную выразительность. Его конструктивные особенности (уникальное расположение канатов, оптимальное использование материалов и продуманная геометрия) обеспечивают высокую эксплуатационную эффективность и устойчивость сооружения в долгосрочной перспективе.

Вантовые мосты, обладая уникальной способностью перекрывать значительные пролёты при относительно небольшом количестве опор, становятся всё более востребованными в современной архитектуре и строительстве. Их конструктивные особенности позволяют не только решать сложнейшие инженерные задачи, но и создавать выразительные архитектурные образы, которые гармонично вписываются в окружающий ландшафт. Для понимания потенциала и специфики таких сооружений важно рассмотреть их ключевые технические параметры, которые влияют на функциональность, устойчивость и визуальное восприятие.

В данной работе анализируются три выдающихся примера вантовых мостов – виадук Мийо во Франции, мост Единства в Мексике и Русский мост во Владивостоке. Каждый из них представляет собой значимый этап развития мостостроения в своём регионе и отражает особенности инженерных подходов и архитектурных решений. Ниже приведена сравнительная таблица 1, которая систематизирует основные характеристики этих объектов, включая длину, высоту пилонов, тип крепления и другие важные параметры каждого сооружения. Данный сравнительный анализ позволяет выявить ключевые отличия и сходства в их архитектурных решениях, масштабах и инженерных характеристиках, что способствует более глубокому осмыслению возможностей вантовых систем в реализации крупных инфраструктурных проектов.

Вантовые системы являются эффективным инструментом реализации сложных архитектурных идей, позволяя создавать уникальные формы и перекрывать значительные пролёты, что расширяет возможности архитектурного дизайна. Несмотря на широкое применение современных вычислительных программ, графическая статика остаётся незаменимым методом для глубокого понимания принципов работы вантовых конструкций и их взаимодействия, особенно на этапах концептуального проектирования.

Таблица 1 – Технические характеристики и сравнительный анализ вантовых мостов

Наименование характеристики	Виадук Мийо	Пуэнте-де-ла-Унидад	Русский мост
Год постройки, год	2004	2003	2012
Общая длина, м	2460	304	1104
Длина основного пролета, м	342	304	1104
Высота пилонов, м	343	44.8	324
Пересечение	находится над равниной, пересекает долину Тарн	Река Сантьяго, Мексика	Пролив Босфор Восточный
Система крепления	Веер	Арфа	Гибрид
Высота полотна над поверхностью, м	270	13.5	70
Область применения	автомобильный		
Тип конструкции	Вантовый		
Страна, место расположения	Франция, Мийо - Крессель	Мексика	Россия, Владивосток
Архитектор	Норман Фостер	Дэниел Тассин	Влидскинол Птров

Сравнительный анализ конструктивных схем вантовых мостов позволяет выявить преимущества различных вариантов реализации и оценить их влияние на архитектурный облик и техническую эффективность сооружений. Интеграция традиционных методов графической статики с современными вычислительными подходами способствует созданию более надёжных и эстетически выразительных конструкций, что особенно важно в условиях сложных инженерных задач.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой комплексных методик анализа и проектирования вантовых систем, основанных на сочетании графических и численных методов. Такой подход позволит точнее учитывать динамические нагрузки и эксплуатационные условия, что актуально для повышения безопасности и долговечности мостов и зданий, особенно в сейсмически активных регионах.

Список использованной литературы

1. Дырдина, Е. В. Основы статики сооружений: теоретическая и строительная механика для архитекторов [Электронный ресурс] : учебное пособие для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 07.03.01 Архитектура и 07.03.03 Дизайн архитектурной среды: в 2 т. / Е. В. Дырдина; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации,

Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Оренбург. гос. унив». – Т. 1. – Оренбург : ОГУ. – 2023. – ISBN 978-5-7410-3145-2. – 359 с.

2. Горелов, С. Н. Результаты численных исследований вантового пешеходного моста через реку Урал / С. Н. Горелов, В. И. Жаданов, М. А. Аркаев // Вестник ОГУ. – 2012. – № 9 (145). – С.177-183.

3. Кривошапко, С.Н. Вантовые конструкции общественных и промышленных зданий. / С.Н. Кривошапко // Строительство и реконструкция. – 2019. – №1. – С.23-47. – Режим доступа: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-81-1-23-47> (дата обращения 01.06.2025).

CABLE-STAYED SYSTEMS AS AN EXAMPLE OF CONSTRUCTIVE EXPRESSION OF AN ARCHITECTURAL IDEA

**Dusaeva Adelina Rustamovna, Dzhazykbaeva Victoria Ildarovna, undergraduate
students, 2nd year**

**Dyrdina Elena Vasilievna, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department
of Mechanics of Materials, Structures and Machines**

Orenburg State University

Abstract. *This paper examines cable-stayed systems that make it possible to implement complex and original architectural ideas, providing freedom in the formation of forms and ensuring the overlap of large spans. An analysis of well-known architectural projects using cable-stayed systems is carried out, their design features and impact on the aesthetic appearance of buildings are identified*

Keywords: *cable-stayed structures, large-span floors, static calculation of cable-stayed systems.*

КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ФЕРМ

**Пояркова Екатерина Васильевна, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой механики материалов, конструкций и машин,
Добрынина Дарья Владимировна, Кульбулекова Рита Панкириевна,
студенты бакалавриата, 2 курс**

Оренбургский государственный университет

Аннотация. *Статья посвящена исследованию применения современных технологий в создании эффективных конструкций для вертикальных ферм. В условиях роста городского населения и ограниченности земельных ресурсов вертикальное фермерство становится перспективным решением для обеспечения продовольственной безопасности. Особое внимание уделяется применению цифровых технологий проектирования и моделирования для оптимизации конструкций, снижения материалоемкости и повышения урожайности. Исследуются различные типы вертикальных ферм, технологии выращивания (гидропоника, аэропоника, аквапоника) и используемые материалы. Проводится анализ рынка вертикального земледелия и перспектив развития данного направления.*

Ключевые слова: *вертикальное фермерство, вертикальные фермы, конструкции, инженерный анализ, оптимизация, цифровые технологии, гидропоника, аэропоника, аквапоника, материалы, продовольственная безопасность*

Код и рубрика: 81.95.01 *Общие вопросы технической эстетики, художественного конструирования, дизайна*

В условиях растущего городского населения и ограниченности земельных ресурсов, вертикальное фермерство становится перспективным направлением обеспечения продовольственной безопасности. Вертикальные фермы, позволяющие выращивать сельскохозяйственные культуры в многоярусных конструкциях, предлагают эффективное решение для оптимизации использования пространства и ресурсов. Однако, для широкого внедрения вертикального фермерства необходимо разрабатывать надёжные и экономически выгодные конструкции.

Инженерный анализ и оптимизация механических параметров вертикальных ферм играют ключевую роль в обеспечении их устойчивости, долговечности и эффективности. Применение современных методов проектирования и моделирования, в том числе цифровых технологий, позволяет оптимизировать конструкции, снижать материалоемкость и повышать урожайность. Изучение нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации, и выбор оптимальных материалов являются важными задачами для обеспечения безопасной и надёжной работы вертикальных ферм.

Первые экспериментальные вертикальные фермы появились в 1960-х годах. В России активное развитие данного направления началось лишь в последние десятилетия.

Априори, вертикальная ферма представляет собой многоярусную систему, предназначенную для выращивания растений в закрытых помещениях, таких как производственные цеха, складские комплексы, подвалы и другие подходящие пространства. Такая система позволяет создавать и поддерживать контролируемую среду, оптимизированную для конкретных видов растений [1]. Основным преимуществом вертикальных ферм является эффективное использование доступного пространства, снижение потребления воды и ресурсов, а также повышение урожайности в условиях ограниченной городской среды. Также благодаря внедрению систем управления микроклиматом в мировой практике и распространяется применение такого вертикального земледелия, позволяющего получать больше продукции с меньшей площади выращивания, повышать качество (безопасность) продукции и выращивать урожай круглый год, вне зависимости от условий окружающей среды [21].

Вместе с тем, существуют различные типы вертикальных ферм, отличающиеся конструктивными особенностями и применяемыми технологиями. К ним относятся: стеллажные, подвесные, гидропонные, аэропонные, индивидуальные фермы для домашнего использования, контейнерные, интегрированные и многоуровневые системы. Индивидуальные вертикальные фермы, предназначенные для домашнего использования, могут быть установлены в жилых помещениях для выращивания овощей, зелени и трав [4, 20].

В вертикальных фермах применяются различные технологии выращивания растений, включая гидропонику, аэропонику и аквапонику [5], описания методов которых представлено ниже.

Гидропоника – это метод выращивания растений без использования почвы, при котором растения получают все необходимые питательные вещества из питательного раствора в точном соответствии с их потребностями, что сложно достичь при традиционном почвенном выращивании. Термин «гидропоника» происходит от греческих слов ὕδωρ (вода) и πόνοϛ (работа), обозначающих «рабочий раствор» [6].

Аэропоника – это метод выращивания растений, при котором корни находятся в воздушной среде и периодически опрыскиваются питательным раствором с помощью специальных форсунок [9]. Этот метод позволяет избежать использования не только почвы, но и каких-либо субстратов.

Аквапоника – это комбинированный метод, объединяющий выращивание рыбы и растений в рециркуляционной системе. В данной системе используются природные бактериальные циклы для преобразования отходов жизнедеятельности рыб в питательные вещества для растений. Аквапоника является экологически чистым методом, использующим преимущества аквакультуры и гидропоники без необходимости добавления химических удобрений и применения фильтрации [2]. В аквапонической системе растения и рыбы выращиваются в симбиозе: продукты жизнедеятельности рыб служат питанием для растений, а растения, в свою очередь, фильтруют воду, возвращаемую рыбам.

В работе [10] отражено, что многие исследования промышленного гидропонного, аэропонного и аквапонного производства показали потенциальную положительную роль этих новых технологий в устойчивой продовольственной безопасности. Эти системы сельскохозяйственного земледелия могут стать одной из устойчивых альтернатив для производства различных видов продукции, требующей меньше воды, меньше удобрений и меньше места, что увеличит урожайность на единицу занимаемой площади.

Вертикальное фермерство – молодое направление сельского хозяйства, которое начало активно развиваться с 2011 года. Такие производства усиленно применяют инновационные технологии. С помощью интернета вещей и искусственного интеллекта на подобных предприятиях полностью автоматизированы полив, система освещения, внесение удобрений и сбор урожая. Информация о мировых лидерах таких производств представлена в таблице 1, а историческая ретроспектива этой отрасли представлена в [11].

Сити-фермы могут различаться по формату и быть выполнены в разных архитектурных жанрах – в виде вертикальных полей, башен, мобильных контейнеров и т. п. Согласно данным комплексного исследования Агентства инноваций Москвы [15], вертикальные фермы способны давать в 10 раз больше урожая, чем можно получить в традиционных тепличных комплексах. До 98% российских сити-ферм работает с зелеными и овощными культурами. Лишь малая часть таких предприятий занимается выращиванием ягод, для хорошего урожая которых нужны большие площади и насыщенный полив. Еще реже на сити-фермах производят грибы, так как они требуют специального температурного режима, отсутствия освещения и высокого уровня влажности в помещении. На рисунке 1 приведены примеры конструкций вертикальных ферм.

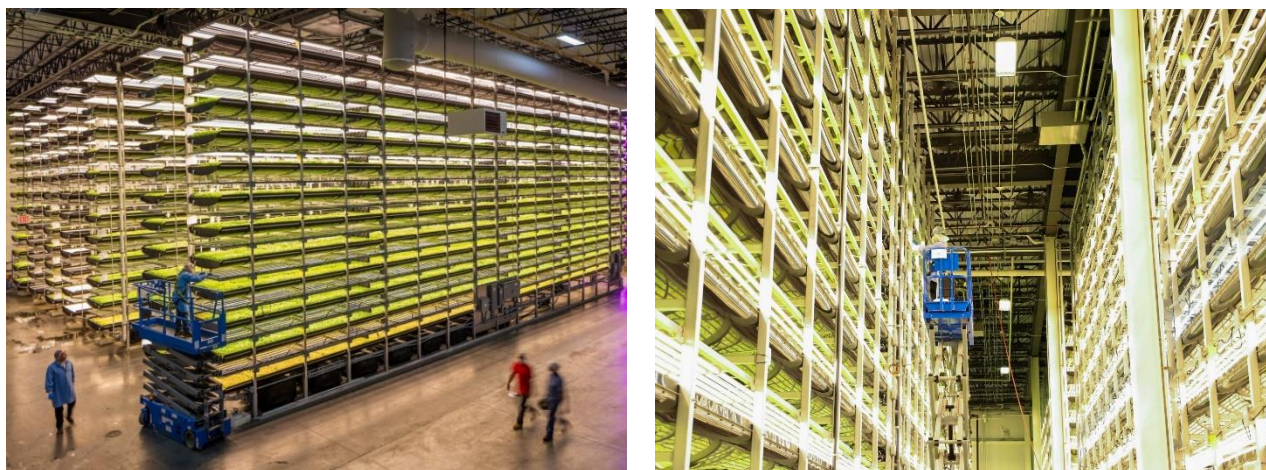


Рисунок 1 – Конструкции вертикальных ферм Aerofarms [11]

Таблица 1 – Мировые лидеры в вертикальном фермерстве

№	Название компании, год запуска производства	Страна	Технология выращивания	Ассортимент	Применяемые инновационные технологии	Основные материалы конструкций	Примечания
1	2	3	4	5	6	7	8
1	РусЭко 2018	Россия	Вертикальная ферма* с посевной площадью 67 тыс. кв. м и перспективной производственной мощностью 50 т в день			Сталь, композитные материалы, стекло	*По обоим показателям эта сити-ферма крупнейшая в мире
2	AeroFarms, 2004	США	Аэропоника	Листовые овощи, травы	Замкнутый цикл водоснабжения, LED освещение, машинное зрение	Алюминий, сталь	Одна из крупнейших вертикальных ферм в мире
3	Plenty, 2014	США	Гидропоника	Листовые овощи, клубника	Роботизированная система сбора урожая, оптимизация микро-климата	Сталь, композитные материалы	Используют роботов и машинное обучение для оптимизации процессов
4	Infarm, 2013	Германия	Гидропоника	Зелень, травы, микрозелень	Модульные фермы, интегрированные в магазины и рестораны	Сталь, пластик	Фермы расположены непосредственно в магазинах и ресторанах
5	AppHarvest, 2018	США	Гидропоника	Томаты, огурцы	Автоматизированные системы управления, солнечная энергия	Сталь, стекло	Занимаются выращиванием томатов и огурцов в крупных масштабах
6	Bowery Farming, 2015	США	Гидропоника	Листовые овощи, травы	Собственная операционная система BoweryOS, LED освещение	Сталь, алюминий	Инвестируют в разработку новых технологий и расширение производства
7	Sky Greens, 2012	Сингапур	Вертикальная ферма	Овощи, зелень	Вращающиеся модули, гравитационный полив	Алюминий	Уникальная конструкция, оптимизированная для тропического климата
8	Agricool, 2015	Франция	Гидропоника	Клубника в контейнерах	Автоматизированный контроль климата, LED освещение	Переработанные морские контейнеры	Используют переоборудованные контейнеры для создания компактных ферм
9	Nona, 2016	Новая Зеландия	Вертикальная ферма	Салаты, травы	Возобновляемые источники энергии, замкнутый цикл водоснабжения	Сталь, алюминий	Применяет только возобновляемые источники энергии

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
10	Sanan Sino Science, 2015	Китай	Вертикальная ферма	Листовые овощи, травы	LED освещение, оптимизация питательного раствора	Сталь, алюминий	Крупнейшая вертикальная ферма в Азии
11	Jones Food Company, 2017	Велико-британия	Вертикальная ферма	Листовые овощи, травы	Автоматизированная система выращивания, замкнутый цикл водоснабжения	Сталь, алюминий	Одна из самых передовых вертикальных ферм в Европе
12	Vertical Field, 2015	Израиль	Гидропоника	Зелень, травы	Модульные вертикальные фермы, интеграция в городскую среду	Неизвестно	Фокус на локальном производстве и снижении транспортных расходов
13	Future Crops, 2016	Нидерланды	Гидропоника	Зелень, травы, овощи	LED освещение, оптимизированный микроклимат	Сталь	Используют данные для оптимизации урожайности и вкуса
14	Fifth Season, 2016	США	Вертикальная ферма	Листовые овощи, травы	Автоматизированный сбор урожая, робототехника	Сталь, алюминий	Фокус на поставке свежих продуктов в течение 24 часов после сбора урожая
15	ComCrop, 2013	Сингапур	Гидропоника	Овощи, зелень	Интеграция с городской инфраструктурой (крыши зданий), переработка отходов	Сталь, бетон	Располагаются на крышах городских зданий
16	маджай фудс, 2018	Индия	Вертикальная ферма	Салаты, травы, овощи	Оптимизированные системы водоснабжения и освещения для тропического климата	Сталь, алюминий	Вертикальная ферма в Индии
17	Урожайный Край, 2017	Россия	Вертикальная ферма	Салаты, травы, ягоды	Автоматизированные системы управления, использование отечественных комплектующих	Металлоконструкции, пластик	Российский производитель вертикальных ферм
18	Sayna Eco, 2022	Россия	Вертикальная ферма	Салаты, зелень, овощи	Автоматизированные системы, LED освещение	Металлоконструкции, пластик	Современное производство вертикальных ферм
19	G'n Grow, 2018	Дубай (ОАЭ)	Вертикальная ферма	Зелень премиальных сегментов, ягоды	Автоматизированные системы управления	Металлоконструкции, пластик	Крупнейший производитель вертикальных ферм в Арабских Эмиратах

Тренд на вертикальные тепличные комплексы, представляющие из себя многоярусные теплицы с передовыми инженерными, климатическими и информационно-технологическими решениями, зародился в Японии и Сингапуре, где высокая плотность населения и такой способ выращивания растений активно поддерживают власти. Примерно в то же время первые сити-фермы стали появляться и в США [11].

Размер рынка вертикального земледелия оценивался в 6,2 млрд долларов США в 2023 году. В [12] прогнозировалось, что отрасль рынка вертикального земледелия вырастет с 7,48 млрд долларов США в 2024 году до 33,5 млрд долларов США к 2032 году, демонстрируя среднегодовой темп роста (CAGR) в 20,62% в течение прогнозируемого периода (2024 - 2032). Растущее население расширяет масштаб рынка, а вертикальное земледелие набирает популярность из-за его более высокой урожайности, чем традиционное земледелие, что является ключевыми рыночными драйверами, усиливающими рост рынка.

На рисунке 2 представлены тенденции рынка вертикального земледелия. А на рисунке 3 представлен рынок вертикального фермерства по механизму роста и по регионам мира (однако, в этом анализе рынка по политическим причинам, к сожалению, нет молодого развивающегося игрока – России).

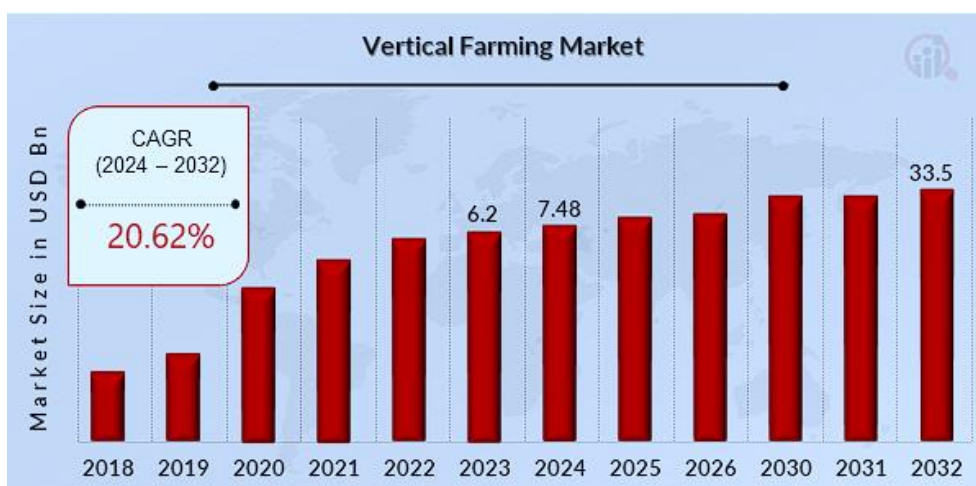


Рисунок 2 – Тенденции рынка вертикального земледелия [12]

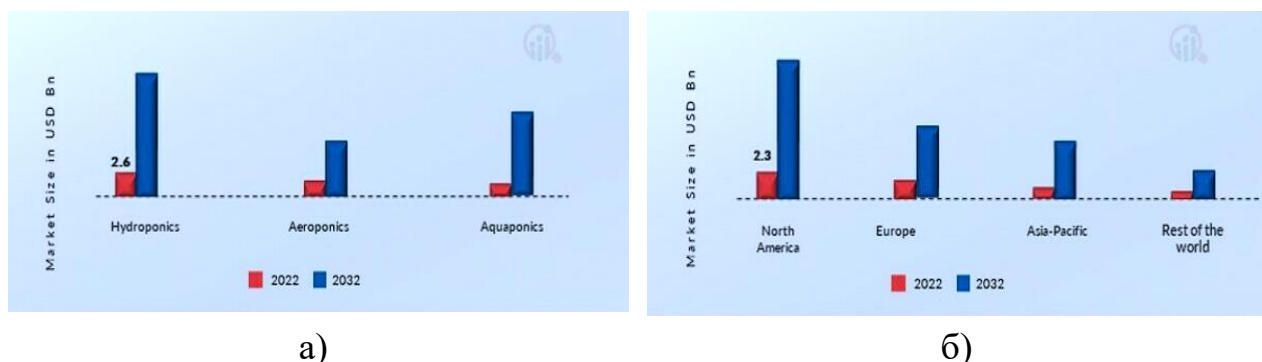


Рисунок 3 – Рынок вертикального фермерства, млрд долл. США [12]:
а) механизм роста, 2022 и 2032 гг.; б) доля рынка вертикального фермерства по регионам в 2022 году

Вместе с тем нужно отметить, что с в последние годы на рынок такого вертикального производства продолжают активно выходить стартапы во всем мире. Например, согласно [11] аграрных стартапов в этом сегменте еще в 2022 году. В России было немного – менее 20 компаний, большая часть из них выбрали площадки для размещения бизнеса в столице. На этот период в Москве работало порядка 13 технологических компаний, которые производили в вертикальных фермах почти 400 т свежей зелени в год.

Подобные успешные стартапы в это же время активно появлялись и в других странах. Например, в США возникла компания Aqua Garden [14], которая продемонстрировала универсальность аэропонных систем Tower Farm от компании Agrotonomy Corp., специализирующейся на решениях для аэропонного вертикального земледелия для коммерческого и частного рынков [13]. Компания основана в 2018 году в США. Изначально она называлась Ibiza Farms и базировалась в Испании, но в 2018 году была переименована в Agrotonomy и реализовала проекты в более чем 50 странах, создав аэропонные фермы в Европе, Азии, Африке и Северной и Южной Америке.

На рисунке 4 представлены некоторые типовые башенные аэропонные конструкции вертикального земледелия компании Agrotonomy Corp., а на рисунке 5 решения стартап-компании Aqua Garden (аквапонической фермы), которая стала заниматься выращиванием судака с использованием питательных веществ, которые производит рыба, для выращивания свежих кулинарных трав и салата. Эта современная крытая ферма Tower Farm является домом для Wobbly Walleye Fresh Produce и обслуживает продуктовые магазины, рестораны и оптовиков в своем районе. Сама ферма расположена в переоборудованном здании для хранения картофеля с отличной вентиляцией и колодезной водой. Она достаточно хорошо изолирована, что позволяет эффективно контролировать окружающую среду в холодные месяцы.



Рисунок 4 – Конструкции вертикального земледелия с аэропонными башнями компании Agrotonomy Corp. [13]



Рисунок 5 – Особенности конструктивных решений аквапонической фермы [14]

Переходя от рассмотрения промышленного применения вертикальных ферм к более локализованным формам, следует отметить тенденцию к распространению технологий вертикального земледелия в «домашних» и институциональных условиях. В дополнение к крупномасштабным агропромышленным комплексам, вертикальные фермы всё чаще интегрируются в жилые пространства и образовательные учреждения, становясь важным элементом современного городского ландшафта.

Компактные вертикальные фермы, предназначенные для домашнего использования, предоставляют возможность выращивания свежих овощей, зелени и трав непосредственно в квартирах, на балконах или в кухонных зонах. Конструктивные решения таких систем характеризуются модульностью, что позволяет адаптировать их к различным планировкам и пространствам. Широкий спектр доступных технологий культивирования обеспечивает возможность выбора оптимального подхода в соответствии с индивидуальными потребностями и предпочтениями потребителей [16, 17].

Растущая популярность домашних и институциональных вертикальных ферм [23] отражает повышенный интерес к принципам здорового питания, экологической устойчивости и осознанного потребления (см. рисунки 6, 7, 8). Кроме того, интеграция вертикальных ферм в образовательные учреждения способствует вовлечению учащихся в процесс выращивания растений и формированию понимания основ агрокультуры. Эти фермы становятся инструментом для обучения студентов основам агрономии, биологии и инженерии, а также платформой для проведения экспериментов в области растениеводства и разработки инновационных технологий земледелия.

В рамках институциональных проектов, таких как образовательные фермы и исследовательские лаборатории, вертикальное земледелие используется для проведения экспериментов, обучения новым технологиям и демонстрации возможностей устойчивого производства продуктов питания. Инженерные решения [19], применяемые в домашних и институциональных вертикальных фермах, сочетают в себе простоту и доступность с требованиями к выбору оптимальных материалов, систем освещения и полива, обеспечивающих эффективное поддержание роста растений.



Рисунок 6 – Фермерство на крышах [16, 17]

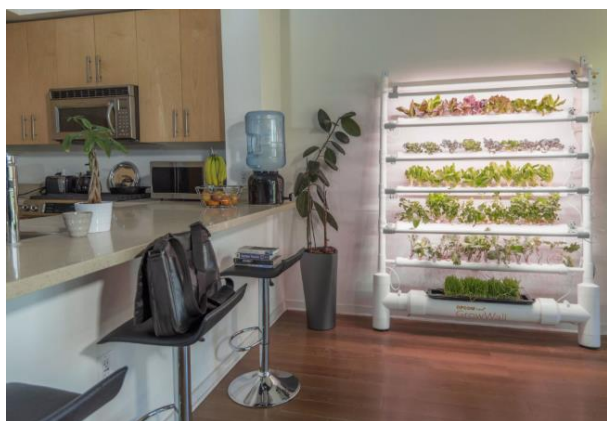


Рисунок 7 – Конструкции «домашних» ферм [18]

При этом необходимо отметить, что каждая из вертикальных ферм – это сложное инженерное сооружение, расчет и проектирование которого требует профессиональных знаний и навыков. Для этих целей необходимо привлекать профессионалов и использовать профильные расчетные комплексы. Только в этом случае можно гарантировать надежность, безопасность и длительный срок эксплуатации этих инновационных конструкций.

Выбор оптимальных материалов и технологий, а также грамотное проектирование и монтаж являются необходимыми условиями для обеспечения эффективной и безопасной эксплуатации вертикальных ферм, независимо от их масштаба и назначения.

Использование современных материалов в конструкциях вертикальных ферм является ключевым фактором обеспечения их долговечности, устойчивости и безопасности. Традиционные материалы, такие как сталь, могут быть подвержены коррозии, что приводит к снижению несущей способности конструкций и необходимости проведения регулярного обслуживания. Альтернативные материалы, такие как алюминиевые сплавы и композитные материалы на основе полимеров, обладают повышенной коррозионной стойкостью и меньшим весом, что снижает нагрузку на несущие элементы конструкции и фундамент (например, применение алюминиевых профилей,

предлагаемых компаний Allprofile.ru) [1]. Выбор оптимального материала основывается на анализе механических свойств материала, стойкости к воздействию окружающей среды (влажность, температура, ультрафиолетовое излучение) и экономической целесообразности.



Рисунок 8 – Общественные* и институциональные** фермы [15, 20, 23]

***Примечание:**

* Общественные фермы – частная или городская территория, предоставленная группе людей для выращивания культур.

** Институциональные фермы – территория для ведения сельского хозяйства, отведённая на территориях институтов (напр. школ, университетов, больниц, тюрем).

При проектировании вертикальных ферм большинство производителей применяют статический анализ и расчет на устойчивость конструкций для обеспечения безопасности и надежности. В зависимости от расположения и

климатических условий также могут учитываться расчеты ветровых нагрузок и сейсмической устойчивости.

Несмотря на то, что вертикальные фермы промышленного масштаба требуют профессионального подхода к проектированию и расчетам, все больше энтузиастов рассматривают возможность создания таких систем в личных целях. Прежде чем приступать к самостоятельной установке вертикальной фермы в жилом помещении, необходимо тщательно оценить потенциальные нагрузки и прочностные характеристики существующих конструкций. Важно учитывать, какие виды продукции планируется выращивать, в каком количестве и каким образом конструкция фермы будет интегрирована в интерьер.

С целью обеспечения безопасности и долговечности домашней вертикальной фермы необходимо правильно выбрать материалы и технологии, соответствующие предполагаемым нагрузкам и условиям эксплуатации. Недооценка прочности перекрытий или неправильный выбор материалов может привести к деформациям, повреждениям и даже обрушению конструкции. Поэтому, даже в случае создания небольших домашних ферм, рекомендуется проконсультироваться со специалистами, которые смогут оценить риски и предложить оптимальные решения для обеспечения безопасности жилья.

Для создания вертикальных ферм в домашних условиях часто используются полимерные трубы, пластиковые лотки, а также элементы из нержавеющей стали. При выборе конструктивных элементов следует учитывать следующие факторы:

- материал и конструкция стеллажей и рам, поскольку они вносят существенный вклад в общий вес системы;
- массу субстрата и контейнеров для растений, зависящих от типа используемого субстрата (например, кокосового волокна, перлита) и объема контейнеров;
- общий вес растений, который определяется размером и количеством выращиваемых культур;
- вес питательного раствора в гидропонных системах.

При проектировании домашней вертикальной фермы необходимо учитывать тип и состояние пола, а также его несущую способность. Пренебрежение этими факторами может привести к повреждению перекрытий и снижению безопасности жилого помещения.

Ниже, в таблице 2, представлен анализ различных материалов и конструкций для создания домашней вертикальной фермы, а также оценка их прочности и соответствия требованиям безопасности.

Задача, стоящая перед авторами настоящей статьи, была такой: предварительно спроектировать вертикальную стеллажную ферму домашнего использования для выращивания зелени и салатов (и, возможно, клубники). Подобрать наилучшую технологию выращивания растений. Предполагаемая вертикальная ферма размерами (высота 1600 мм, ширина 800 мм, глубина 200 мм) необходимо предусмотреть 7-8 или больше ярусов. Оценить преимущества и недостатки каждой конструкции (из различных материалов).

Таблица 2 – Сравнение стеллажных вертикальных ферм (для домашнего применения) из разных материалов

Параметры		Дерево (Сосна)	Пластик (ПВХ)	Металл (Алюминий)
1		2	3	4
Вес конструкции с учетом крепежных элементов (болты, уголки, клей), кг		~15-20	~10-15	~12-18
		зависит от толщины, профиля и конструкции		
Вес растений (с учетом влажного грунта), кг				
30 стандартных горшочков зелени и приправ (средний вес горшочка с грунтом и растением ~0.5 кг)		15		
30 стандартных горшочков салатов (средний вес горшочка с грунтом и растением ~0.7 кг)		21		
20 горшочков (или контейнеров) клубники, земляники (средний вес горшочка с грунтом и растением ~1 кг)		20		
10 стандартных горшков для мини-томатов (средний вес горшочка с грунтом и растением ~1.5 кг)		15		
Общий вес(дополнительно) земли или субстрата (оценка), кг		~5	~3	~4
		зависит от конструкции, поддонов		
Общая ориентировочная нагрузка на конструкцию, кг		86-91	74-79	78-83
Преимущества	экологичность	высокая	низкая (производство и утилизация)	средняя (возможность переработки)
	Легкость	средняя	очень высокая	средняя
	влагостойкость	низкая (требуется обработки)	высокая	высокая
	простота сборки	средняя (требуется инструментов)	высокая (легко соединяется)	средняя (требуется инструментов)
	коррозионная стойкость	низкая (требуется обработки)	высокая	высокая
	долговечность	средняя (при правильной обработке)	средняя	средняя (при правильной обработке)
	жесткость конструкции	средняя	низкая (требуется дополнительных опор)	высокая
	возможность создания сложных форм	средняя	высокая	средняя (требуется специального оборудования)
	эстетичный вид (для определенных интерьеров)	высокая	низкая	средняя

Продолжение таблицы 2

1		2	3	4
Недостатки	подверженность гниению и плесени	высокая (без обработки)	отсутствует	отсутствует
	большой вес	средняя	низкая	средняя
	сложная сборка сложных конструкций	средняя (требуется опыта)	низкая	высокая (требуется специальных навыков)
	деформация под нагрузкой	средняя (зависит от толщины)	высокая (требуется дополнительных опор)	низкая
	стоимость	низкая	средняя	высокая
	необходимость использования специальных инструментов	низкая	низкая	высокая
	высокая сложность обработки	средняя	низкая	высокая

Выбор материала для домашней вертикальной фермы – важный шаг, влияющий на безопасность, долговечность и удобство использования конструкции. Традиционное дерево, такое как сосна, отличается экологичностью и эстетичным видом, однако подвержено гниению и плесени без должной обработки, что может представлять угрозу для здоровья. Пластик (ПВХ) – легкий и влагостойкий материал, но его экологичность оставляет желать лучшего, а недостаточная жесткость требует дополнительных опор. Алюминий, в свою очередь, обладает высокой коррозионной стойкостью и жесткостью, но требует специального оборудования для создания сложных форм, что усложняет процесс сборки и увеличивает стоимость.

При создании домашней вертикальной фермы следует учитывать не только выбор материала, но и особенности конструкции. Важно обеспечить устойчивость и надежность, чтобы избежать обрушения под весом растений и грунта. Необходимо также учитывать нагрузку на перекрытия, особенно если ферма размещается в квартире. Важно соблюдать правила электробезопасности при использовании систем освещения и полива, а также обеспечивать хорошую вентиляцию для предотвращения образования плесени и грибка.

Обладателям домашних вертикальных ферм следует не забывать о регулярном уходе за растениями, контроле влажности и температуры. Важно также следить за состоянием конструкции и своевременно устранять любые повреждения. При использовании химических удобрений и средств защиты растений необходимо соблюдать меры предосторожности, чтобы избежать отравления. Необходимо помнить, что правильно спроектированная и установленная вертикальная ферма может стать не только источником свежей зелени и овощей, но и украшением интерьера, однако неправильный подход может привести к проблемам с безопасностью и здоровьем.

Список использованных источников

1. Give the Gift of Year-Round Gardening CISION PRWeb. – Режим доступа: https://www.prweb.com/releases/give_the_gift_of_year_round_gardening (дата обращения 23.05.2025).
2. Аквапоника Flora Growing – Режим доступа: <https://floragrowing.com/ru/encyclopedia/akvaponika> (дата обращения 25.05.2025).
3. Вертикальные фермы будущего будут строить из дерева Сити Фермер. – Режим доступа: <https://city-farmer.ru/novosti/nauka-i-tehnologii/vertikalnye-fermy-budushhego-budut-stroit-iz-dereva/> (дата обращения 24.05.2025).
4. Вертикальные фермы. Своё Фермерство. – Режим доступа: <https://svoefermerstvo.ru/ag-rowiki/tehnowiki/vertikalnye-fermy> (дата обращения 24.05.2025).
5. Выше и выше : московские новости. – Режим доступа: <https://www.mn.ru/long/vyshe-i-vyshe> (дата обращения 24.05.2025).
6. Гидропоника: ее преимущества и в чем ее особенности. – Режим доступа: <https://www.promgidro-ponica.ru/chtotakoegidroponika> (дата обращения 25.05.2025).
7. Кто такой гровер. – Режим доступа: <https://grow.in.ua/blog/technology/kto-takoy-grover> (дата обращения 25.05.2025).
8. Сити-ферма. Революция в растениеводстве (НПК АГРО СИТИ). – Режим доступа: https://npkagrocity.ru/blog/article_3/ (дата обращения 23.05.2025).
9. Что такое аэропоника? ГидроНом. – Режим доступа: <https://gidronom.ru/uroki/uroki-nachinaiushchego/937-cto-takoe-aeroponika.html> (дата обращения 24.05.2025).
10. Shrouf, Ali Hydroponics, Aeroponic and Aquaponic as Compared with Conventional Farming / Ali Shrouf // American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences. – 2017. – 27(1) – Pp. 247-255.
11. Грядки растут вверх. Вертикальные фермы расширяют экспансию в регионы. – Режим доступа: <https://www.agroinvestor.ru/markets/article/39141-gryadki-rastut-vverkh-vertikalnye-fermy-rasshiryayut-ekspansiyu-v-regiony/> (дата обращения 04.06.2025).
12. Отчет об исследовании рынка вертикального земледелия. Информация по компонентам (компоненты орошения, освещение, датчики, климат-контроль, строительные материалы, стеклянные теплицы, пластиковые теплицы), по структуре (вертикальные фермы на базе зданий, вертикальные фермы на базе контейнеров), по механизму роста (гидропоника, аэропоника, аквапоника) и по регионам (Северная Америка, Европа, Азиатско-Тихоокеанский регион и остальной мир) – прогноз рынка до 2032 года. – Режим доступа: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/vertical-farming-market-2779> (дата обращения 04.06.2025).
13. Сайт производителя аэропонных вертикальных ферм компании Agrotonomy Corp. – Режим доступа: <https://agrotonomy.com/> (дата обращения 25.05.2025).

14. When aquaponics meets hydroponics (Когда аквапоника встречается с гидропоникой). – Режим доступа: <https://agrotonomy.com/when-aquaponics-meets-hydroponics/> (дата обращения 23.05.2025).
15. Вертикальные фермы: развитие в мире и Москве : отчет исследования (сентябрь 2022): ГБУ «Агентство инноваций города Москвы». – Режим доступа: https://portal.inno.msk.ru/uploads/agency-sites/analytics/research/Vertical+Farming_AIM_2022.pdf/ (дата обращения 23.05.2025).
16. Вертикальные фермы: мировой опыт и уроки для будущего. – Режим доступа: https://dzen.ru/a/ZR_BiuBp4wYDg5o5 (дата обращения 24.05.2025).
17. Сити-фермерство в России: сервис по подбору бизнеса «с нуля». – Режим доступа: <https://svoefermerstvo.ru/services/biznes-s-nulya/city-fermerstvo> (дата обращения 24.05.2025).
18. Сайт производителя гидропонного оборудования Auxgrow. – Режим доступа: <https://auxgrow.com/ru/vertical-farming-at-home-2/> (дата обращения 29.05.2025).
19. Бикташев, А.И. Городские агрофермы как новый тип общественного пространства: совмещение производственного и средообразующего аспектов / А.И. Бикташев, А.И. Коломина, И.В. Краснобаев // Известия КазГАСУ. – 2019. – №1 (47). – С. 46-54.
20. Коваль, Н. В. Инновационные технологии строительства вертикальных ферм в урбанистических условиях / Н. В. Коваль, Д. А. Протопопова // Молодой исследователь Дона. – 2021. – №1 (28). – С. 62-67.
21. Николаева, Е. В. Применение цифровых технологий в работе вертикальных ферм / Е. В. Николаева // Вестник науки. – 2023. – №10 (67). – С. 514-525.
22. Создание вертикальных ферм на стенах школ. – Режим доступа: <https://active-region.ru/sozdanie-vertikalnyh-ferm-na-stenah-shkol/> (дата обращения 29.05.2025).
23. Эскобар, Х. П. Здания вертикальных ферм в умных городах / Х. П. Эскобар, А. А. Сандоваль, П. М. Биензи, Х. Д. Саласар // Системные технологии. – 2020. – №1 (34). – С. 73-76.
24. Насырова, Ф.Ш. Вертикальные фермы в проектах жилых зданий современных архитектурных бюро / Ф. Ш. Насырова // Наука, образование и экспериментальное проектирование. – 2020. – №1. – С.394-397.

DESIGN SOLUTIONS AND TECHNOLOGIES FOR VERTICAL FARMS

Poyarkova Ekaterina Vasilievna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines

Dobrynina Darya Vladimirovna, Kulbulekova Rita Pankirievna, undergraduate students, 2nd year

Abstract. The article is devoted to the study of the application of modern technologies in the creation of effective designs for vertical farms. In the context of urban population growth and limited land resources, vertical farming is becoming a promising solution for ensuring food security. Particular attention is paid to the use of digital design and modeling technologies to optimize designs, reduce material intensity and increase yields. Various types of vertical farms, growing technologies (hydroponics, aeroponics, aquaponics) and the materials used are studied. An analysis of the vertical farming market and development prospects in this area is carried out.

Keywords: vertical farming, vertical farms, structures, engineering analysis, optimization, digital technologies, hydroponics, aeroponics, aquaponics, materials, food security

АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ: РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ И МЕТОДОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

Догадов Кирилл Сергеевич, Лученко Илья Денисович, студенты
бакалавриата, 2 курс

Пояркова Екатерина Васильевна, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой механики материалов, конструкций и машин

Оренбургский государственный университет

Аннотация: *Статья посвящена анализу эволюции технологий и методов строительства асфальтовых дорог от их зарождения до наших дней. В ней рассмотрены ключевые этапы и решения, оказывающие влияние на развитие транспортной инфраструктуры.*

Ключевые слова: *дорога, асфальт, строительство, укладка, холодный асфальт, горячий асфальт, литой асфальт.*

Код и рубрика: 67.00.00 Строительство. Архитектура

Автомобильные дороги являются ключевым элементом транспортной инфраструктуры, обеспечивающим эффективное сообщение между регионами и способствующим социально-экономическому развитию страны. Современные требования к качеству и долговечности дорожных покрытий обусловлены увеличением интенсивности движения, ростом грузопотоков и изменением климатических условий.

В последние десятилетия наблюдается интенсивное развитие технологий и методов строительства асфальтобетонных покрытий, направленных на повышение их эксплуатационных характеристик, устойчивости к механическим нагрузкам и влиянию внешних факторов. Однако, несмотря на значительный прогресс, остаются актуальными вопросы оптимального выбора материалов и технологий, обеспечивающих баланс между экономической эффективностью и долговечностью дорожных покрытий.

Целью настоящей статьи является анализ эволюции технологий и методов строительства автомобильных дорог, а также сравнительное исследование современных типов асфальтобетонных смесей с учётом их физических и эксплуатационных характеристик. В работе рассматриваются исторические этапы развития дорожного строительства, современные технологические процессы и перспективы внедрения инновационных материалов.

Как известно, ещё в III тысячелетии до нашей эры в Месопотамии существовали элементарные дорожные пути, предназначенные для торговых операций и военных передвижений. Данные пути представляли собой утрамбованные грунтовые дорожки или примитивные мостовые покрытия.

В Древнем Египте дороги использовались для транспортировки тяжёлых грузов и сооружались в виде уплотнённых земляных насыпей.

Прорывом стали римские дороги с многослойной конструкцией: фундамент, каменный слой, песчаный слой и покрытие, обеспечивавшие долговечность и прочность.

Западноевропейские государства, являясь наследниками Римской империи, получили в распоряжение развитую дорожную инфраструктуру, тогда как становление российской цивилизации происходило на обширной, но характеризующейся недостаточной изученностью территории [1]. Данный фактор обусловил специфику развития транспортной инфраструктуры в России.

Первое документальное свидетельство о проведении дорожных работ на территории России относится к 1015 году и содержится в летописном своде «Повесть временных лет». В XI веке предпринимались попытки юридически определить положение «мостников» – специалистов, занимавшихся сооружением и восстановлением мостов. Дороги того времени служили целям военного перемещения, торговли и обеспечения местных коммуникаций. Их строительство осуществлялось из природных материалов (уплотнённая земля, камень, дерево, щебень) с применением ручного труда [2].

Эволюцией дорожного дела в России стал период петровских реформ. Среди инициатив Петра I особое место занимает создание «перспективной дороги» – прямого пути сообщения между Санкт-Петербургом и Москвой. Дорожное покрытие было сооружено из плотно уложенных бревен с обработанной верхней поверхностью, а участки с достаточным количеством камня мостились каменными плитами.

К концу XVIII века в Российской империи, подобно европейским странам, получили распространение щебневые покрытия с двухслойной конструкцией: нижний слой из мелкого щебня и верхний слой из крупного (размером 2-4 дюйма). Уплотнение покрытия производилось вручную при помощи катков. В регионах, где отсутствовал местный щебень, использовались менее прочные породы камня, гравий, кирпичный бой и дробленая руда [3].

Аналогичные технологии использовались во всем мире до появления первого асфальтового покрытия, что было уложено во Франции в период с 1832 по 1835 год в городе Париже [4]. Асфальт представлял собой искусственный или природный материал, применяемый для строительства прочных и долговременных дорожных покрытий.

В России первое асфальтобетонное покрытие было зафиксировано 6 июля 1838 года в Санкт-Петербурге у Исаакиевского собора, где был уложен небольшой участок тротуара, представлявший собой композицию из природного битума и гранитной крошки. Покрытие оказалось прочным, удобным для пешеходов и обладающим шумопоглощающими свойствами. Недостатком оказалась высокая стоимость асфальтобетона, что делала его недоступным для широкого применения.

Массовое внедрение асфальтирования в России началось в 1870-х годах благодаря исследованиям инженера Ивана Буттаца. Он разработал более экономичные рецептуры асфальтовых смесей и в 1872 году построил первый в стране завод по производству асфальта. Одним из первых масштабных проектов, реализованных с использованием новой технологии, стала набережная Фонтанки в Санкт-Петербурге. Для строительства дорог использовался природный асфальт,

добываемый на Кавказе и Урале. Асфальтобетон нагревали и укладывали вручную или при помощи несложных механизмов. В отдельных случаях асфальтовую массу смешивали с щебнем и гравием для повышения прочности покрытия. Метод был весьма медленным и трудоемким, что приводило к неравномерному качеству покрытия [5].

Эволюция технологических процессов обусловила разработку и внедрение механизированных методов укладки асфальтобетонных смесей, включающих использование специализированной техники, такой как асфальтоукладчики, автоматизированные системы распределения смеси и транспортёрное оборудование, что позволило существенно ускорить процесс, повысить качество получаемого покрытия и сократить затраты рабочей силы. Особое внимание уделяется тщательной подготовке основания, что обеспечивает равномерность покрытия и минимизацию дефектов [6].

Современная укладка асфальта включает 3 основных вида смесей:

- холодный асфальт;
- горячий асфальт;
- литой асфальт [7].

Исследуемый холодный асфальтобетон применяется преимущественно для ремонта небольших участков дорожного покрытия и ликвидации ям, благодаря своей технологической простоте и экономической эффективности при восстановлении повреждённых дорожных зон.

Процесс укладки холодного асфальта включает следующие этапы:

1. Вырезка поврежденного участка дорожного покрытия.
2. Очистка зоны ремонта от мусора и пыли.
3. Уплотнение уложенного асфальта вибротрамбовкой до достижения необходимой плотности [8].

Исследуемый горячий асфальтобетон представляет собой смесь, разогреваемую до температуры 110–130 °С. Данный вид асфальтобетона характеризуется высокой прочностью, длительным сроком службы и повышенной влагостойкостью. В состав горячего асфальтобетона входят: заполнитель (песок и горные породы), минеральный порошок, связующее вещество (битум), полимерные добавки и иные модификаторы. Горячий асфальтобетон применяется преимущественно для строительства магистральных дорог, аэродромов и загородных трасс, обеспечивая высокие показатели прочности и долговечности [9].

Технология укладки:

1. Геодезические исследования.
2. Подготовка местности.
3. Обустройство грунта (снятие, разравнивание, уплотнение).
4. Укладка геотекстиля.
5. Отсыпка песка.
6. Установка георешетки.
7. Отсыпка щебня.
8. Устройство асфальтового покрытия.

В заключение исследуемого раздела рассматривается литой асфальтобетон, широко применяемый в европейских странах. Этот высококачественный материал

обладает высокой водонепроницаемостью, устойчивостью к трещинам и температурным перепадам, а также стойкостью к воздействию соли, что делает его оптимальным выбором для мостов и участков с интенсивным движением [10].

В России использование литого асфальтобетона менее распространено в связи с высокой стоимостью смеси и оборудования.

Производство литого асфальтобетона осуществляется методом дозированного ввода компонентов в специализированное оборудование при температуре около +220°C.

Более точное распределение компонентов литого асфальтобетона в процентном соотношении по массе, основанное на современных стандартах и технологических особенностях, представлено ниже:

- связующее вещество (модифицированный битум) – 6–10% (обычно около 8%, зависит от типа битума и требований к эластичности и водостойкости);
- крупнозернистый заполнитель (щебень фракции 10–20 мм) – 40–50% (обеспечивает прочностные характеристики и несущую способность покрытия);
- мелкозернистый заполнитель (щебень и песок фракции 0–5 мм) – 30–35% (заполняет пустоты между крупными зернами, повышая плотность и однородность смеси);
- минеральный порошок (мелкодисперсный компонент, например, известняковая мука) – 15–20% (усиливает сцепление между битумом и заполнителем, улучшает устойчивость к деформациям);
- добавки поверхностного действия и модификаторы (полимеры, антиоксиданты, дисперсанты) – менее 1–2% (повышают эксплуатационные свойства, долговечность и морозостойкость).

Точные пропорции могут варьироваться в зависимости от требований конкретного проекта, климатических условий и типа дорожного покрытия. Однако приведённые данные отражают типичный состав литого асфальтобетона, применяемого для высоконагруженных и ответственных дорожных участков.

В рамках исследования был проведён сравнительный анализ наиболее распространённых в Российской Федерации типов асфальтобетонных смесей (холодного и горячего) с целью определения оптимального варианта, отвечающего требованиям обеспечения прочности и экономической эффективности дорожного строительства.

Испытания проводились на образцах холодного и горячего асфальтобетона при температуре 20 °C в сухом состоянии, по следующим характеристикам: предел прочности при растяжении при изгибе, прогиб и предельная относительная деформация, а также модуль деформации [11, 12]. Условными размерами образцов асфальтобетона были выбраны образцы холодного и горячего асфальтобетона шириной – 15 см, высотой – 10 см и расстоянием между опорами – 60 см.

Исследование предела прочности растяжения при изгибе холодного и горячего асфальтобетона было проведено по формуле:

$$R_{\text{изг}} = \frac{3Pl}{2bh^2} \cdot 10^{-2},$$

где P – разрушающая нагрузка, переведенная в МПа;
 l – расстояние между опорами, см;
 b – ширина образца, см;
 h – высота образца, см.

Расчет предела прочности растяжения при изгибе для горячего асфальтобетона, при $P = 1,5 \text{ МПа}$ (по ГОСТ 12801-98):

$$R_{\text{изг}} = \frac{3(1,5 \cdot 10^6) \cdot 60}{2 \cdot 15 \cdot 10^2} \cdot 10^{-2} = 900 \text{ МПа}.$$

Расчет предела прочности растяжения при изгибе для холодного асфальтобетона, при $P = 2,5 \text{ МПа}$ (по ГОСТ 9128-2013):

$$R_{\text{изг}} = \frac{3(2,5 \cdot 10^6) \cdot 60}{2 \cdot 15 \cdot 10^2} \cdot 10^{-2} = 1500 \text{ МПа}.$$

По результатам испытаний на предел прочности при растяжении при изгибе холодный асфальтобетон демонстрирует более высокие значения (около 1500 МПа) по сравнению с горячим асфальтобетоном (около 900 МПа), что свидетельствует о его лучшей сопротивляемости разрывным нагрузкам при изгибе. Однако для комплексной оценки эксплуатационных свойств необходимо учитывать и другие показатели, такие как долговечность, водостойкость и устойчивость к температурным изменениям, где горячий асфальтобетон может иметь преимущества.

Исследование холодного и горячего видов асфальтобетона по прогибу и предельной относительной деформации было произведено по формуле:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{6f_{\text{пр}}h}{l^2} \cdot 10^{-2},$$

где $f_{\text{пр}}$ – максимальная величина прогиба, см;
 h – высота образца, см;
 l – расстояние между опорами, см.

Расчет по прогибу и предельной относительной деформации для горячего асфальтобетона, при $f_{\text{пр}} = 2 \text{ мм}$ (по ГОСТ Р 50597-93):

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{6 \cdot 0,2 \cdot 10}{60^2} \cdot 10^{-2} = 0,00333 \text{ МПа} = 3,33 \text{ кПа}.$$

Расчет по прогибу и предельной относительной деформации для холодного асфальтобетона, при $f_{\text{пр}} = 3 \text{ мм}$ (по ГОСТ 9128-2013):

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{6 \cdot 0,3 \cdot 10}{60^2} \cdot 10^{-2} = 0,005 \text{ МПа} = 5 \text{ кПа}.$$

Чем ниже предельная относительная деформация, тем более устойчивый и прочный материал. В данном случае, горячий асфальтобетон с предельной деформацией 3.4 кПа показывает лучшие характеристики по сравнению с холодным асфальтобетоном с предельной деформацией 5 кПа.

В заключение исследуем холодный и горячий виды асфальтобетона по модулю деформации, используя формулу:

$$E = \frac{Pl^3}{4f_{пр}bh^3} \cdot 10^{-2},$$

где P – текущая нагрузка на образец, переведенная в МПа;

l – расстояние между опорами, см;

$f_{пр}$ – величина прогиба в середине образца, см;

b – ширина образца, см;

h – высота образца, см.

Расчет по модулю деформации для горячего асфальтобетона, при $P = 1,5$ МПа, $f_{пр} = 2$ мм:

$$E = \frac{(1,5 \cdot 10^6) \cdot 60^3}{4 \cdot 0,2 \cdot 15 \cdot 10^3} \cdot 10^{-2} = 270000 \text{ МПа.}$$

Расчет по модулю деформации для холодного асфальтобетона, при $P = 2,5$ МПа, $f_{пр} = 3$ мм:

$$E = \frac{(2,5 \cdot 10^6) \cdot 60^3}{4 \cdot 0,3 \cdot 15 \cdot 10^3} \cdot 10^{-2} = 300000 \text{ МПа.}$$

По модулю деформации холодный асфальтобетон показывает более высокие показатели (около 300 000 МПа) по сравнению с горячим асфальтобетоном (около 270 000 МПа).

Лабораторные исследования подтверждают превосходство холодного асфальтобетона над горячим по ряду эксплуатационных характеристик. Вместе с тем, следует учитывать, что в условиях реальной эксплуатации горячий асфальтобетон часто демонстрирует более высокие эксплуатационные показатели, что обусловлено более однородной структурой и улучшенным сцеплением компонентов смеси.

Результаты исследования подтверждают, что развитие автомобильных дорог представляет собой эволюционный процесс, охватывающий этапы от простейших грунтовых маршрутов до современных высокотехнологичных транспортных магистралей. Постоянное совершенствование материалов, конструктивных решений и технологий строительства способствовало значительному повышению надёжности, безопасности и пропускной способности дорожной сети.

Эволюция дорожной инфраструктуры оказала существенное влияние на экономический рост, повышение мобильности населения и улучшение качества

жизни. В ходе работы выявлены как преимущества, так и ограничения современных асфальтобетонных покрытий, что подчёркивает необходимость дальнейших исследований и внедрения инновационных материалов и технологий.

Дальнейшее развитие дорожной отрасли должно быть направлено на интеграцию передовых технологических решений и автоматизацию строительных процессов, что позволит повысить устойчивость дорожных покрытий к механическим нагрузкам, температурным колебаниям и воздействию атмосферных факторов, обеспечивая долговечность и эксплуатационную надёжность.

Список использованных источников

1. Dzen: официальный сайт. – Режим доступа: <https://dzen.ru/a/ZvJcKVdtXgR-ATVY> (дата обращения 31.05.2025).
2. Scienceforum: официальный сайт. – Режим доступа: <https://scienceforum.ru/2018/article/2018009599> (дата обращения 31.05.2025).
3. Ru.ruwiki: официальный сайт. – Режим доступа: https://ru.ruwiki.ru/wiki/%D0%98%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F_%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%B2%D0%B8%D1%82%D0%B8%D1%8F_%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B3_%D0%B2_%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8 (дата обращения 31.05.2025).
4. Dzen: официальный сайт. – Режим доступа: <https://dzen.ru/a/Zz-pe41FsnT0OeVR> (дата обращения 31.05.2025).
5. Gorodovoy: официальный сайт. – Режим доступа: https://gorodovoy.ru/news/ot-trotuara-u-isaakievskogo-sobora-do-naberezhnoy-fontanki-kak-v-rossii-poyavilis-asfaltirovannye-dorogi_id889366_a184_dp250523 (дата обращения 31.05.2025).
6. Blagoystroystvo: официальный сайт. – Режим доступа: <https://blagoystroystvo.ru/blog/sovremennye-tehnologii-v-asfaltirovanii-territoriy/> (дата обращения 31.05.2025).
7. Asphalt-kachestvo: официальный сайт. – Режим доступа: <https://asfalt-kachestvo.ru/inner-news-9.html> (дата обращения 31.05.2025).
8. Asfaltok: официальный сайт. – Режим доступа: <https://asfaltok.ru/tehnologija-ukladki-holodnogo-asfalta/> (дата обращения 31.05.2025).
9. Asphalt-kachestvo: официальный сайт. – Режим доступа: <https://asfalt-kachestvo.ru/news/goryachij-asfalt.html> (дата обращения 31.05.2025).
10. Ltsr: официальный сайт. – Режим доступа: <https://ltsr.ru/articles/tehnologiya-ukladki-litogo-asfalta/> (дата обращения 31.05.2025).
11. ОДН 218.046-01 «Проектирование нежестких дорожных одежд» – М., 2001. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294847/4294847959.htm> (дата обращения 31.05.2025).
12. Gruntovozov: официальный сайт. – Режим доступа: <https://gruntovozov.ru/chasto-zadavayemiye-voprosy/harakteristiki-i-svojstva-asfalta/mehanicheskie-svojstva-asfalta/deformativnost-asfaltobetona/> (дата обращения 31.05.2025).

HIGHWAYS: DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES AND CONSTRUCTION METHODS

**Dogadov Kirill Sergeevich, Luchenko Ilya Denisovich, undergraduate
students, 2nd year**

**Ekaterina V. Poyarkova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines**

Orenburg State University

Abstract: *The article is devoted to the analysis of the evolution of technologies and methods of asphalt road construction from their inception to the present day. It will examine the key stages and innovative solutions that have an impact on the development of transport infrastructure.*

Keywords: *road, asphalt, construction, laying, cold asphalt, hot asphalt, cast asphalt.*

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЁТА ЯДРА СЕЧЕНИЯ КАК СРЕДСТВО СНИЖЕНИЯ ОШИБОК В ПРОЕКТИРОВАНИИ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Сергеев Михаил Александрович, Суховеев Александр Владимирович,
студенты бакалавриата, 2 курс

Оренбургский государственный университет

Аннотация. В статье рассматривается определение ядра сечения при внецентренном растяжении-сжатии, важного для проектирования инженерных конструкций. Указаны методы расчета, включая аналитические решения для простых форм и численные методы, такие как метод конечных элементов (МКЭ), для сложных сечений. Особое внимание уделяется разработке программного обеспечения для автоматизации этих расчетов, что сокращает время выполнения и уменьшает вероятность ошибок. Работа выполнена на кафедре механики материалов, конструкций и машин Оренбургского государственного университета *под руководством Поярковой Екатерины Васильевны*, доктора технических наук, доцента, заведующим кафедрой механики материалов, конструкций и машин.

Ключевые слова: программа-калькулятор, расчёт ядра сечения, геометрические характеристики, автоматизация проектирования, практическое применение.

Код и рубрика: 81.00.00 Общие и комплексные проблемы технических и прикладных наук и отраслей народного хозяйства.

Определение ядра сечения при внецентренном растяжении-сжатии является важным этапом в проектировании инженерных конструкций.

Априори, ядро сечения – это область внутри поперечного сечения, в которой приложение сжимающей силы вызывает только сжимающие напряжения по всему сечению [1].

Знание положения ядра сечения позволяет оптимизировать конструктивные решения, обеспечивая их устойчивость и надёжность, а также варьировать точку приложения нагрузки (полнос). Эта задача остаётся актуальной в различных отраслях промышленности, где требуется гарантировать устойчивость и надёжность конструкций. Ручные методы расчёта в таких случаях требуют значительных усилий и могут быть подвержены ошибкам, особенно при анализе сложных профилей и нагруженных элементов [2, 3].

Поэтому всё большее распространение получают программные средства, автоматизирующие вычисления геометрических характеристик сечений. На основании проведённого анализа было решено разработать программное обеспечение-калькулятор для автоматизации расчёта ядра сечения внецентренно сжатых конструкций [4].

Как известно из курса сопротивления материалов, для определения ядра сечения необходимо знать основные геометрические характеристики плоского

сечения, такие как центр тяжести, площадь, моменты инерции и радиусы инерции. Эти параметры определяют поведение сечения под воздействием внешних нагрузок [1].

Для простых геометрических форм поперечного сечения, таких как прямоугольник или круг, ядро сечения может быть определено аналитически. Например, для прямоугольного сечения ядро представляет собой ромб, диагонали которого в три раза меньше сторон прямоугольника. Для круглого сечения ядро является кругом, диаметр которого в четыре раза меньше диаметра сечения [5].

В случае сложных сечений, таких как многоугольники или сечения с вырезами, применяются численные методы. Одним из наиболее распространённых является метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет разбить сечение на множество малых элементов и оценить их взаимодействие. Однако применение данного метода не всегда является рациональным [6, 7].

Построение сечения произвольного многоугольника целесообразнее осуществлять посредством вычисления нейтральных линий, поскольку конечные элементы, на которые разбивается сечение, часто сами представляют собой многоугольники, особенно вблизи контура. Для упрощения МКЭ требуется разбиение сечения на всё более мелкие элементы, что значительно увеличивает объём вычислений. Для достижения высокой точности нередко необходимо прибегать к интегральному исчислению и использованию бесконечно малых величин.

В то же время построение нейтральных линий позволяет получить точное определение ядра сечения с числом операций, пропорциональным количеству вершин многоугольника. Каждой вершине соответствует определённая нейтральная линия, при пересечении которой напряжения меняют знак. Таким образом, построение всех нейтральных линий даёт возможность определить область, в пределах которой приложенные нагрузки не вызывают напряжений противоположного знака, то есть ядро сечения.

Как указано выше, было принято решение о создании программы, способной вычислять ядро сечения. Изначально данная программа представляла собой простой скрипт, который для заданных точек строил прямые (нейтральные линии), делящие сечение на растянутую и сжатую зоны. На рисунке 1 представлен вид результата работы первичной программы. Отличительной особенностью данной версии является то, что геометрические характеристики сечения вводятся вручную, в частности, радиусы инерции. С одной стороны, это является преимуществом, так как позволяет считать ядра неоднородных сечений. Однако чаще всего сечения являются однородными (или близки к таковым), поэтому целесообразно ввести автоматический расчёт геометрических характеристик для сечений. На рисунке 2 представлены результаты работы для сложных сечений.

Текущая программа может вычислять ядра как простых, так и сложных сечений. Ниже представлено описание функционала программы и её взаимодействия с пользователем.

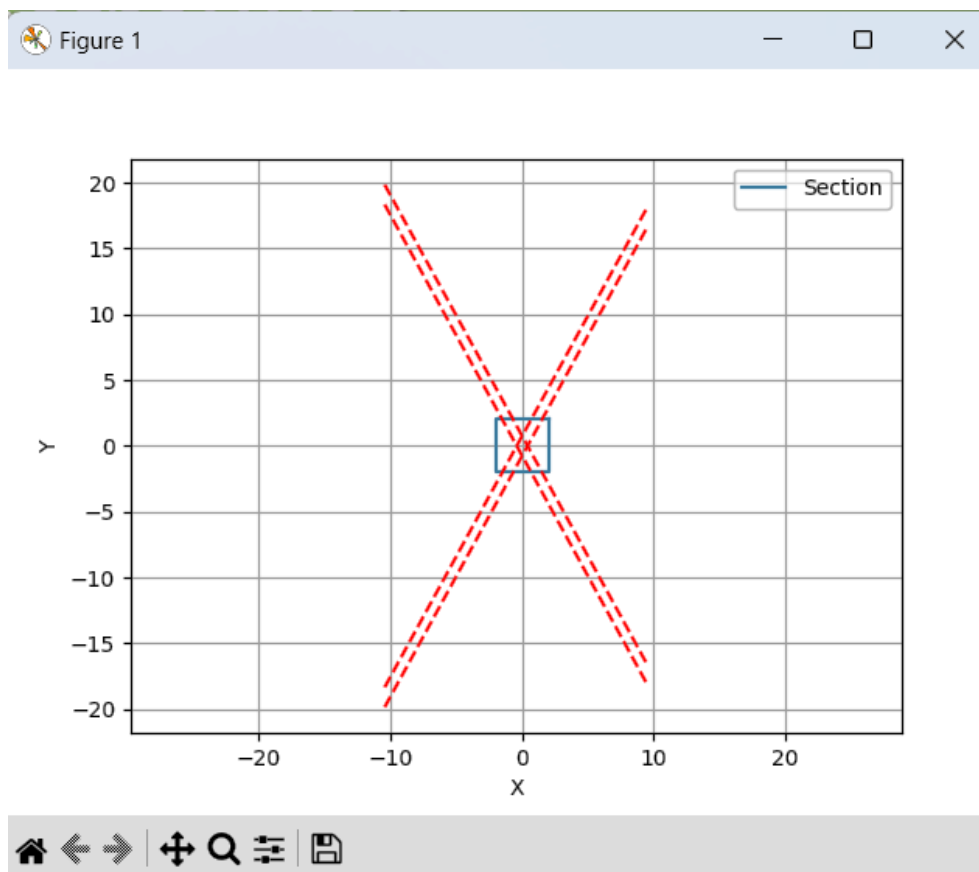


Рисунок 1 – Пример работы первичной программы

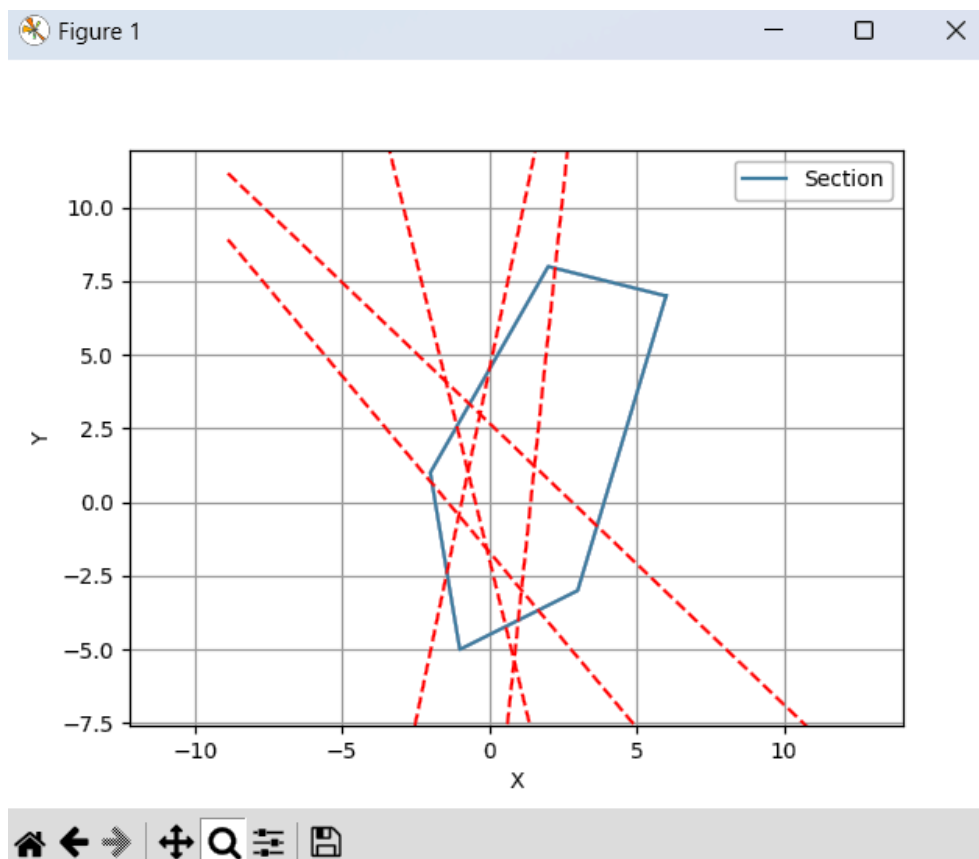


Рисунок 2 – Пример работы программы для сложных неоднородных сечений

На рисунке 3 показан стартовый интерфейс программы. В правой части экрана находится рабочая область, где происходит построение сечения и его ядра. Имеются элементы управления для изменения масштаба и перемещения области просмотра. В левом верхнем углу экрана расположена область ввода координат вершин. Данные можно вводить вручную, импортировать из текстового файла формата .txt или загружать ранее сохранённые сечения из файлов формата .json.

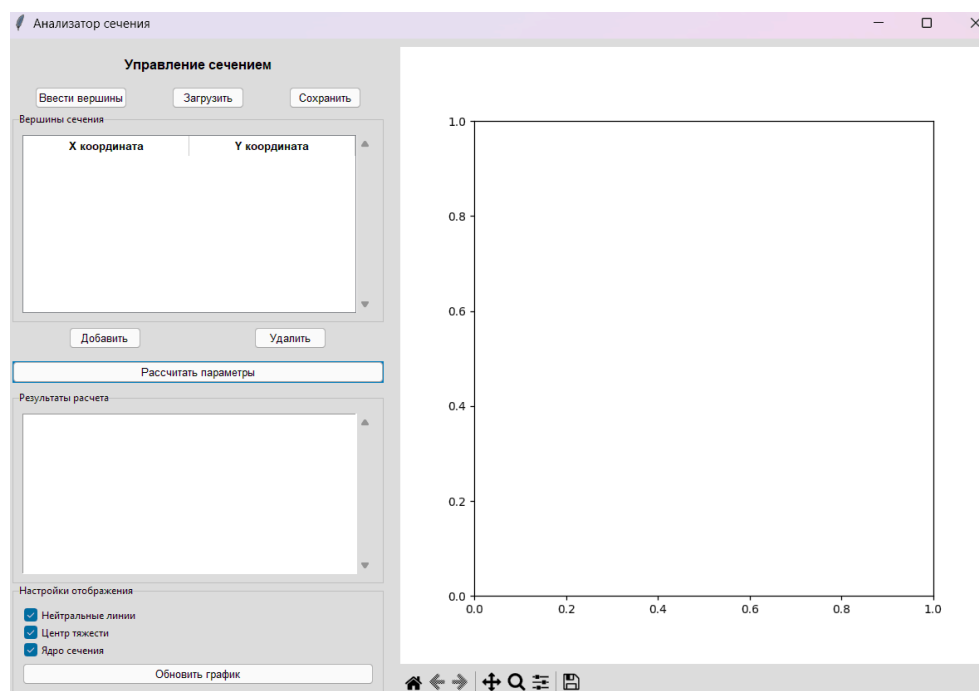


Рисунок 3 – Стартовый интерфейс

После введения координат вершин исследуемого сечения следует нажать кнопку «Рассчитать параметры», после чего справа появятся элементы, которые выбраны в флажках ниже (ядро, нейтральные линии и центр тяжести).

На рисунках 4 и 5 приведены примеры расчётов простого и сложных сечений.

Таким образом, программа-калькулятор для расчёта ядра сечения является полезным и удобным инструментом инженерных расчётов, применимым в различных областях.

Изначально разработанная в Оренбургском государственном университете для упрощения расчётов ядра сложного сечения при выполнении студентами расчётно-графических заданий по дисциплине «Сопротивление материалов» со временем превратилась в полноценный программный продукт.

Программа автоматически определяет геометрические характеристики сечения, что делает её гибким и многофункциональным решением. Благодаря своей функциональности она значительно облегчает работу инженеров и проектировщиков, сокращая время выполнения расчётов и снижая вероятность ошибок.

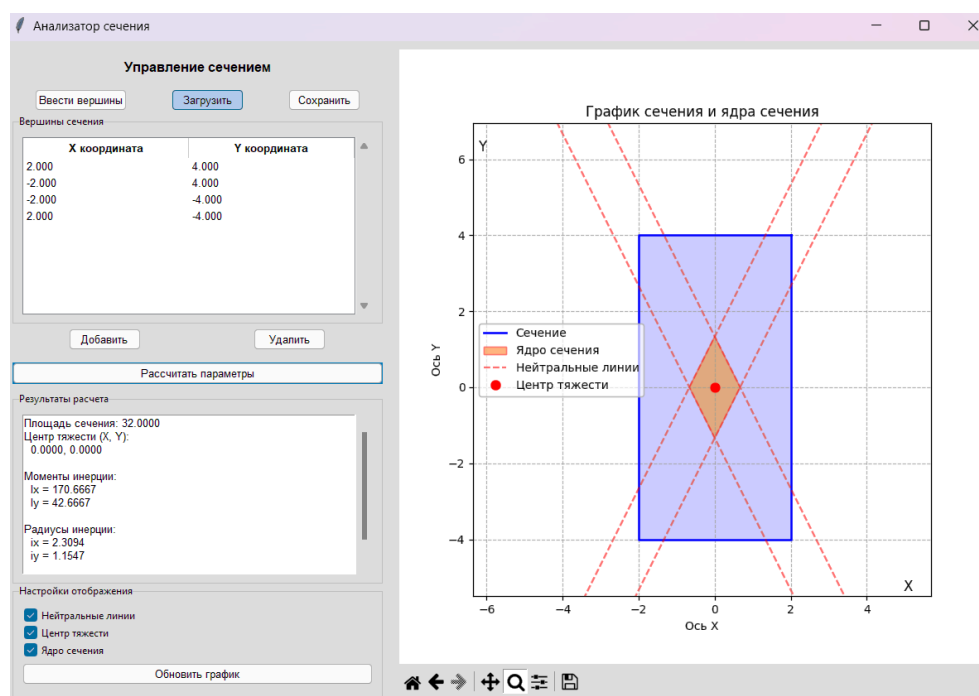


Рисунок 4 – Расчёт и построение ядра сечения простого поперечного сечения

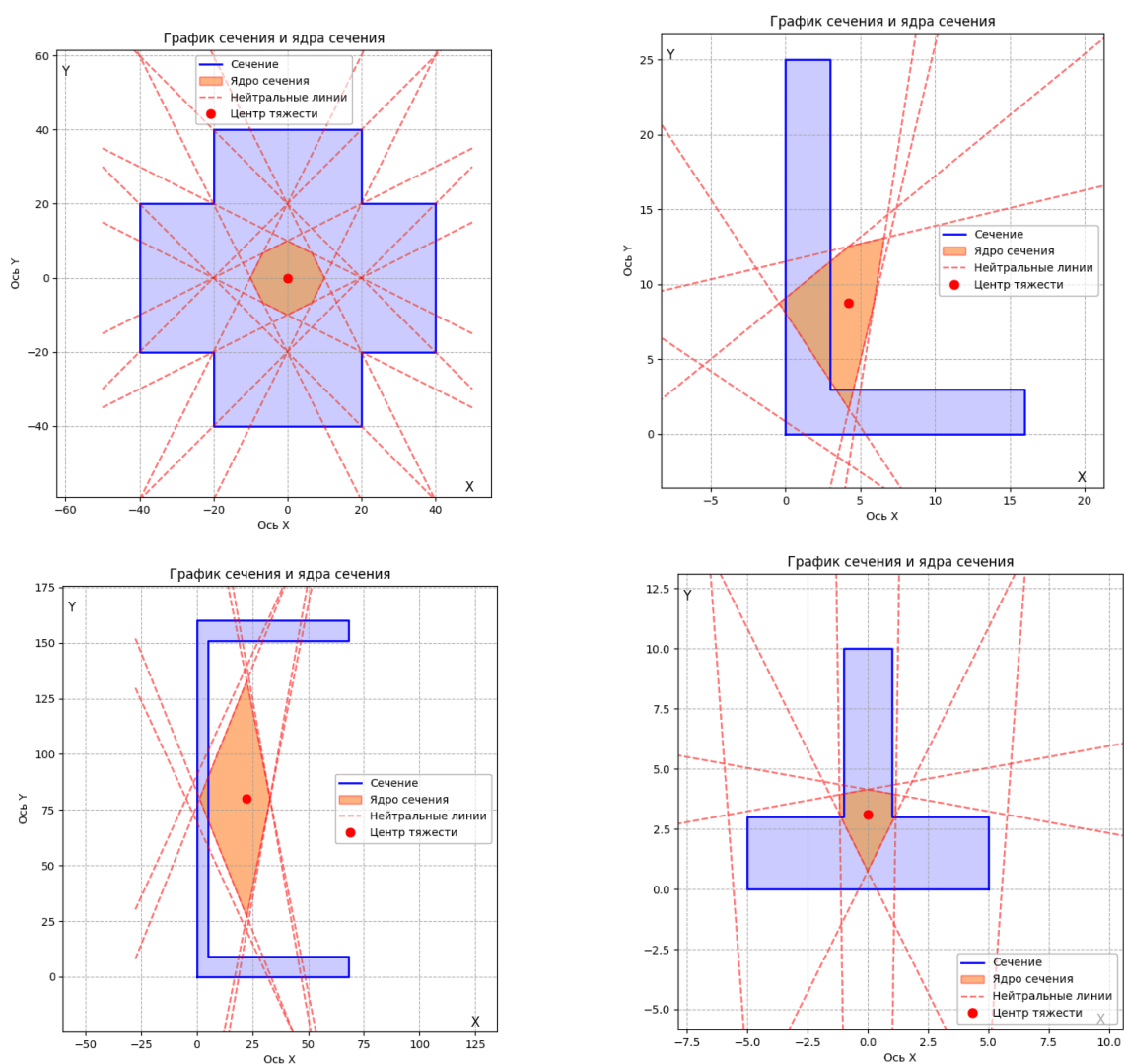


Рисунок 5 – Расчёт построение ядра сечения сложных форм сечений

Внедрение подобных программных решений в процесс проектирования способствует повышению качества, надёжности и эффективности разрабатываемых конструкций.

Список использованных источников

1. Расчет при внецентренном сжатии. Построение ядра сечения. – Режим доступа: <https://prosopromat.ru/zadachi/zadachi-na-slozhnoe-soprotivlenie/raschet-pri-vnecentrennom-szhatii-postroenie-yadra-secheniya.html> (дата обращения 10.05.2025).
2. Веретенников, В. И. О влиянии размеров и формы сечения элементов на диаграмму деформирования бетона при внецентренном сжатии / В.И. Веретенников, А.А. Бармотин // Бетон и железобетон. – 2000. – № 5. – С. 27-30.
3. Моисеев, О. Ю. Прямые трубобетонные балки с асимметричным предварительно напряженным бетонным ядром для пролетных строений малых мостов / О. Ю. Моисеев, Д. Н. Парышев, И. Г. Овчинников [и др.] // Вестник Курганского государственного университета. – 2016. – №3 (42). – Серия «Технические науки». – Выпуск 11. – С. 39-41.
4. Писаренко, Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – Киев: издательство «Наукова думка». – 1988. – 736 с.
5. Ластовка, А. В. Исследование предпосылок влияния эксцентриситетов и отклонений осей на показатели напряженного-деформированного состояния железобетонных колонн в каркасах многоэтажных зданий / А. В. Ластовка, А. К. Мурзинцев // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2023. – Том 13. – №1. – С. 39-47. – <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-1-39-47>.
6. Буялич, Г. Д. Влияние эксцентриситета приложения нагрузки и параметров погружного контура на устойчивость основания крепи / Г. Д. Буялич // Вестник КузГТУ. – 2004. – №2. – С. 42-44.
7. Новиков, В. И. Исследование условий эксплуатации колонных ковочных прессов / В. И. Новиков, В. И. Кадошников, Е. В. Куликова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2011. – №4 (36). – С. 62-64.

AUTOMATION OF THE CORE CALCULATION AS A MEANS OF REDUCING ERRORS IN THE DESIGN OF ECCENTRICALLY COMPRESSED ELEMENTS

Sergeev Mikhail Alexandrovich, Bachelor's Degree, 2nd Year
Sukhovcev Alexander Vladimirovich, Bachelor's Degree, 2nd Year

Orenburg State University

Abstract: *The article discusses the determination of the core of a section under eccentric tension-compression, which is important for the design of engineering structures. The methods of calculation are indicated, including analytical solutions for simple shapes and numerical methods, such as the finite element method (FEM), for complex sections. Special attention is given to the development of software for automating these calculations, which reduces execution time and decreases the likelihood of errors. The work was carried out at the Department of Mechanics of Materials, Structures, and Machines of Orenburg State University under the guidance of Poyarkova Ekaterina Vasilyevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanics of Materials, Structures, and Machines.*

Keywords: *Calculator program, core section calculation, geometric characteristics, design automation, practical application.*



СЕКЦИЯ 2

«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЧНОСТИ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРОКА И УСЛОВИЙ ПРОДЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТРУБОПРОВОДА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОРРОЗИИ НА ОБЪЕКТ ПОДГОТОВКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Береговая Ая Алексеевна, студент бакалавриата, 4 курс

Оренбургский государственный университет

Аннотация. В данной работе исследуются проблемы коррозии технологических трубопроводов, используемых на газоперерабатывающих предприятиях. Акцент сделан на воздействии сероводорода на металл труб, а также на различных формах коррозионного поражения, включая сероводородное растрескивание и водородное охрупчивание. Представлены способы химической защиты от коррозии, такие как использование ингибирующих реагентов, а также применение антикоррозионных облицовок. Рассмотрены случаи аварий, вызванных процессами коррозии, и предложены решения для диагностики и прогнозирования ресурса трубопроводов.

Работа выполнена на кафедре механики материалов, конструкций и машин Оренбургского государственного университета **под руководством Клещаревой Галины Александровны**, кандидата технических наук, доцента кафедры механики материалов, конструкций и машин.

Ключевые слова: технологические трубопроводы, коррозия, газоперерабатывающее предприятие, антикоррозионные покрытия, сероводород.

Код и рубрика: 81.33.81 Методы исследования коррозии и коррозионные испытания

На газоперерабатывающих заводах (ГПЗ) технологические трубопроводы играют важнейшую роль в транспортировке различных газовых и жидких потоков между производственными установками. Они обеспечивают:

- перемещение природного газа на разных этапах его обработки;
- транспортировку газа, содержащего сероводород, к установкам очистки;
- перемещение газового конденсата к блокам стабилизации;
- удаление промышленных сточных вод и отходов.

Основными факторами, сокращающими срок службы практически всего оборудования на газоперерабатывающих предприятиях, являются коррозионные разрушения [4, 10, 12]. Процесс коррозии начинается на поверхности металла и распространяется вглубь материала. В результате происходят изменения в структуре металла: на его поверхности возникают химические реакции, приводящие к образованию углублений (таких как пятна, свищи или язвы), заполненных продуктами коррозии, преимущественно оксидом железа (Fe_2O_3). [7]. Классификация типов коррозионных повреждений металла представлена на рисунке 1.

Природный газ, конденсат и нефть, добываемые на Оренбургском нефтегазоконденсатном месторождении (ОНГКМ), содержат примеси сероводорода и диоксида углерода, которые могут вызывать не только общую и

язвенную коррозию, но и сероводородное растрескивание (СР) и водородное расслоение (ВР) металла оборудования и трубопроводных систем (ТП).



Рисунок 1 – Характер коррозионных разрушений

Согласно ГОСТ Р 53679–2009, водородное растрескивание (НІС) – это разновидность плоскостного разрушения углеродистых и низколегированных сталей, обусловленная диффузией атомарного водорода с последующим образованием молекулярного водорода в микроскопических дефектах структуры [5, 11].

В соответствии с ГОСТ Р 53679–2009, сероводородное растрескивание определяется как разрушение металла, происходящее под воздействием растягивающих напряжений и коррозии в присутствии воды и сероводорода [5, 11].

Трубопроводы, используемые для транспортировки сероводородсодержащих нефтегазовых сред, представляют собой сложные технологические системы с точки зрения оценки их коррозионного состояния.

Наиболее агрессивными являются сточные воды, содержащие сероводород. Увеличение доли воды в добываемой продукции способствует ускорению сероводородной коррозии. Сульфид железа, выступая в роли катода по отношению к стали, формирует с ней гальваническую пару. Это, в свою очередь, активизирует электрохимический процесс разрушения металла скважинного оборудования.

Согласно результатам замеров, скорость коррозии в выкидных линиях скважин обычно не превышает 0,1 мм в год. Однако, фактическая скорость питтинговой коррозии металла в скважинном оборудовании может быть значительно выше [9].

В настоящее время, электрохимический и химический метод являются основными способами защиты от коррозии в нефтедобывающей отрасли [13].

Электрохимическая защита направлена на изменение последствий электрохимической реакции между металлом и окружающей средой с целью подавления коррозионных процессов.

Существует два основных метода электрохимической защиты:

– катодная защита. При катодной защите трубопровод переводится в катод относительно окружающей среды за счет подачи на него постоянного электрического тока. Это достигается подключением источника тока, который снижает коррозионный потенциал металла до уровня, при котором коррозия практически прекращается.

– анодная защита. Применяется реже и заключается в создании защитной пассивной пленки на поверхности металла путем повышения его анодного потенциала в определенных пределах. Эта технология используется, например, для защиты от коррозии в сильно агрессивных средах с контролируруемыми параметрами.

В рамках химических методов защиты применяются:

– введение ингибиторов коррозии и бактерицидов дозировочными насосами в начале трубопровода (или в затрубное пространство скважины) из расчета 25-35 г на один кубический метр добываемой воды;

– регулярное добавление ингибиторов коррозии и бактерицидов в затрубное пространство скважины через метанольницы с интервалом 7-15 дней;

– периодическая закачка растворов ингибиторов коррозии и бактерицидов агрегатами в начале трубопровода (или в затрубное пространство скважины) с использованием передвижных насосных установок.

Применение внутренней облицовки (футеровки) трубопроводов с использованием антикоррозионных материалов является особенно эффективным при эксплуатации нефтепроводов, транспортирующих продукцию с высоким содержанием воды, а также водоводов, используемых для закачки сточных вод в систему поддержания пластового давления (ППД) [8].

Помимо этого, нашли применение полиуретановые и эпоксидные покрытия, созданные на основе материалов с повышенной вязкостью (см. рисунок 2).

Помимо полиэтилена специализированных марок, широко используются разнообразные эмали и эпоксидные смолы, разработанные с учетом условий эксплуатации трубопроводных систем. На рисунке 2 представлены катушки труб, имеющих внешнее покрытие из полиэтилена и внутреннее покрытие из эпоксидной смолы.

К ограничениям данных покрытий относится их невысокая термостойкость, особенно это касается полиэтилена. Под воздействием температур в диапазоне 90-100 градусов Цельсия и последующем охлаждении полиэтиленовое покрытие подвергается усадке, что приводит к его фактическому выходу из строя [7].

К настоящему времени накоплен достаточно большой статистический материал по авариям на трубопроводах, проложенных в различных регионах. Одна из подобных аварий произошла 29 сентября 2011 года на предприятии ООО «Газпром трансгаз Москва» Белоусовское УМГ, расположенное на территории Малоярославецкого района Калужской области. На 57,5 км магистрального

газопровода «Якшуновская СПХГ-КС Белоусово» Ø720×8 мм произошел разрыв с возгоранием. Причиной аварий стали следующие последствия:

1. Коррозионное растрескивание под напряжением трубы,
2. Неудовлетворительное диагностирование в процессе эксплуатации технического состояния аварийного участка магистрального газопровода;
3. Непринятие мер для приведения магистрального газопровода в состояние, позволяющее осуществлять техническое диагностирование методом внутритрубного обследования инспекционными приборами в целях выявления дефектов – продольных стресс-коррозионных трещин.

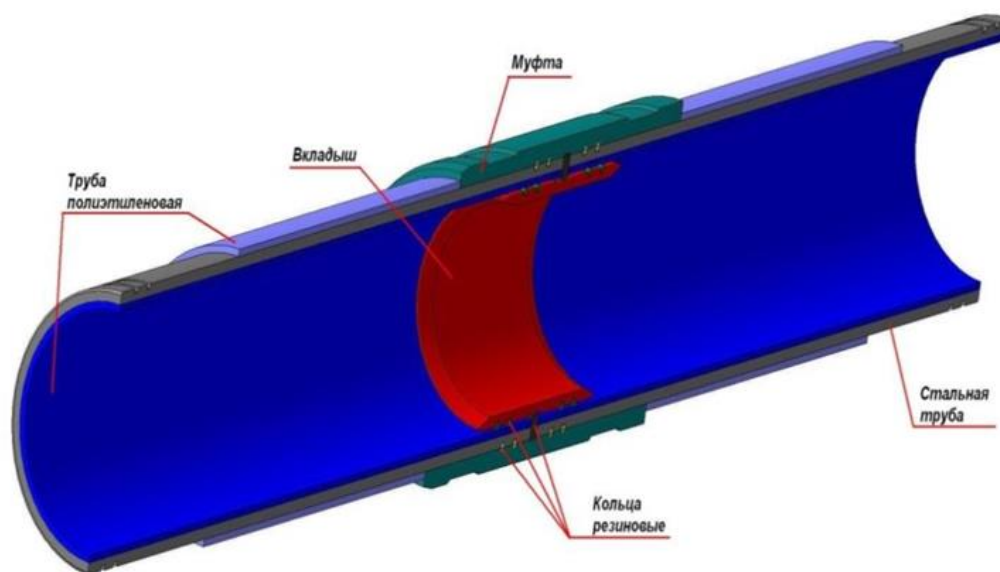


Рисунок 2 – Неразъемное муфтовое соединение в разрезе

Предотвращение подобных последствий можно решить путем применения методов исследования прочности трубопроводов. Они включают в себя:

- проведения диагностического обследования технологических трубопроводов;
- расчет на прочность технологического трубопровода;
- расчет остаточного ресурса трубопроводов.

Техническое диагностирование технологических трубопроводов в обязательном порядке включает в себя следующий перечень работ:

Визуальный и измерительный контроль состояния поверхности металла всех элементов, сварных и резьбовых соединений, защитных покрытий (антикоррозионных и теплоизоляционных) и опорных конструкций трубопровода.

1. Ультразвуковое измерение толщины стенок элементов трубопровода.
2. Неразрушающий контроль сварных соединений и потенциально опасных участков трубопровода с использованием ультразвукового контроля (УК), капиллярного контроля (КК), магнитопорошкового контроля (МПК) и других методов.
3. Контроль сплошности основного металла трубопровода ультразвуковым методом, с учетом особенностей развития водородного растрескивания (расслоения).

Расчет прочности выполняется для подтверждения безопасности и надежности эксплуатации трубопровода при воздействии различных внутренних и внешних факторов, таких как давление, температура, коррозионные процессы, вибрационные нагрузки.

Согласно ГОСТ 32388-2013 «Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и сейсмические воздействия». Для проведения проверочного расчёта прочности трубопровод разбивается на отдельные участки: прямолинейные и криволинейные, которые имеют форму дуги окружности. Места соединения этих участков рассматриваются в качестве расчетных узлов. В число расчетных узлов включают:

- места присоединения к оборудованию;
- места присоединения к опорам;
- точки излома или разветвления осевой линии трубопровода;
- точки изменения поперечного сечения, нагрузок и свойств грунта.

– В расчетах учитывают внешние статические нагрузки, которые могут быть представлены либо сосредоточенными, либо равномерно распределёнными силами. Кроме того, для статически неопределимых стержневых систем принимаются во внимание деформационные воздействия, возникающие вследствие температурных изменений (нагрева или охлаждения), смещений опор и оборудования, а также предварительного растяжения или сжатия трубопровода. При этом трубопроводная арматура моделируется как недеформируемые, то есть абсолютно жёсткие, стержневые элементы.

При длительной эксплуатации трубопровода необходимо учитывать коррозионный износ:

$$\delta_{\text{факт}} = \delta_{\text{ном}} - h_{\text{кор}}, \quad (1)$$

где $h_{\text{кор}}$ – глубина коррозии, мм;
 $\delta_{\text{факт}}$ – фактическая толщина стенки трубы;
 $\delta_{\text{ном}}$ – номинальная толщина стенки трубы.

Окружное напряжение:

$$\sigma_{\theta} = \frac{P * D}{\delta_{\text{факт}} * 2}, \quad (2)$$

где P – внутреннее рабочее давление, МПа;
 D – наружный диаметр трубы;
 σ_{θ} – окружное напряжении.

Продольное напряжение σ_L :

$$\sigma_L = \frac{P * D}{\delta_{\text{факт}} * 4} + \sigma_{\text{тяж}} + \sigma_{\text{тем}}, \quad (3)$$

где σ_L – продольное напряжение;
 $\sigma_{\text{тяж}}$ – напряжение от собственного веса и подвесов;
 $\sigma_{\text{темп}}$ – температурное напряжение.

Температурное напряжение определяем по формуле:

$$\sigma_{\text{темп}} = E * \alpha * \Delta T, \quad (4)$$

где E – модуль упругости стали;
 α – коэффициент линейного расширения;
 ΔT – изменение температуры.

Для определения расчетного (эквивалентного) напряжения используем критерий Мизеса

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_{\theta}^2 + \sigma_L^2 - \sigma_{\theta} * \sigma_L}. \quad (5)$$

Допускаемое напряжение определим по пределу текучести:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{темп}}}{k}. \quad (6)$$

где k – коэффициент условий работы, согласно ГОСТ 32388–2013.

Проверка условий прочности выполняется согласно условию:

$$[\sigma_{\text{экв}}] \leq [\sigma]. \quad (7)$$

Определение остаточного срока службы технологических трубопроводов представляет собой прогнозирование изменения их технического состояния во времени на основе ключевых параметров, до достижения предельного состояния.

Для определения остаточного срока службы необходимо одновременное выполнение следующих условий:

1. Известны параметры, определяющие техническое состояние элементов трубопровода, в соответствии с пунктом 14.4 настоящего стандарта.
2. Отсутствуют недопустимые повреждения (критерии предельного состояния указаны в пункте 14.11 настоящего стандарта).
3. Существует возможность прогнозирования параметров технического состояния.

Расчет остаточного срока службы технологического трубопровода должен выполняться с учетом требований Положения о диагностировании технологического оборудования и трубопроводов газонефтедобывающих и перерабатывающих предприятий ОАО «Газпром», ГОСТ Р 53006, Методики

оценки остаточного ресурса технологических трубопроводов и настоящего стандарта. Расчет остаточного срока службы должен выполняться с использованием методик, согласованных с Ростехнадзором.

Остаточный срок службы трубопровода $T_э$, год, подвергающегося действию коррозии (эрозии), вычисляют по формуле:

$$T_э = \frac{t_ф - t_{от}}{V_к}, \quad (8)$$

где $t_ф$ – фактическая минимальная толщина стенки элемента, мм;

$t_{от}$ – отбраковочная толщина стенки элемента, мм;

$V_к$ – скорость коррозии (эрозионного износа), мм/год.

Значение отбраковочной толщины стенки элемента технологического трубопровода принимают по данным паспорта технологического трубопровода или определяют расчетным способом с учетом фактических свойств металла.

Если после проведения очередного диагностирования имеется только одно измерение контролируемого параметра $t_ф$, полученное при рассматриваемом диагностировании, то скорость коррозии $V_к$, мм/год, вычисляют по формуле 9.

Скорость коррозии вычисляется по формуле:

$$V_к = \frac{t_и + C_0 - t_ф}{T_1}, \quad (9)$$

где $t_и$ – исполнительная толщина (по паспорту), мм;

C_0 – плюсовой допуск на толщину стенки, равный 10 % согласно ТУ-14-З-460-75;

$t_ф$ – фактическая минимальная толщина стенки элемента, мм;

T_1 — время от момента начала эксплуатации до момента первого диагностирования, лет.

В газоперерабатывающей промышленности коррозия является одной из основных причин выхода из строя технологических трубопроводов. С целью предотвращения аварий и разрушений требуется многосторонний подход, охватывающий систематическую диагностику, применение химических ингибиторов коррозии, использование антикоррозионных материалов для защиты поверхности и прогнозирование остаточного ресурса оборудования. Следование нормативным требованиям и своевременное проведение профилактических мероприятий позволяет существенно уменьшить вероятность повреждений и увеличить безопасность эксплуатации трубопроводных сетей.

Учитывая существенное влияние коррозионных процессов на долговечность трубопроводов, особенно в условиях присутствия сероводорода, влаги, углекислого газа и других агрессивных веществ, внедрение эффективных антикоррозионных мер становится первоочередной задачей:

– защитные покрытия, как внутренние, так и наружные, должны обладать подтвержденной стойкостью к воздействию рабочей среды. В этом качестве применяются эпоксидные, полиуретановые, стеклопластиковые и цинкосодержащие составы, обладающие устойчивостью к газовой и жидкой коррозии.

– для трубопроводов, расположенных под землёй или под водой, широко используется катодная защита, эффективность которой контролируется путём измерения защитного потенциала на поверхности труб.

– регулярная оценка эффективности антикоррозионной защиты проводится с использованием методов дефектоскопии, электрического контроля и сверки данных с технической документацией, касающейся покрытий.

Список использованных источников

1. Федеральный закон № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (с изменениями и дополнениями; посл. изм. вступили в силу 19.08.2024 на основании Федерального закона от 08.08.2024 № 232-ФЗ). – Режим доступа: <https://base.garant.ru/11900785/> (дата обращения 09.05.2025).

2. Приказ Ростехнадзора от 01.06.2022 № 444 Об утверждении ФНиП в области промышленной безопасности «Правила безопасной эксплуатации технологических трубопроводов»: введ. 21.12.2021. – М.: М-во юстиции РФ. – 2022. – № 68666.

3. Приказ Ростехнадзора от 20.10.2020 № 420 Об утверждении ФНиП в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности»: введ. 20.10.2020. – М.: М-во юстиции РФ. – 2020. – № 61391.

4. СТО Газпром 2-2.3-933-2015. Диагностическое обслуживание объектов добычи газа. методика обследования и диагностирования технического состояния технологических трубопроводов объектов добычи сероводородсодержащих газа, конденсата, нефти. – СПб.: Газпром экспо. – 2017. – 49 с.

5. ГОСТ Р 53679-2009. Нефтяная и газовая промышленность. Материалы для применения в средах, содержащих сероводород, при добыче нефти и газа. Часть 1. Общие принципы выбора материалов, стойких к растрескиванию. – М.: Стандартинформ. – 2019. – 7 с.

6. Доманский, В. О. Метод оценки скорости углекислотной коррозии трубопроводов систем сбора нефти / В. О. Доманский // Нефтепромысловое дело. – 2016. – №11. – URL: [https://sibac.info/archive/technic/11\(58\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/11(58).pdf) (дата обращения: 27.05.2025).

7. Костицына, И. В. Коррозионная стойкость трубных сталей в агрессивных средах нефтяных и газовых месторождений : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 02.00.04. – Челябинск. – 2014. – 148 с.

8. Барышов, С. Н. Оценка поврежденности, несущей способности и продление ресурса технологического оборудования: монография / С.Н. Барышов. – М.: Недра-Бизнесцентр. – 2007. – 287 с.

9. Юдаш, С. Г. Анализ причин отказов трубопроводов, транспортирующих сероводородсодержащие нефтегазовые среды / С. Г. Юдаш, Р. Ф. Мамбетов, В. М. Кушнарченко [и др.] // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2017. – №2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-prichin-otkazov-truboprovodov-transportiruyuschih-serovodorodsoderzhaschie-neftegazovye-sredy> (дата обращения: 01.06.2025).

10. Узяков, Р. Н. Влияние непрогнозируемых факторов на коррозионные повреждения трубопроводов и оборудования [Электронный ресурс] / Р. Н. Узяков, Ю. А. Чирков, В. М. Кушнарченко, Е. В. Пояркова // Электронный научный журнал нефтегазовое дело : электрон. науч. журнал . – 2019. – № 6. – С. 87-100.

11. Коррозия и защита изделий и конструкций [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. М. Кушнарченко [и др.]. – 2-е изд., стер. – Москва : Флинта, 2023. – 312 с – Загл. с тит. экрана. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54632172> (дата обращения: 01.06.2025).

12. Пояркова, Е.Н. Анализ коррозионных повреждений сварных соединений нефтепроводов / Е.Н. Пояркова // В сборнике: Молодежь в науке: Новые аргументы. сборник научных работ III-го Международного молодежного конкурса: в 4-х частях. – Липецк: Научное партнерство «Аргумент». – 2016. – С. 98-101.

13. Артамонов, А. М. Эффективность защитных покрытий в нефтегазовом секторе / А. М. Артамонов, Е. Н. Пояркова, Т. М. Каримов, А. С. Аяшева // В сборнике: Наука XXI века: новый подход. материалы XXIV молодежной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – 2020. – С. 27-32.

DETERMINATION OF THE PERIOD AND CONDITIONS FOR EXTENDING THE OPERATION OF A PROCESS PIPELINE WHEN EXPOSED TO CORROSION AT A NATURAL GAS TREATMENT FACILITY

Beregovaya Aya Alekseevna, bachelor's degree, 4th year

Orenburg State University, Orenburg

Annotation. *In this paper, the problems of corrosion of technological pipelines used in gas processing plants are investigated. The focus is on the effects of hydrogen sulfide on the metal of pipes, as well as on various forms of corrosion damage, including hydrogen sulfide cracking and hydrogen embrittlement. Methods of chemical corrosion protection, such as the use of inhibitory reagents, as well as the use of anticorrosive linings, are presented. The cases of accidents caused by corrosion processes are considered, and solutions for diagnosing and predicting the life of pipelines are proposed.*

The work was performed at the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines of Orenburg State University under the supervision of Galina Aleksandrovna Kleshchareva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines.

Keywords: *technological pipelines, corrosion, gas processing plant, anticorrosive coatings, hydrogen sulfide.*

РЕМОНТ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО СТАНКА КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Гафарова Виктория Александровна, кандидат технических наук, доцент,
Тимербаев Азамат Зиннурович, магистрант, 2 курс,
Кузеев Артем Максимович, аспирант, 1 курс

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Аннотация. Настоящая статья посвящена созданию композиционных материалов для ремонта дефектов чугунных поверхностей электроэрозионных станков.

Ключевые слова: композиционные материалы, механические и реологические свойства, электроэрозионные станки, ремонт

Код и рубрика: 55.00.00 Машиностроение

Электроэрозионные станки имеют множество деталей, подверженных износу, такие как подшипники, винт-гайки, червячные пары осевых перемещений, подъема ванны и рабочий стол. Эти детали, как правило, заменяются или изготавливаются заново в процессе ремонта. Поверхность рабочего стола и направляющие скольжения ремонтируются путем шлифовки на станке или шабрением и являются стандартными операциями по восстановлению станков. В условиях штучного или мелкосерийного ремонта нецелесообразно использовать специальные станки для механической обработки станин, так как загрузка такого оборудования будет чрезмерно низкой. Существуют различные методы заделки дефектов композиционными материалами, которые могут быть адаптированы в зависимости от типа дефекта, его размера и местоположения, а также требований к прочности и долговечности конструкции [1]. Наиболее перспективным является метод инфузии, который позволяет заделывать глубокие трещины.

Как отметил Г.И. Баренблатт [2], скрепление берегов трещины с небольшим раскрытием позволяет снизить уровень напряжений в ее вершине. На основе этого эффекта Гафарова В.А. [3, 4] разработала концепцию создания композитных материалов (КМ) в полости трещин для скрепления их берегов. При этом переход материала из жидкого состояния в твердое происходит в ограниченном объеме полости трещины. Это выдвигает особые требования: в жидком состоянии материал должен обладать реологическими свойствами, позволяющими проникнуть в полость, а в твердом – обеспечивать необходимую прочность и адгезию.

Расширение состава и свойств КМ имеет большое значение для оценки эффективности метода заделки трещин в реальных условиях. Именно этому посвящены настоящие исследования.

В качестве объекта исследований были выбраны композиционные материалы на эпоксидной основе с различными наполнителями (таблица 1). Чугунная крошка использовалась в качестве наполнителя, поскольку многие поверхности, которые необходимо ремонтировать, выполнены из чугуна. Кроме чугунной крошки в

качестве наполнителя применяли магнитные наночастицы Fe_2O_3 , которые успешно использовались при изготовлении гибридных композитов с использованием магнитных частиц оксида железа микрометрического размера [1]. В таблице 1 представлены составы испытанных композиционных материалов.

Таблица 1 – Компонентный состав композиционного материала

№	Компонентный состав и их соотношение
КМ 1	Эпоксидная смола ЭД 20 – 83% / отвердитель ПЭПА – 16% / наполнитель: чугунная крошка с размером частиц дисперсной фазы 0,1 мм – 0,05 гр. на 1 мл.
КМ 2	Эпоксидная смола ЭД 20 – 83% / отвердитель ПЭПА – 16% / наполнитель: чугунная крошка с размером частиц дисперсной фазы 0,5 мм – 0,05 гр. на 1 мл.
КМ 3	Эпоксидная смола ЭД 20 – 83% / отвердитель ПЭПА – 16% / наполнитель: чугунная крошка с размером частиц дисперсной фазы 0,9 мм – 0,05 гр. на 1 мл.
КМ 4	Эпоксидная смола ЭД 20 – 83% / отвердитель ПЭПА – 16% / наполнитель: чугунная крошка с размером частиц дисперсной фазы 0,1 мм – 0,05 гр. на 1 мл. / разбавитель: магнитные наночастицы Fe_2O_3 стабилизированные в керосине с помощью поверхностно-активного вещества (ПАВ): стеариновая кислота – 1%
КМ 5	Эпоксидная смола ЭД 20 – 83% / отвердитель ПЭПА – 16% / наполнитель: чугунная крошка с размером частиц дисперсной фазы 0,5 мм – 0,05 гр. на 1 мл. / разбавитель: магнитные наночастицы Fe_2O_3 стабилизированные в керосине с помощью ПАВ: стеариновая кислота – 1%
КМ 6	Эпоксидная смола ЭД 20 – 83% / отвердитель ПЭПА – 16% / наполнитель: чугунная крошка с размером частиц дисперсной фазы 0,9 мм – 0,05 гр. на 1 мл. / разбавитель: магнитные наночастицы Fe_2O_3 стабилизированные в керосине с помощью ПАВ: стеариновая кислота – 1%

На рисунке 1 представлены результаты испытания композиционных материалов, состав которых показан в таблице.

Результаты испытаний на прочность демонстрируют, что КМ с размером дисперсной фазы 0,9 мм (КМ 3, КМ 6) имеют высокие показатели по пределу прочности в сравнении с другими КМ.

Разброс значений твердости у всех КМ находится в диапазоне от 97 до 104 HR15T, что значительно превышает значения, полученные в работе [1]. Данные результаты указывают, что чугунная крошка в качестве наполнителя КМ преимущественно находится в поверхностных слоях.

На гистограмме (рисунок 1) видно, что КМ 1 и КМ 2 имеют самые высокие показатели усадки.

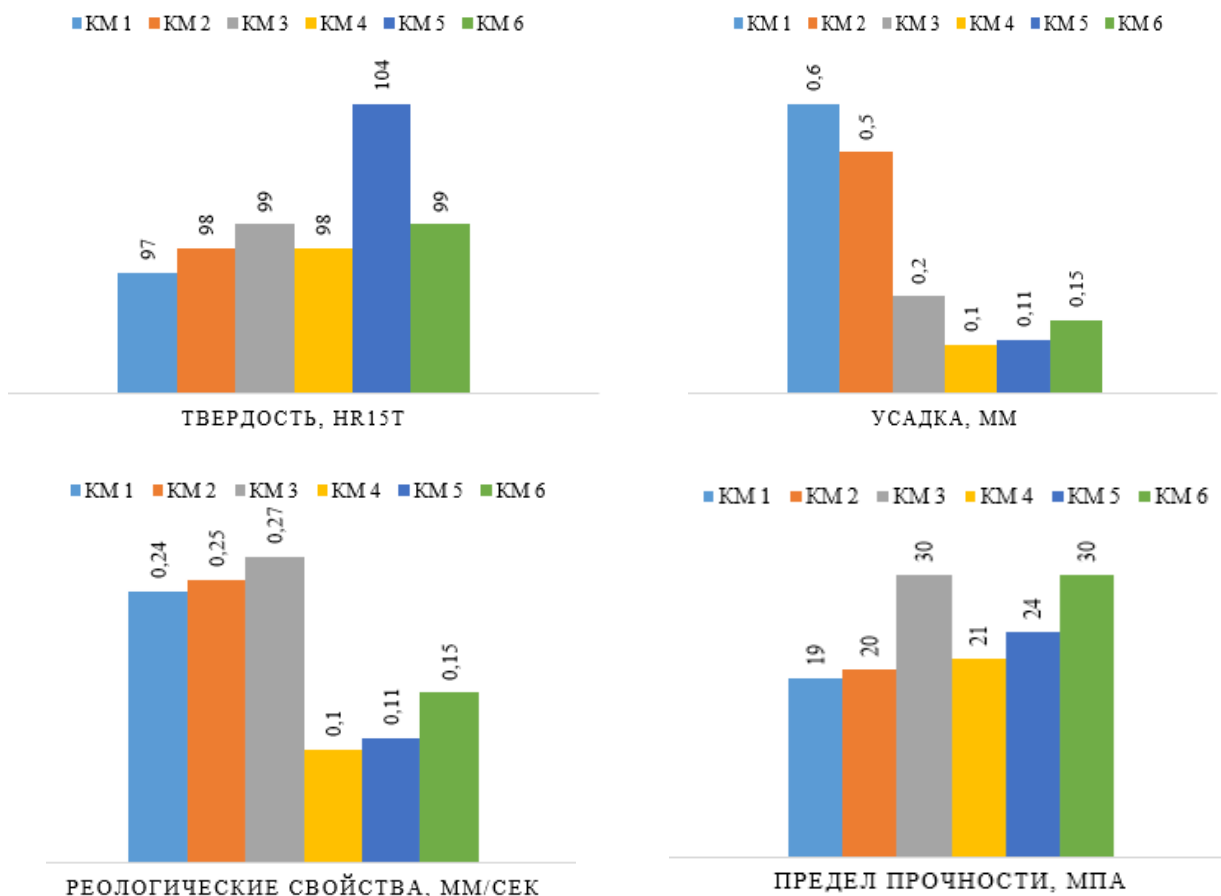


Рисунок 1 – Результаты испытаний на прочность, твердость, усадку и реологические свойства

На рисунке 2 показаны результаты измерения адгезионной прочности. Наблюдается адгезионный и смешанный характеры разрушения КМ.

Из гистограмм видно, что КМ с добавлением чугунной крошки с дисперсной фазы 0,5 (КМ 2, КМ 5) в качестве наполнителя имеют самые высокие показатели. КМ 2 и КМ 4 имеют 100 % адгезионный характер разрушения, а остальные КМ смешанный.

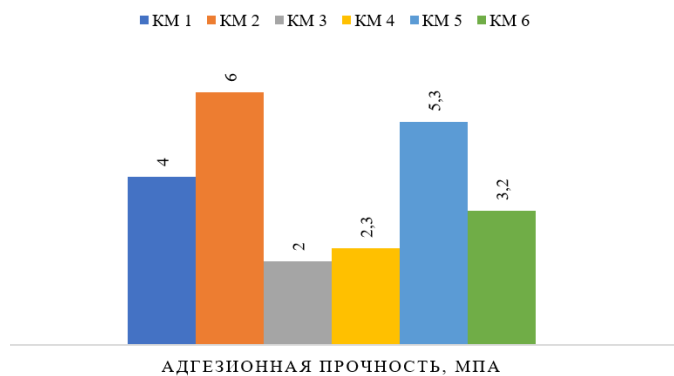
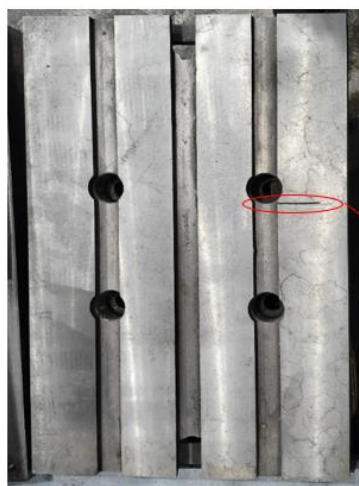


Рисунок 2 – Результаты испытаний на адгезионную прочность

С целью апробации методики ремонта композиционными материалами нами было выбран КМ и объекты, проводили на предприятии НПА «Технопарк АТ». В

качестве объекта выступил чугунный рабочий стол копировально-прошивочного станка 4E723 и рабочий стол.

На рисунках 3 и 4 показаны дефекты поверхности, этап зачистки и отремонтированную поверхность. Прделанная работа по устранению дефекта показала, что КМ позволяет устранять небольшие дефекты. Расчеты показывают существенное удешевление ремонтных работ.



Общий вид чугунного рабочего стола станка



Дефект рабочего стола после зачистки



Дефект рабочего стола после ремонта

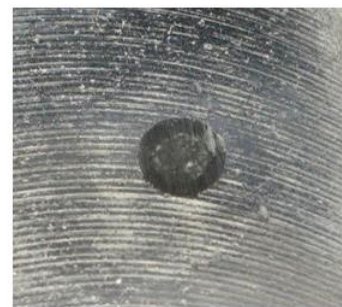
Рисунок 3 – Дефект до и после ремонта



Общий вид рабочего стола станка



Дефект рабочего стола после зачистки



Дефект рабочего стола после ремонта

Рисунок 4 – Дефект рабочего стола и его ремонт

Список использованной литературы

1. Гафарова, В. А. Материалы и способ заделки трещин в нефтегазовом оборудовании в межремонтный период эксплуатации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2019. – 24 с.
2. Баренблатт, Г. И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении / Г. И. Баренблатт // Прикладная механика и техническая физика. – 1961. – Т. 23. – № 4. – С. 3-56.
3. Гафарова, В. А. Применение композиционных материалов для сдерживания роста трещин в нефтегазовом оборудовании / В. А. Гафарова // Нефтегазовое дело. – 2018. – Т. 16. – № 5. – С. 99-107. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-5-99-107.
4. Гафарова, В. А. Характер взаимодействия композиционного материала с поверхностью стали с разным уровнем шероховатости / В. А. Гафарова, К. Р. Вагазова // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. – 2015. – № 5. – С. 56-59.

REPAIR OF ELECTRICAL DISCHARGE MACHINE PARTS WITH COMPOSITE MATERIALS

**Gafarova A. Viktoriya, candidate of technical sciences, associate professor
Timerbaev Z. Azamat, undergraduate student, 2th year,
Kuzeev M. Artem, graduate student, 1th year**

Ufa State Petroleum Technological University

Abstract. *This article is devoted to the creation of composite materials for repairing defects in cast iron surfaces of electrical discharge machines.*

Keywords: *composite materials, mechanical and rheological properties, electrical discharge machines, repair*

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Тулибаев^{1,2} Егор Сагитович, старший преподаватель кафедры механики материалов, конструкций и машин¹, главный конструктор бюро по разработке бурового инструмента²

Пояркова¹ Екатерина Васильевна, заведующий кафедрой механики материалов, конструкций и машин, доктор технических наук, доцент

¹Оренбургский государственный университет

²АО «Завод бурового оборудования»

Аннотация: В данной работе рассматриваются вопросы повышения прочности резьбовых соединений бурильных труб, используемых в сложных условиях эксплуатации. Анализируется влияние внутренних напряжений и величины зазора на предельный крутящий момент соединения, являющийся критическим параметром, определяющим его прочность и долговечность. На основе результатов моделирования и анализа экспериментальных данных предложен подход к оптимизации технологических параметров сборки резьбовых соединений типа ТБСН, направленный на повышение их прочности, предотвращение преждевременных отказов и увеличение крутящего момента.

Исследование позволяет выявить критические факторы, влияющие на прочность резьбовых соединений бурильных труб, и предложить рекомендации для повышения их эксплуатационной надежности. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов сборки, а также при оценке ресурса и проведении технического обслуживания бурильных колонн.

Ключевые слова: двухупорное соединение, резьбовое соединение, упорные стыки, момент затяжки, зазор, бурильные трубы, внутренние напряжения, крутящие моменты, деформации, прочность, герметичность.

Код и рубрика: 81.14.13 Методы проектирования и конструирования

Прочность и долговечность бурильных труб являются критически важными факторами при разработке и эксплуатации нефтегазовых месторождений. Бурильные трубы, соединяемые посредством резьбовых соединений, подвергаются значительным нагрузкам, включая растяжение, сжатие, изгиб, кручение, а также воздействие агрессивных сред. Недостаточная прочность резьбовых соединений может привести к авариям, простоям и значительным экономическим потерям. Статистика показывает, что значительная доля отказов бурильных колонн связана именно с разрушением резьбовых соединений [1, 2, 15]. В этой же работе выявлены причины разрушения резьбы нефтепромыслового и бурового оборудования в осложненных условиях эксплуатации и сделан их анализ. Таким образом, исследования, направленные на повышение надежности резьбовых соединений бурильных труб, представляют собой актуальную научно-техническую задачу.

Одним из перспективных направлений повышения надежности резьбовых соединений является учет внутренних напряжений, возникающих в процессе их

изготовления и сборки. Внутренние напряжения могут значительно влиять на распределение напряжений в резьбе под нагрузкой, приводя к концентрации напряжений и преждевременному разрушению. Кроме того, важным фактором является величина зазора между контактирующими поверхностями резьбы, которая также влияет на распределение нагрузок и деформаций. Согласно исследованиям [3, 4, 7] предварительное создание благоприятных остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое резьбы позволяет повысить сопротивление усталости и износостойкость соединений.

Ужесточающиеся требования к качеству бурильных труб заставляют их производителей искать способы повышения сопротивления усталости нарезаемых на трубах резьбовых соединений. При этом максимальный эффект может быть достигнут только при обоснованном выборе момента затяжки при сборке резьбового соединения. Среди факторов, влияющих на величину оптимального момента затяжки [10], важное место занимают технологические параметры процесса изготовления элементов резьбового профиля [9].

В настоящее время существует ряд методов анализа и оптимизации резьбовых соединений бурильных труб, включая аналитические расчеты, конечно-элементное моделирование [5, 8] и экспериментальные исследования [11]. Однако, учет влияния внутренних напряжений и величины зазора на предельный крутящий момент соединения требует проведения комплексных исследований с использованием современных программных комплексов и экспериментальных методик. В частности, необходимо учитывать нелинейные деформации материала, контактное взаимодействие поверхностей резьбы и сложные термомеханические нагрузки. Так в [3] упоминается метод поверхностно-пластического деформирования, который приводит к образованию в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений. Это подтверждает общепринятый подход к повышению сопротивления усталости и износостойкости резьбовых соединений.

Несколько работ [3, 4, 6, 12] подчеркивают важность учета технологических параметров обработки (геометрия упрочняющего ролика, радиус впадины и т.д.) при создании оптимального распределения остаточных напряжений. Это говорит о комплексном подходе к решению проблемы повышения надежности резьбовых соединений.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния внутренних напряжений и величины зазора на предельный крутящий момент резьбовых соединений бурильных труб ТБСВ. Целью работы является разработка рекомендаций по оптимизации технологических параметров сборки резьбовых соединений, направленных на повышение их надежности в условиях эксплуатации. Для достижения поставленной цели были проведены численные расчеты с использованием метода конечных элементов и экспериментальные исследования с использованием специализированного оборудования. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых технологий сборки и контроля качества резьбовых соединений бурильных труб, а также при оценке их ресурса и надежности.

Традиционно, в геологическом бурении наибольшее распространение получили бурильные трубы с резьбовыми соединениями типов ТБСУ (геологоразведочные по ГОСТ Р 51245-99 <https://zbo.ru/product/tbsu-tbsn-tbso-tbl-lbtn-tbd-102-shtangi-burilnye/truby-burilnye-stalniye-universalnye-tbsu/>) и ТБСО (облегченные <https://zbo.ru/product/tbsu-tbsn-tbso-tbl-lbtn-tbd-102-shtangi-burilnye/truby-burilnye-stalniye-oblegchennye-tbso/>).

Однако по информации [2], несмотря на длительную историю применения данных типов соединений, их качество, в частности, у наиболее современных производителей, характеризуется неоднородностью. Это, в свою очередь, негативно сказывается на общей надежности бурильной колонны, особенно в условиях возросших нагрузок, вызванных нарушением регламентов эксплуатации, превышением диаметра бурильных скважин и внезапными нагрузками, приводящими к преждевременному отказу соединений.

С целью повышения прочности бурильных труб указанных типов, были разработаны новые конструкции резьбовых соединений, в частности, с двумя упорными стыками. При этом учитывались недостатки существующих двухзаходных соединений, применяемых в геологоразведочном бурении с осевым керноприемником и в глубоком бурении на нефть и газ. В результате оптимизации параметров резьбы в двухзаходных соединениях были установлены взаимосвязи между площадью наружного, внутреннего стыка и опасного сечения его ниппеля. Разработан способ контроля зазора во внутреннем стыке путем прямого измерения его величины.

Разработанная конструкторская документация на двухзаходное соединение позволила изготовить и испытать опытные образцы на предельный крутящий момент. Испытания показали, что новые соединения по предельному крутящему моменту превосходят базовые (серийные) на 40-50 %, а по предельному изгибающему моменту на 10%. Данный результат подтверждает перспективность данного направления исследований, направленного на существенное повышение прочности резьбового соединения бурильных труб без изменения их габаритных размеров и применяемого материала.

Вместе с тем, анализ существующих разъемных резьбовых соединений показал, что потенциал конструкций, включающих два упорных стыка, используется не в полной мере, что связано с нерациональным соотношением площади упорных торцов муфты, ниппеля и опасного сечения последнего. Дальнейшим направлением исследований является оптимизация параметров двухзаходного резьбового соединения, а именно, обеспечение необходимой величины зазора во внутреннем стыке для создания заданных напряжений в опасном сечении ниппеля и во внутреннем упорном стыке.

В известных конструкциях двухзаходных резьбовых соединений величина зазора во внутреннем стыке зачастую не имеет достаточного технического обоснования. Опыт эксплуатации бурильных труб с подобными соединениями, в частности, в составе комплексов со съемным керноприемником, выявил нестабильность их эксплуатационных характеристик, выражающуюся в слабой корреляции между обрывами по резьбовому соединению и фактической наработкой в скважине. Результаты стендовых испытаний на знакопеременный

изгиб образцов бурильных труб диаметром 63,5 мм и толщиной стенки 6 мм с замковой резьбой также подтвердили существенное различие в циклической долговечности при одинаковых параметрах изгибающего момента и момента затяжки.

Нестабильность циклической долговечности таких соединений обусловлена несоответствием величины зазора во внутреннем упорном стыке соотношению сил, необходимых для создания требуемых напряжений во внутреннем упорном стыке и в опасном сечении ниппеля. Согласно СТП 0004-2015, расстояние между упорными торцами и уступами наружной резьбы (условно ниппель) и внутренней резьбы (условно муфта) для замковых резьб установлено в диапазоне 0,1...0,65 мм для муфты.

Однако, широкий диапазон величины зазора во внутреннем стыке не позволяет обеспечить после затяжки резьбы требуемые нагрузки и напряжения, соответствующие площади опасного сечения ниппеля и внутреннего упорного стыка. Подтверждено, что диапазон разброса значений зазора во внутреннем стыке коррелирует с различием в циклической долговечности испытанных образцов.

Таким образом, для обеспечения прочности и герметичности двухзаходного резьбового соединения, величина зазора во внутреннем упорном стыке соединения должна обеспечивать после затяжки создание заданных нагрузок и соответствующих им напряжений в опасном сечении ниппеля и во внутреннем упорном стыке. Исследование данного вопроса является одной из ключевых задач представленной работы.

Как было отмечено ранее, произвольный выбор величины зазора во внутреннем стыке без учета деформаций ниппеля и муфты не обеспечивает создание требуемых нагрузок и напряжений в резьбовом соединении, соответствующих площади опасного сечения ниппеля и внутреннему упорному стыку. Величина зазора во внутреннем упорном стыке соединения должна обеспечивать после затяжки создание заданных нагрузок и соответствующих им напряжений в опасном сечении ниппеля, как на наружном, так и во внутреннем упорном стыке.

В случае одновременного контакта обоих упорных стыков при ручном свинчивании ключом, сила затяжки ограничивается величиной, обусловленной прочностью внутреннего упорного стыка, площадь которого в 1,14 раза меньше площади наружного. Следовательно, сила затяжки в опасном сечении ниппеля оказывается соответственно меньше требуемой.

При условии, что при свинчивании ключом вручную сначала контактирует только наружный упорный стык, величина зазора во внутреннем стыке должна обеспечивать опережающее нагружение наружного стыка в процессе затяжки [17]. Данное опережение должно быть рассчитано таким образом, чтобы к концу процесса свинчивания напряжения на внутреннем стыке были близки к пределу текучести материала соединения. Указанное положение было сформулировано в виде формулы изобретения от АО «Завод бурового оборудования» [18]. Согласно формуле изобретения «Двухупорное резьбовое соединение буровых труб», величина зазора во внутреннем стыке при ручном свинчивании соединения до

упора, но без приложения максимального момента, должна определяться из следующей зависимости (1):

$$\delta = \left(1 - \frac{Q_{\text{вус}}}{Q_{\text{осн}}}\right) \cdot \Delta I_{\text{н}} + \Delta I_{\text{м}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{вус}}$ и $Q_{\text{осн}}$ – силы, необходимые для создания заданных напряжений соответственно во внутреннем упорном стыке и опасном сечении ниппеля;

$\Delta I_{\text{н}}$ и $\Delta I_{\text{м}}$ – удлинение и укорочение резьбового участка соответственно ниппеля и муфты при затяжке соединения.

Величина

$$Q_{\text{осн}} = S_{\text{осн}} \cdot \sigma_{\text{т}} \cdot K_3 = 2136 \cdot 820 \cdot 0,66 = 1208548,8 \text{ Н},$$

где $S_{\text{осн}}$ – площадь опасного сечения ниппеля, мм²;

$\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести материала соединения, Н/мм²;

K_3 – коэффициент затяжки резьбового соединения.

Величина

$$Q_{\text{вус}} = S_{\text{вус}} \cdot \frac{\sigma_{\text{т}}}{\vartheta} = 1393 \cdot \frac{820}{1,2} = 951823,1 \text{ Н},$$

где $S_{\text{вус}}$ – площадь внутреннего упорного стыка, мм²;

ϑ – запас прочности.

Величина удлинения ниппеля

$$\Delta I_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{осн}} \cdot I_{\text{н}}}{E \cdot S_{\text{псн}}} = \frac{1208548,8 \cdot 62,9}{2 \cdot 10^5 \cdot 1955,6} = 0,194 \text{ мм},$$

где E – модуль упругости материала детали соединения, Н/мм²;

$I_{\text{н}}$ – длина резьбового участка ниппеля, мм;

$S_{\text{псн}}$ – площадь поперечного сечения резьбового участка ниппеля посередине его длины, мм².

Аналогично укорочение для муфты

$$\Delta I_{\text{м}} = \frac{1208548,8 \cdot 61}{2 \cdot 10^5 \cdot 2270} = 0,162 \text{ мм}.$$

Введя в выражение (1) полученные величины сил и величин удлинений и укорочений соответственно ниппеля и муфты, получаем оптимальную величину зазора для двухупорного соединения с резьбой 3-66.

$$\delta = \left(1 - \frac{951823,1}{1208548,8}\right) \cdot 0,194 + 0,162 = 0,203 \text{ мм}.$$

Таким образом, при сомкнутом, но ненагруженном наружном стыке, зазор во внутреннем стыке должен составлять 0,203 мм.

Очевидно, что в процессе серийного производства выполнить все соединения с одним и тем же зазором во внутреннем упорном стыке невозможно. Полученная величина указывает на то, что диапазон зазоров во внутреннем стыке двухупорного соединения данного размера находится в области этой величины и определить этот диапазон возможно только опытным путем в процессе испытаний натуральных образцов данного соединения.

Чертежи на ниппель и муфту были разработаны в соответствии с результатами оптимизации основных параметров двухзаходного резьбового соединения, обеспечивая сохранение габаритных размеров труб. Выбор химического состава стали 40ХН, а также режимов термической обработки (улучшения) и карбонитрации, был обусловлен необходимостью достижения механических свойств и микроструктуры, идентичных базовым образцам, что позволило обеспечить сопоставимость результатов испытаний.

В связи с экономической нецелесообразностью проектирования и изготовления резьбовых калибров были спроектированы и изготовлены гладкие калибры для контроля конусов ниппеля и муфты, а также шаблоны с предельными щупами для измерения их межопорных расстояний. Отсутствие резьбовых калибров компенсировалось более детальными измерениями высокоточным профилометром всех параметров профиля резьбы. Контроль величины зазора во внутреннем стыке осуществлялся с помощью профилометра MARSURF XR-20 с заявленной точностью ± 2 мкм.

Всего было изготовлено 18 образцов двухзаходных соединений с резьбой ЗБО-66. После проведения пробных испытаний для отработки методики, в частности, для обеспечения требуемой точности задания крутящих моментов и проведения измерений упругих и остаточных деформаций упорных торцов муфты (наружный стык) и ниппеля (внутренний стык), непосредственно испытаниям на предельный крутящий момент были подвергнуты 12 образцов.

Методика испытаний образцов новых соединений была аналогична методике испытаний серийных (базовых) образцов. Отличие заключалось в усложнении процедуры измерений, а именно, измерениям подвергались деформации не только торца муфты, но и ниппеля. Измерения проводились микрометром с точностью ± 2 мкм с последующим округлением до 0,01 мм. Результаты испытаний приведены на рисунке 1 в виде графика зависимости предельного крутящего момента затяжки соединения и остаточных деформаций ниппеля и муфты от зазора во внутреннем стыке.

Анализ представленного графического материала показывает, что при величине зазора во внутреннем стыке 0,12 мм предельный крутящий момент в среднем составляет 11100 Н·м, что на 45 % превышает значение базового соединения. По мере увеличения зазора до 0,19 мм достигается максимальный предельный крутящий момент, равный 11500 Н·м, а это соответствует превышению в 51 % относительно базового значения.

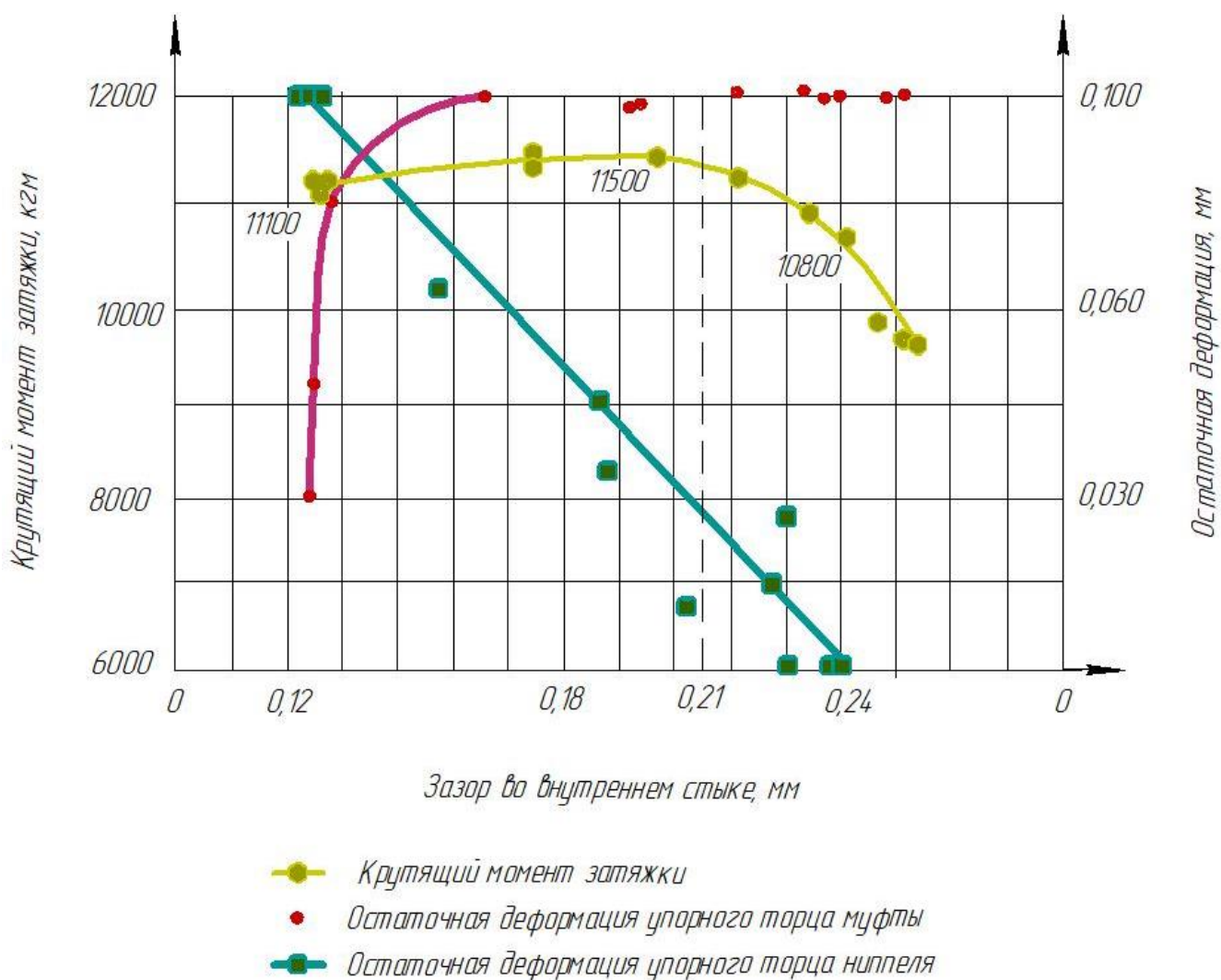


Рисунок 1 – График зависимости предельного крутящего момента затяжки соединения и остаточных деформаций ниппеля и муфты от зазора во внутреннем стыке

Следует отметить, что полученные результаты демонстрируют высокую сходимость с расчетными данными, согласно которым оптимальная величина зазора составляет 0,2 мм, а превышение предельного крутящего момента – 50 %.

В диапазоне зазоров от 0,2 до 0,23 мм наблюдается незначительное снижение предельного крутящего момента, после чего данное снижение несколько ускоряется. При величине зазора 0,24 мм крутящий момент составляет 10800 Н·м, что превышает значение базового соединения на 42%. Дальнейшее увеличение зазора до 0,26 мм приводит к резкому снижению крутящего момента, при этом вся остаточная деформация от затяжки концентрируется на наружном стыке, а внутренний стык испытывает только упругие деформации.

Результаты проведенных исследований позволили установить оптимальный диапазон величин зазора во внутреннем стыке двухзаходного резьбового соединения, равный 0,12-0,24 мм. Соблюдение данного диапазона величин зазора, как было показано, обеспечивает повышение предельного крутящего момента до уровня не менее 10800 Н·м, что на 42% превышает аналогичный показатель для

базовых соединений. При этом деталь признается непригодной для использования, если величина зазора в собранном состоянии превышает 0,24 мм.

Несмотря на достигнутые положительные результаты, дальнейшие исследования и испытания необходимы для полной оценки потенциала разработанного соединения, однако уже сейчас можно отметить, что:

- разработано новое двухзаходное резьбовое соединение ЗБО-66 для бурильных труб ТБСН, в котором параметры резьбы оптимизированы в соответствии с патентом АО «Завод бурового оборудования» [19];

- обоснован и разработан диапазон величин зазора во внутреннем стыке соединения в соответствии с изобретением. Результаты внедрения разработанного резьбового соединения обеспечивают увеличение предельного крутящего момента на 40–50 % и предельного знакопеременного изгибающего момента на 10 %.

Результаты аналитических и экспериментальных исследований подтверждают целесообразность использования бурильных труб с двухзаходным соединением в сравнительных предварительных испытаниях в сложных геолого-технических условиях геологоразведочного бурения. Применение бурильных труб с новым двухзаходным соединением позволяет постепенно заменять серийные варианты бурильных труб данного типа.

Однако необходимо отметить, что серийные варианты бурильных труб ТБСН, выпускаемые в соответствии с существующими стандартами, не всегда обладают достаточными эксплуатационными характеристиками, в частности, из-за недостаточной эффективности операций карбонитрации резьбы. Полученные результаты свидетельствуют о возможности достижения более высоких показателей при использовании нового соединения в традиционном бурении. Применение нового соединения в комплексе с бурильными трубами типа WL, для которых увеличение крутящего момента является критически важным параметром, может оказаться эффективным средством повышения надежности в процессе эксплуатации [20].

Таким образом, разработанное усовершенствование резьбового соединения способствует повышению надежности и эффективности бурильных труб в различных условиях.

Список использованной литературы

1. Песин, М. В. Пути решения проблемы разрушения резьбовых соединений нефтепромыслового и бурового оборудования / М. В. Песин, Д. А. Субботин, М. А. Баева [и др.] // Экспозиция Нефть Газ. – 2015. – №4 (43). – С. 18-20.
2. Разрушения резьбовых соединений бурильных труб. Пути решения проблем. – Режим доступа: <https://xn--90a6abg.xn--p1acf/articledrillpipe> (дата обращения 12.05.2025).
3. Песин, М. В. Исследование остаточных напряжений при упрочнении резьбы бурильных труб / М.В. Песин // Экспозиция Нефть Газ. – 2018. – №4 (64). – С. 67-69.

4. Песин, М. В. Развитие цифровых технологий в исследовании остаточных напряжений / М.В. Песин, В. Ф. Макаров // Экспозиция Нефть Газ. – 2019. – №1 (68). – С. 53-55.
5. Мокроносов, Е. Д. Повышение надежности бурильных труб на стадии проектирования путем использования математического моделирования процесса упрочнения резьбовой поверхности / Е. Д. Мокроносов, М. В. Песин // Экспозиция Нефть Газ. – 2013. – №2 (27). – С.56-57.
6. Песин, М. В. Прогрессивные технологии изготовления труб для бурения нефтяных и газовых скважин / М. В. Песин, В. Ф. Макаров // Экспозиция Нефть Газ. – 2019. – №5 (72). – С. 66-68.
7. Халтурин, О. А. Анализ влияния отклонений геометрии на напряжения в замковом резьбовом соединении / О. А. Халтурин // Современные проблемы науки и образования [Электронный ресурс]. – 2014. – № 2. – 7 с. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/pdf/2014/2/418.pdf>. (дата обращения 22.05.2025).
8. Макаров, В. Ф. Моделирование напряженно-деформированного состояния в резьбовой поверхности в процессе сборки деталей бурового оборудования / В. Ф. Макаров, М. В. Песин, О. А. Халтурин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2022. – № 8. – С. 366-369.
9. Халтурин, О. А. Повышение долговечности резьбовых соединений бурильных труб на основе моделирования и выбора рационального момента затяжки при сборке : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: специальность 2.5.6 –Технология машиностроения. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – 2023. – 18 с.
10. Семин, В. И. Современные методы проектирования резьбовых соединений труб нефтегазового сортамента для строительства скважин : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: специальности 25.00.15 –Технология бурения и освоения скважин, 05.02.13 – Машины, аппараты и процессы (нефтегазовая отрасль). – Москва: ОАО НПО «Буровая техника». – 2005. – 52 с.
11. Песин, М. В. Актуальные решения в упрочнении высоконагруженных поверхностей деталей бурового и нефтепромыслового оборудования / М. В. Песин, В. Ф. Макаров, Е. С. Макаренков, Т. И. Сахаутдинов // Сфера. Нефть Газ. – 2022. – №2 (85). –С. 56-60.
12. Насери, Ясин Разработка технологических решений предупреждения аварий при бурении скважин моделированием резьбовых соединений бурильного инструмента : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: специальность 25.00.15 –Технология бурения и освоения скважин. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина. – 2019. – 24 с.
13. Песин, М.В. Технологическое обеспечение и повышение долговечности бурильных труб на основе моделирования и управления параметрами упрочняющей обработки резьбы : автореферат диссертации на

соискание ученой степени доктора технических наук: специальность 05.02.08 – Технология машиностроения. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – 2018. – 34 с.

14. Канчурин, Р. Я. Система автоматизированного проектирования профиля резьбы бурильных труб [Электронный ресурс] / Р. Я. Канчурин, Е. С. Тулибаев, А. С. Русяев // Шаг в науку. – 2023. – № 4. – С. 57-63. – Режим доступа: http://artlib.osu.ru/web/books/article_all/197647_20231226.pdf (дата обращения 12.05.2025).

15. Атамашкин, А.С. Предел выносливости и механизм разрушения фрикционных сварных соединений геологоразведочных бурильных труб в условиях многоциклового усталости / А. С. Атамашкин, Е. Ю. Приймак, Е. С. Тулибаев, А. В. Степанчукова // Черные металлы. – 2021. – № 5 (1073), май. – С. 33-38. – DOI: 10.17580/chm.2021.05.06. – Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/2017/article/33871/?language=ru> (дата обращения 12.05.2025).

16. Лачинян, Л.А. Работа бурильной колонны / Л.А. Лачинян. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра. – 1992. – 214 с.: ил.

17. Тулибаев, Е. С. Двухупорное высокомоментное резьбовое соединение бурильных труб [Электронный ресурс] / Е. С. Тулибаев // Современная механика в цифровую эпоху: проблемы и перспективы : сб. материалов Всерос. молодеж. науч.-практ. конф., Оренбург, 16-17 июня 2022 г. / Оренбург. гос. ун-т ; редкол.: С. Н. Летута, Е. В. Пояркова, Ю. А. Чирков, Е. В. Дырдина. – Оренбург : ОГУ. – 2022. – С. 69-72. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50205614> (дата обращения 12.05.2025).

18. Патент RU 2 616 950 C2 по МПК E21B17/42 F16L15/00 Двухупорное резьбовое соединение буровых труб / Л. А. Лачинян, А. К. Медведев. – 2017. – Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002616950-20170418_C2_RU/ (дата обращения 22.05.2025).

19. Патент RU 2 549 620 C1 по МПК E21B17/42 Резьбовое соединение бурильных труб / Л. А. Лачинян, А. К. Медведев. – 2015. – Режим доступа: <https://patenton.ru/patent/RU2549620C1> (дата обращения 22.05.2025).

20. Резьбовое соединение тонкостенных бурильных труб / С. А. Кривов, Е. Ю. Приймак, А. В. Степанчукова, Е. С. Тулибаев, И. Б. Минаева, В. В. Носиков. – Патент на полезную модель RU 195764 U1. – опубл. 05.02.2020. – Заявка № 2019132227 от 11.10.2019.

TO THE QUESTION OF INCREASING THE RELIABILITY OF THREADED JOINTS OF DRILL PIPES UNDER OPERATING CONDITIONS

Tulibaev^{1, 2} Egor Sagitovich, Senior Lecturer, Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines¹, Chief designer of the bureau for the development of drilling tools²

Poyarkova¹ Ekaterina Vasilievna, Head of the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

¹Orenburg State University

²JSC «Drilling Equipment Plant»

Abstract: *This paper considers the issues of increasing the reliability of threaded joints of drill pipes used in difficult operating conditions. The influence of internal stresses and the gap size on the ultimate torque of the joint, which is a critical parameter determining its strength and durability, is analyzed. Based on the results of modeling and analysis of experimental data, an approach to optimizing the process parameters of the assembly of threaded joints of TBSV is proposed, aimed at increasing their reliability and preventing premature failures.*

The study allows us to identify critical factors affecting the strength of threaded joints of drill pipes and offer recommendations for increasing their operational reliability. The obtained results can be used in the development of assembly processes, as well as in the resource assessment and maintenance of drill strings.

Keywords: *double-shoulder connection, threaded connection, thrust joints, tightening torque, gap, drill pipes, internal stresses, torques, deformations, strength, tightness.*

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: ОТ ДРОНОВ ДО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Кожевникова Арина Павловна, Никулина Анастасия Игоревна

Оренбургский государственный университет

Аннотация: В данной работе рассмотрена необходимость внедрения инновационных методов контроля качества для повышения точности, безопасности и эффективности процессов. В статье рассматриваются три ключевые технологии: беспилотные летательные аппараты (БПЛА), 3D-сканирование и искусственный интеллект (ИИ). Работа выполнена на кафедре механики материалов, конструкции и машин Оренбургского государственного университета **под руководством Поярковой Екатерины Васильевны**, доктора технических наук, доцента, заведующего кафедрой.

Ключевые слова: строительство, контроль качества, инновационные технологии, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), 3D-сканирование, искусственный интеллект (ИИ), цифровой двойник, BIM-моделирование, предиктивная аналитика, автоматизация, мониторинг, дефекты, экономическая эффективность.

Код и рубрика: 67.00.00 Строительство. Архитектура

Современная строительная отрасль служит основой экономического развития и удовлетворения социальных нужд [1]. Однако обеспечение качества строительных процессов остаётся критически важной задачей, требующей постоянного совершенствования. Просчёты на этапах проектирования и возведения объектов способны привести к катастрофическим последствиям: авариям инфраструктуры, человеческим жертвам и многомиллионным убыткам.

В условиях технологической революции и ужесточения стандартов особую значимость приобретает внедрение инновационных методов контроля. Современные инструменты не только повышают точность проверок, но и оптимизируют процессы, сокращая сроки реализации проектов. Среди ключевых технологий выделяются:

1. Дистанционное зондирование – мониторинг объектов через спутники и дроны;
2. 3D-сканирование – создание цифровых двойников для анализа деформаций;
3. Искусственный интеллект – прогнозирование рисков на основе Big Data.

Каждая из этих технологий обладает уникальными преимуществами, но также имеет технические и экономические ограничения, которые необходимо учитывать.

Приоритетом для отрасли должно стать сочетание традиционных подходов с инновациями. Например, интеграция ИИ-алгоритмов в систему проверки сварных швов позволяет выявлять микротрещины, невидимые человеческому глазу, а

лазерное сканирование мостов обнаруживает деформации на ранних стадиях. Это не только снижает риски аварий, но и укрепляет доверие заказчиков.

Для поддержания конкурентоспособности необходимы [2]:

- инвестиции в R&D – разработка адаптивных систем контроля;
- обучение кадров – подготовка специалистов, работающих с цифровыми инструментами;
- стандартизация – создание единых протоколов для новых технологий.

Только комплексный подход к внедрению инноваций обеспечит прорыв в качестве строительства, минимизировав риски и максимизировав эффективность. Будущее отрасли — в симбиозе человеческого опыта и возможностей технологий.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и дистанционное зондирование: революция в строительном контроле качества.



Рисунок 1 – Применение БПЛА в строительстве [9]

Строительная отрасль, сталкиваясь с хронической неэффективностью процессов, тратит более 35% рабочего времени на рутинные операции: сбор данных, исправление ошибок и согласование действий. Эти потери приводят к срыву сроков и удорожанию проектов. Ключевой вызов современности – преодоление разрыва между цифровыми чертежами и их физическим воплощением. Решением становятся БПЛА – беспилотные воздушные суда, управляемые дистанционно или автономно, – интегрированные в технологию дистанционного зондирования (Remote Sensing).

Дистанционное зондирование основано на анализе электромагнитного излучения, взаимодействующего с поверхностью. Датчики на БПЛА, спутниках или самолётах фиксируют отражённые волны, преобразуя их в спектральные данные [2]. Например, бетон отражает волны иначе, чем металл, что позволяет

выявлять скрытую коррозию арматуры, а влажный грунт поглощает излучение в другом диапазоне, чем сухой, сигнализируя о рисках просадки фундамента.

Таблица 1 – Типы дронов в строительстве

Тип дронов	Применение	Преимущества	Ограничения
Мультикоптер	Инспекция фасадов, мониторинг	Зависание, маневренность	Короткое время полета
Fixed-wing	Топосъемка больших площадей	Дальность, стабильность	Требует взлетной полосы
Гибридный (VTOL)	Линейные объекты, труднодоступные зоны	Универсальность	Высокая стоимость
Дроны с LiDAR	Создание 3D-моделей	Работа в темноте, точность	Очень высокая стоимость

Преимущества в строительстве:

1. Масштабный охват и доступность БПЛА, которые обследуют объекты площадью 100+ Га за один полёт, добираясь до зон, недоступных для человека: карьеры, крутые склоны, высотные конструкции. При строительстве Крымского моста дроны с LiDAR ежедневно сканировали морское дно, отслеживая смещения грунта под опорами.

2. Скорость и точность используемых приборов и инструментария, например, тепловизоры на БПЛА выявляют теплопотери в изоляции зданий за 2–3 часа вместо недели ручных замеров. Алгоритмы на базе ИИ (например, U-Net) анализируют ортофотопланы с разрешением 1 см/пиксель, автоматически детектируя трещины шириной от 0,5 мм.

3. Также важным является проактивное управление рисками. Так, на примере трассы М-12 «Москва–Казань» мультиспектральная съёмка выявила участки эрозии почвы ещё до начала работ. Это позволило укрепить грунт геосинтетиками, предотвратив будущие просадки полотна.

Вместе с тем, в качестве преимуществ применения БПЛА в строительстве можно выделить:

- контроль материалов, когда гиперспектральные камеры на дронах определяют неравномерность твердения бетона по изменению химического состава поверхности;

- мониторинг дефектов. Например, на стройплощадке «Лахта Центра» БПЛА еженедельно фиксировалась геометрия фасадов, сравнивая облака точек с BIM-моделью. Отклонения >5 мм немедленно корректировались;

- экологический аудит. К примеру, при возведении АЭС «Аккую» спутниковые снимки Sentinel-2 отслеживали мутность морской воды, предотвращая нарушения при укладке подводных трубопроводов.

Экономический эффект от внедрения БПЛА сокращает затраты на геодезию и контроль качества на 40–60%. Например, компания «Стройгазконсалтинг» снизила расходы на мониторинг магистральных трубопроводов на 57% за счёт замены вертолётных облётов дронами.

Однако, помимо преимуществ, могут быть и ограничения в решениях в виде погодных помех (например, сильный ветер (>15 м/с) или дождь, которые ограничивают полёты). Решением этой проблемы может быть использование БПЛА с закрытыми роторами (тип DJI Matrice 300).

Также существуют и юридические барьеры, к примеру, в РФ для полётов над стройплощадками требуется разрешение Росавиации.

Перспективы для использования дронов: интеграция БПЛА с ИИ-платформами типа Propeller Aero создаёт «цифровых двойников» стройплощадок в реальном времени. Датчики IoT на объектах передают данные о вибрациях или температуре прямо на дроны, которые точно обследуют проблемные зоны. К 2030 году 90% инспекций высотных конструкций будут выполняться автономными роями БПЛА, снижая травматизм на 70%. Беспилотные технологии открывают путь к принципиально новым, более эффективным способам контроля качества.

Если дроны обеспечивают скорость, реактивность и точечный контроль, то для создания единого, всеобъемлющего цифрового образа объекта, который лежит в основе всего – от проектирования до эксплуатации – незаменимо 3D-сканирование и его симбиоз с BIM моделированием. Лазерное сканирование, как часть бесконтактных методов измерений, стало основой для создания цифровых двойников – точных виртуальных копий объектов, объединяющих геометрию, физические свойства и эксплуатационные данные. По определению экспертов, таких как Е.Н. Рыбин, BIM-модель представляет собой не просто набор чертежей, а динамическую систему данных, привязанную к координатам объекта и способную эволюционировать на всех этапах его жизненного цикла [3].

Принцип работы лазерного сканирования основан на измерении времени возврата лазерного луча, отраженного от поверхностей. Например, при сканировании промышленного цеха оборудование захватывает не только стены и перекрытия, но и мельчайшие элементы вроде болтовых соединений или кабельных каналов. Полученные данные конвертируются в полигональные сетки или CAD-модели с помощью специализированного ПО, такого как Autodesk ReCap, где алгоритмы удаляют шумы (например, случайные тени или движущихся людей) и совмещают отдельные сканы в единую цифровую модель.

Ключевое преимущество технологии – её способность радикально сокращать временные и финансовые затраты. Если раньше обмеры исторического здания требовали недель работы с рулетками и нивелирами, то современный сканер выполняет эту задачу за несколько часов, как это было при реконструкции усадьбы Кусково в Москве. Кроме того, технология минимизирует риски для персонала: вместо подъемников и лесов инженеры используют дроны со встроенными сканерами для обследования фасадов небоскребов или мостовых опор. Например, при инспекции Шуховской башни в Москве лазерное сканирование выявило деформации элементов, невидимые при визуальном осмотре, что позволило разработать точечную программу укрепления конструкций.

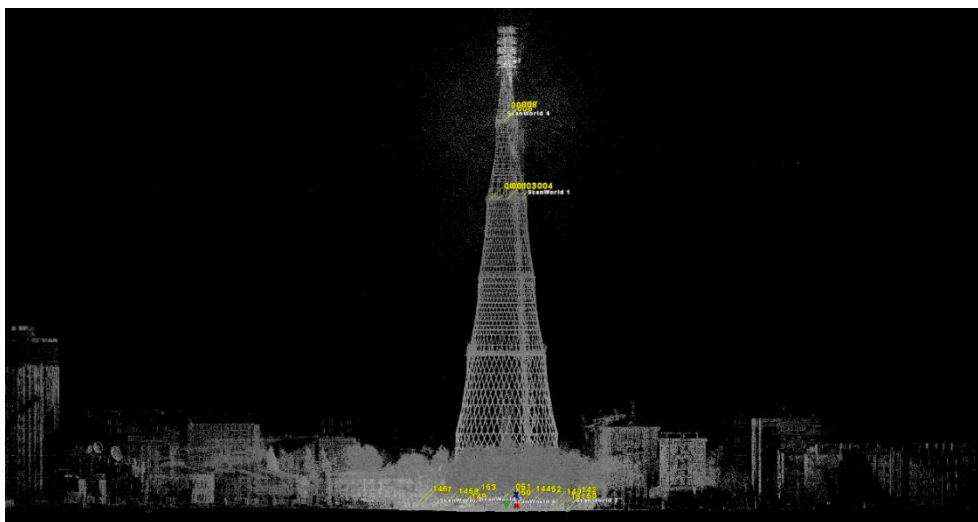


Рисунок 2 – 3D модель Шуховской башни при лазерном сканировании [8]

Однако у технологии есть и ограничения. Стекло или полированные металлы отражают лазерный луч, создавая «слепые зоны» в облаке точек – проблему частично решают матирующие аэрозоли, временно изменяющие отражательную способность материалов. Работа в условиях вибрации, например, на действующих заводах, требует использования импульсных сканеров с фильтрацией шумов, а мороз или высокая влажность могут повредить чувствительную оптику.

Несмотря на эти минусы, 3D-сканирование уже меняет отрасль. При реставрации завода Крупна в Эссене (Германия) сканирование выявило скрытые вентиляционные шахты XIX века, что позволило интегрировать их в современную систему климат-контроля, сократив бюджет проекта на 15%. В рамках BIM такие модели становятся «живыми» – при ремонте моста инженеры вносят изменения прямо в цифровой двойник, а алгоритмы автоматически пересчитывают нагрузки и сроки поставки материалов.

Внедрение 3D-сканирования требует не только инвестиций в «железо», но и переподготовки кадров. Инженеры учатся работать с облачными точками вместо чертежей, а архитекторы осваивают VR-шлемы для навигации по цифровым двойникам. Однако результат стоит усилий: на стройплощадке «Лахта Центра» в Санкт-Петербурге сканирование сократило количество ошибок монтажа на 40%, а в перспективе такие технологии станут стандартом для любого объекта – от метрополитена до частного коттеджа, делая строительство не только быстрее, но и безопаснее.

Важно понимать: такие технологии, как дистанционное зондирование и 3D сканирование раскрывают весь потенциал только вместе с другими технологиями. Например, искусственный интеллект берет данные, полученные дронами и сканерами, и превращает их в умные решения. Вместе эти технологии становятся мощным инструментом, который поможет реализовать поставленные Президентом России национальные цели и сделать строительную отрасль, занимающую 10% ВВП, двигателем всей экономики.

Развитие технологий ИИ сегодня – приоритетное направление для совершенствования строительной отрасли и обеспечения устойчивого развития экономики России.

ИИ снижает затраты за счет автоматизации бизнес-процессов, предлагает предиктивную аналитику хода строительства и оптимизирует распределение ресурсов [5].

Основные направления применения ИИ в строительной отрасли:

- проектирование и создание виртуальных двойников зданий
- интеллектуальная обработка строительной документации
- мониторинг и контроль за выполнением строительных работ

В строительной отрасли производительность труда увеличилась на 40% благодаря внедрению технологий ИИ.

Таблица 2 – Применение ИИ в контроле качества.

Тип данных	Задачи ИИ	Технологии ИИ	Примеры ПО
Фото/видео	Обнаружение дефектов	Computer Vision, CNN	Skycatch, Doxel
3D-сканы	Отклонения от проекта	3D-анализ, сопоставление	Autodesk ReCap
Данные датчиков	Прогнозирование прочности бетона	ML, LSTM-сети	Sensera, Pillar
BIM-модели	Проверка коллизий	NLP, графовые сети	BIM 360, OpenSpace AI

Данная отрасль переживает глубокую трансформацию, вызванную необходимостью соответствовать растущим темпам строительства и ужесточающимся стандартам безопасности. Традиционные методы контроля качества, основанные на ручных проверках и лабораторных испытаниях, всё чаще демонстрируют свою неэффективность. Человеческий фактор, ограниченные технические возможности оборудования, высокая ресурсоёмкость и проблемы стандартизации данных — всё это создаёт риски для надёжности объектов. Например, визуальный осмотр часто пропускает микротрещины в бетоне шириной менее 0.1 мм, а ручные замеры геометрии конструкций могут занимать недели, особенно на масштабных проектах. Устаревшие подходы не только замедляют процессы, но и повышают вероятность ошибок, как это произошло при обрушении потолка в немецкой школе в 2018 году, где дефекты арматуры остались незамеченными.

Ответом на эти вызовы становятся технологии искусственного интеллекта (ИИ), открывающие новые горизонты для автоматизации и повышения точности контроля. Машинное обучение, компьютерное зрение и нейронные сети позволяют не только обнаруживать дефекты, но и прогнозировать поведение материалов в экстремальных условиях. Компьютерное зрение, к примеру, анализирует изображения с дронов или производственных камер, выявляя трещины, неровности и отклонения от проектных параметров. На шведском заводе ЖБИ внедрение такой

системы сократило процент брака на 25% за счёт мгновенного сканирования каждой бетонной плиты – процесс, занимающий у человека несколько минут, алгоритм выполняет за 0.3 секунды. Параллельно предиктивная аналитика, обрабатывая данные о составе бетона, влажности и температурных нагрузках, моделирует его долговечность, помогая инженерам оптимизировать проектные решения [4].

Ключевое преимущество ИИ – способность работать с большими массивами данных, интегрируя информацию из разных источников. Датчики IoT, встроенные в конструкции, передают данные о вибрациях, деформациях и температуре в режиме реального времени, а BIM-модели дополняются этими сведениями, создавая «цифровых двойников» объектов. Это позволяет не только контролировать качество на этапе строительства, но и прогнозировать износ материалов в течение всего жизненного цикла здания. Например, при реконструкции исторического здания в Париже 3D-сканирование и ИИ-анализ выявили скрытые деформации стен, что позволило укрепить конструкции без повреждения фасада.

Однако внедрение ИИ сопряжено с трудностями. Основная проблема – необходимость больших объёмов размеченных данных для обучения алгоритмов. В строительстве, где каждая конструкция уникальна, формирование таких баз только начинается. Высокая стоимость оборудования и программного обеспечения, потребность в квалифицированных кадрах (дата-сайентистах, инженерах автоматизации) и отсутствие чётких нормативных стандартов также тормозят распространение технологии. Например, в ЕС использование дронов для мониторинга стройплощадок строго регламентировано, что замедляет их внедрение. Кроме того, ИИ-системы демонстрируют ограниченную универсальность: алгоритм, обученный на данных бетонных конструкций, может оказаться бесполезным для анализа деревянных балок без дополнительной настройки.

Перспективы развития связаны с преодолением этих барьеров. Интеграция ИИ с облачными платформами упростит доступ к глобальным базам данных, а развитие мобильных решений позволит рабочим на стройплощадках использовать смартфоны для мгновенной проверки качества кладки или сварных швов. Уже сегодня дроны с ИИ-алгоритмами автоматически составляют карты дефектов, а роботизированные лаборатории тестируют материалы на прочность без участия человека. К 2030 году ожидается, что ИИ-системы станут стандартом, сократив время контроля на 70% и минимизировав риски аварий.

Успех этой трансформации зависит от системных изменений. Инвестиции в ИТ-инфраструктуру, обучение персонала и разработку нормативной базы необходимые шаги. Важно понимать, что ИИ не заменяет инженеров, а становится их инструментом, беря на себя рутинные задачи. Это позволяет специалистам сосредоточиться на анализе и стратегических решениях, как это произошло при строительстве тоннеля в Швейцарии, где алгоритмы в режиме реального времени корректировали геометрию стен, предотвращая обрушения. Будущее строительства в симбиозе человеческого опыта и технологий, где точность алгоритмов дополняется креативностью и критическим мышлением инженеров [6].

Таблица 3 – Преимущества и вызовы технологий

Технология	Преимущества	Вызовы
Дроны	Безопасность, скорость, доступность	Регулирование, погода, квалификация
3D-сканирование	Точность, полная цифровая копия	Стоимость, обработка данных
Искусственный интеллект	Автоматизация, объективность, прогнозирование	Данные для обучения, «черный ящик»

Цифровая трансформация строительной отрасли, основанная на совместном использовании дистанционного зондирования (БПЛА), 3D-сканирования и искусственного интеллекта, формирует принципиально новый подход к обеспечению качества и безопасности. Эти технологии не просто дополняют традиционные методы, они создают замкнутый цикл контроля (от сбора данных дронами и сканерами до их интеллектуального анализа ИИ-алгоритмами для прогнозирования рисков и автоматизации решений). Ключевые преимущества заключаются в сокращении сроков на 40–70%, в снижении затрат на 40–60% и минимизации человеческого фактора. Однако для масштабирования инноваций необходимы системные меры:

- во-первых, инвестиции в ИТ-инфраструктуру;
- во-вторых, разработка стандартов для интеграции данных BIM, сканирования и ИИ;
- в-третьих, переподготовка кадров, трансформирующая инженеров в операторов цифровых систем.

Только так строительная отрасль сможет стать настоящим двигателем для нашей экономики. Это поможет ей справиться с главными задачами сегодняшнего дня: строить быстрее, гарантировать безопасность зданий и развиваться с заботой об окружающей среде. Будущее – не в том, чтобы выбирать между новыми технологиями и человеческим опытом, а в том, чтобы они работали рука об руку.

Список использованной литературы

1. Лемешкин, А. В. Инновационные методы контроля качества в строительстве: новые возможности и технологии / А. В. Лемешкин // Экономика строительства. – 2023. – № 5 – С. 80-84. – Режим доступа: / <https://cyberleninka.ru/article/n/inno-vatsionnye-metody-kontrolya-kachestva-v-stroitelstve-novye-vozmozhnosti-i-tehnologii> (дата обращения: 15.05.2025).
2. Носков, И. В. Дрон-технологии в строительстве – современные решения и возможности / И. В. Носков, К. И. Носков, С. В. Тиненская, С. А. Ананьев // Вестник Евразийской науки. – 2020 – №5. – Режим доступа: <https://esj.today/PDF/37SAVN520.pdf> (дата обращения: 15.05.2025).
3. Аширов, Э. Н. 3D-сканирование при обследовании технического состояния зданий / Э. Н. Аширов, К. Г. Пугин // Международный научный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ». – 2025ю – № 2 (83). – Том 1. – С. 697-704. – Режим доступа:

<https://cyberleninka.ru/article/n/3d-skanirovanie-pri-obsledovanii-tehnicheskogo-sostoyaniya-zdaniy> (дата обращения: 15.05.2025).

4. Мункуев, А. М. Контроль и оценка качества строительных материалов с использованием искусственного интеллекта / А. М. Мункуев, М. Е. Заяханов // Международный научный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ». – 2025. – № 5 (86). – Том 3. – С. 1747-1758. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontrol-i-otsenka-kachestva-stroitelnyh-materialov-s-ispolzovaniem-iskusstvennogo-intellekta> (дата обращения: 15.05.2025).

5. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России). – Режим доступа: <https://www.minstroyrf.gov.ru/iskusstvennyy-intellekt-v-stroitelnoy-otrasli/> (дата обращения: 15.05.2025).

6. Хамидов, Б. С. Современные возможности искусственного интеллекта в строительной отрасли / Б. С. Хамидов // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2023. – Том 13. – № 3. – С. 257-266. – Режим доступа: <http://www.publishing-vak.ru/file/archive-economy-2023-3/b23-khamidov.pdf> (дата обращения: 15.05.2025).

7. МРДС 02-08 Пособие по научно-техническому сопровождению и мониторингу строящихся зданий и сооружений, в том числе большепролетных, высотных и уникальных. – М: Правительство Москвы; Госстрой, 2008.

8. 3D-Сканирование Шуховской башни в Москве. – Режим доступа: <https://iterbi.ru/blog/3d-skanirovanie-znamenitoy-shukhovskoy-bashni-na-shabolovskoy-> (дата обращения: 18.05.2025).

9. Применение БПЛА в строительстве. – Режим доступа: <https://slysky.ru/blog/building-dron.html> (дата обращения: 18.05.2025).

INNOVATIVE QUALITY CONTROL METHODS IN CONSTRUCTION: FROM DRONES TO ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Kozhevnikova Arina Pavlovna, Nikulina Anastasia Igorevna

Orenburg State University

Abstract: *This study examines the necessity of implementing innovative quality control methods to enhance the accuracy, safety, and efficiency of construction processes. The article explores three key technologies: unmanned aerial vehicles (UAVs), 3D scanning, and artificial intelligence (AI). The research was conducted at the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines (MMSM) of Orenburg State University under the supervision of E.V. Poyarkova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Doctor of Engineering sciences, associate professor Head of the MMSM Department.*

Keywords: *construction, quality control, innovative technologies, unmanned aerial vehicles (UAVs), 3D scanning, artificial intelligence (AI), digital twin, BIM modeling, predictive analytics, automation, monitoring, defects, cost-effectiveness.*

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ АГРЕССИВНЫХ СРЕД НА СОСТОЯНИЕ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Филимошин Данил Дмитриевич, аспирант, 2 курс

Оренбургский государственный университет

Аннотация. В работе рассматриваются методы оценки воздействия агрессивных сред на насосно-компрессорное оборудование. Выделены ограничения лабораторных, расчётных и натурных подходов, приведена сравнительная таблица. Показано, что корректная оценка возможна только при совместной интерпретации данных, с учётом характера среды, механизмов разрушения и условий эксплуатации. Работа выполнена на кафедре механики и материалов, конструкции и машин Оренбургского государственного университета **под руководством Поярковой Екатерины Васильевны**, доктора технических наук, доцента, заведующего кафедрой.

Ключевые слова: агрессивные среды, насосно-компрессорное оборудование, деградация материалов, коррозия, эрозия, механизмы разрушения, лабораторные испытания, расчётные модели, натурные исследования.

Код и рубрика: 55.01.00 Общие вопросы машиностроения.

Воздействие агрессивных сред на насосно-компрессорное оборудование в условиях реальной эксплуатации представляет собой один из ключевых факторов, определяющих скорость деградации конструктивных элементов и динамику изменения их технического состояния. Агрессивность среды проявляется не только на уровне её химического состава, но и через физико-химические, микробиологические, термические и абразивные механизмы, взаимодействующие и усиливающие совокупный эффект разрушения. При этом разрушение материалов вызывается не столько отдельными компонентами, сколько сложным взаимодействием между ними и переменными параметрами эксплуатации [8, 9, 11].

Наиболее часто в качестве агрессивных компонентов выступают кислоты, щелочи, насыщенные солевые растворы, твердые взвеси, газы (к примеру, сероводород и углекислый газ), а также биологически активные соединения и микроорганизмы. Эти среды провоцируют целый спектр разрушений, начиная с равномерной и питтинговой коррозии и заканчивая кавитационным износом, эрозией, межкристаллитным растрескиванием и микробиологически индуцированной коррозией (MIC). При этом совокупное воздействие двух или более факторов способно значительно ускорить деградацию. Например, химическое воздействие в сочетании с абразивными включениями в рабочей среде приводит к механохимическому износу, а биокоррозия на фоне термических колебаний вызывает сложные очаговые повреждения, плохо поддающиеся диагностике.

Учитывая сложность и многокомпонентность воздействия, становится необходимым систематизировать агрессивные среды не только по химическим или фазовым признакам, но и по характеру разрушения, агрегатному состоянию,

устойчивости условий и кинетике проявления повреждений. Такая структурная классификация позволяет связать особенности среды с конкретными механизмами деградации и условиями эксплуатации. На рисунке 1 представлена обобщенная схема, включающая пять ключевых классификационных признаков: природу воздействия, агрегатное состояние, устойчивость условий, темп разрушения и характер воздействия на оборудование. Данная типология позволяет не только описывать, но и предсказывать наиболее вероятные сценарии отказов в зависимости от среды и режима эксплуатации.



Рисунок 1 – Классификация агрессивных сред по характеру и условиям воздействия на оборудование

Установление взаимосвязи между классификационными признаками среды и наблюдаемыми механизмами разрушения является лишь первым шагом к инженерному осмыслению проблемы. Однако, чтобы полученные структурные сведения приобрели практическую значимость, они должны быть дополнены достоверными оценками фактического воздействия среды на материалы и узлы оборудования. В условиях промышленной эксплуатации это воздействие может отличаться от лабораторных представлений как по интенсивности, так и по характеру. Следовательно, перед специалистами встает задача не только классифицировать среду, но и определить, насколько точно и своевременно можно оценить её влияние в конкретных эксплуатационных условиях.

С этой целью в инженерной и исследовательской практике применяются различные подходы к оценке агрессивности среды и её воздействия на техническое

состояние оборудования. Каждый из них имеет свои преимущества и ограничения, зависящие от условий проведения, набора контролируемых параметров и чувствительности к различным формам деградации. Рассмотрим три основных группы таких методов и оценим их применимость и точность.

Наиболее распространены лабораторные испытания, проводимые в контролируемых условиях с целью воспроизведения воздействия среды на материал. Такие тесты позволяют определить доминирующий механизм разрушения и его интенсивность, но, как показано в работах [1-3, 10], их результаты часто расходятся с фактическим поведением материалов в промышленных системах. Причины расхождений связаны с упрощенными условиями эксперимента: в лаборатории отсутствуют вибрационные нагрузки, не моделируются нестабильные перепады давления и температуры, игнорируются многокомпонентные взаимодействия. В итоге стойкость материалов нередко переоценивается, что приводит к ошибочным проектным решениям.

Параллельно применяются расчетные методы, основанные на эмпирических шкалах агрессивности среды и оценке параметров (рН, минерализация, газовый состав, температура и др.). Однако полевой опыт показывает, что такие модели часто дают значительный разброс, когда условия отклоняются от стационарных, например, при slug-потоке, колебаниях водоотдачи или циклической работе оборудования [4]. В присутствии микроорганизмов ситуация усложняется ещё больше: стандартные методики мониторинга отражают лишь часть процессов, что приводит к выбору неэффективных мер защиты и преждевременному снижению ресурса оборудования [5]. Таким образом, фактический срок службы в агрессивной среде может значительно отличаться от расчетного как при гидродинамических, так и при микробиологических или комбинированных воздействиях.

Дополнительную ценность представляет подход, основанный на наблюдении оборудования в реальных условиях. Визуальный контроль, измерение геометрии, регистрация повреждений и анализ статистики отказов позволяют выявлять тенденции деградации. Однако этот подход носит реактивный характер и не позволяет своевременно вмешиваться до начала разрушения. Кроме того, он не объясняет механизм разрушения, ограничиваясь лишь его следствием, что усложняет выбор корректных мер защиты и восстановления.

Каждый из описанных подходов характеризуется собственным уровнем точности, применимости и временной чувствительности. При этом между ними существуют методологические несоответствия, особенно при попытке интерпретировать результаты вне контекста их получения. Для наглядной систематизации характеристик методов оценки агрессивного воздействия представлена сравнительная таблица 1, отражающая их основные ограничения и особенности применения.

Наиболее серьёзные расхождения выявляются, когда сопоставляют результаты лабораторных и натурных исследований. Образцы, демонстрирующие высокую стойкость в статичных камерах или ускоренных циклах, в реальных системах могут разрушаться по-другому, чаще локально и быстрее, чем предполагают расчеты. Причина не только в агрессивном составе среды, но и в его изменчивости: колебания рН, выпадение твердых фаз, скачки температуры и

давления формируют нестабильную агрессивность, которая не закладывается в упрощенные модели. При этом единичные метрики (масса потерь, максимальная глубина питтинга и т.п.) не отражают полной картины, поскольку различные механизмы (коррозионная усталость, эрозионно-коррозионный износ, локальная электрохимия) могут совмещаться и протекать нелинейно в разных зонах оборудования. Следовательно, оценка долговечности должна основываться не на одном показателе, а на структурном понимании преобладающих механизмов деградации.

Таблица 1 – Сравнение методов оценки влияния агрессивных сред на техническое состояние оборудования

Характеристика \ Методы	Лабораторные	Расчетные	Натурные
Точность оценки	средняя/высокая	средняя	средняя
Учет реальных условий эксплуатации	низкий	низкий	высокий
Способность выявлять механизм разрушения	высокая	низкая	низкая
Прогнозируемость	низкая	средняя/высокая*	низкая
Чувствительность к динамике среды	низкая	низкая/средняя*	средняя
Своевременность получения результата	отложенная	оперативная	по факту
Методологическая воспроизводимость	высокая	средняя	низкая
* Примечание: - при наличии продвинутых моделей (CFD (вычислительная гидродинамика) + коррозия, ML на полевых данных и т.п.)			

В исследованиях [6, 7] подчеркивается, что даже при совпадении численных показателей между методами оценки они могут описывать разные аспекты разрушения. Так, уменьшение толщины стенки по массе и максимальная глубина питтинга нередко оказываются близкими по величине, но формируются различными механизмами, с отличающейся скоростью и последствиями. Поэтому сопоставлять методы без учета их чувствительности к различным типам повреждений некорректно, требуется анализировать каждый механизм отдельно.

Научная и инженерная задача в этом контексте заключается не в поиске универсального метода, а в осмысленном применении каждого подхода в пределах его границ применимости. Универсализация здесь невозможна не по причине сложности, а по причине отсутствия единого критерия, одинаково надежно работающего во всех условиях. Агрессивная среда – не постоянная величина, а переменная, чье влияние определяется не только составом, но и динамикой, направленностью действия, особенностями материала и геометрии оборудования. Каждый из методов дает лишь фрагмент картины. Отдельные показатели могут

быть интерпретированы только в совокупности, и только при наличии информации о структуре нагрузки, истории эксплуатации и механизмах разрушения.

Следовательно, отказ от универсального индикатора агрессивности среды является не слабостью подхода, а необходимым следствием сложности самого явления. Корректная оценка возможна лишь при системном рассмотрении: методы измерения, модели расчета и данные наблюдений должны интерпретироваться совместно, но не как взаимозаменяемые, а как дополняющие друг друга. Степень воздействия среды может быть осмыслена только через причинную связь между разрушением и его условиями. Это и должно становиться основой для технической диагностики, проектной оценки и систем мониторинга.

Список использованной литературы

1. Шапошников, Н. О. Автоклавное моделирование коррозионных процессов, происходящих в газопроводе при транспортировке неподготовленной многофазной среды, содержащей CO₂ / Н. О. Шапошников, И. А. Голубев, С. В. Хоробров, А. И. Колотий, А. В. Иоффе, В. А. Ревякин // Записки Горного института. – 2022. – Т. 258. – С. 915-923.
2. Zhao, X. Corrosion Performance Analysis of Tubing Materials with Different Cr Contents in the CO₂ Flooding Injection–Production Environment / Zhao X., Li G., Liu J., Li M., Du Q., Han Y. // Coatings. – 2023. – Vol. 13, No. 10. – Article 1812. – DOI: 10.3390/coatings13101812. – URL: <https://doi.org/10.3390/coatings13101812> (дата обращения: 23.05.2025).
3. Газаров, А. Г. Разработка методов снижения износа штангового насосного оборудования в наклонно направленных скважинах: дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2004. – 127 с. – URL: https://www.oil-info.ru/ngd/raz/Gazarov_1.pdf (дата обращения: 26.04.2025).
4. Hosseini, S. M. K. Avoiding Common Pitfalls in CO₂ Corrosion Rate Assessment for Upstream Hydrocarbon Industries / S. M. K. Hosseini // Proceedings of the 16th Nordic Corrosion Congress (Stavanger, Norway, 20-22 May 2015). – Paper 24. Stavanger. – 2015. – 12 p.
5. Puentes-Cala, E. Microbiologically influenced corrosion: The gap in the field / Puentes-Cala E., Tapia-Perdomo V., Espinosa-Valbuena D. [et al.] // Frontiers in Environmental Science. – 2022. – Vol. 10. – Article 924842. – DOI 10.3389/fenvs.2022.924842. – URL: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.924842> (дата обращения: 23.05.2025).
6. Jiao, J. Correlation between laboratory-accelerated corrosion and field exposure test for high-strength stainless steels / Jiao J., Lian Y., Liu Z. [et al.] // Materials. – 2022. – Т. 15. – № 24. – DOI 10.3390/ma15249075. – URL: <https://doi.org/10.3390/ma15249075> (дата обращения: 27.05.2025).
7. Ricker, R. E. Analysis of Pipeline Steel Corrosion Data From NBS (NIST) Studies Conducted Between 1922–1940 and Relevance to Pipeline Management. NIST Interagency / R. E. Ricker // Internal Report 7415. Gaithersburg, MD: National Institute

of Standards and Technology. – 2007. – 77 pp. – URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2007/NIST.IR.7415.pdf> (дата обращения: 27.05.2025).

8. Коррозия и защита изделий и конструкций [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. М. Кушнарченко [и др.]. – 2-е изд., стер. – Москва : Флинта, 2023. – 312 с – Загл. с тит. экрана. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54632172>

9. Узяков, Р. Н. Влияние непрогнозируемых факторов на коррозионные повреждения трубопроводов и оборудования [Электронный ресурс] / Р. Н. Узяков, Ю. А. Чирков, В. М. Кушнарченко, Е. В. Пояркова // Электронный научный журнал нефтегазовое дело : электрон. науч. журнал . – 2019. – № 6. – С. 87-100.

10. Пояркова, Е. Н. Анализ коррозионных повреждений сварных соединений нефтепроводов / Е. Н. Пояркова // В сборнике: Молодежь в науке: Новые аргументы. сборник научных работ III-го Международного молодежного конкурса: в 4-х частях. – Липецк: Научное партнерство «Аргумент». – 2016. – С. 98-101.

11. Артамонов, А. М. Эффективность защитных покрытий в нефтегазовом секторе / А. М. Артамонов, Е. Н. Пояркова, Т. М. Каримов, А. С. Аяшева // В сборнике: Наука XXI века: новый подход. материалы XXIV молодежной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – 2020. – С. 27-32.

APPROACHES TO ASSESSING THE IMPACT OF AGGRESSIVE ENVIRONMENTS ON THE CONDITION OF PUMP AND COMPRESSOR EQUIPMENT

Filimoshin Danil Dmitrievich, postgraduate student, 2nd year

Orenburg State University

Abstract: *This paper examines methods for assessing the impact of aggressive environments on pump and compressor equipment. The limitations of laboratory, computational, and field-based approaches are identified, and a comparative table is provided. It is shown that a reliable assessment is only possible through the integrated interpretation of data, taking into account the nature of the environment, destruction mechanisms, and operating conditions. The research was conducted at the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines (MMSM) of Orenburg State University under the supervision of E.V. Poyarkova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the MMSM Department.*

Keywords: *aggressive environments, pump and compressor equipment, material degradation, corrosion, erosion, failure mechanisms, laboratory testing, computational models, field research.*

НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ФИЛЬТРА УСТАНОВКИ ХИМВОДООЧИСТКИ

Фролова Олеся Александровна, кандидат технических наук, доцент
Галушкин Максим Евгеньевич, бакалавриат, 4 курс

Оренбургский государственный университет

Аннотация. В данной работе проводилась оценка надежности и диагностика технического состояния натрий-катионитового фильтра, используемого в установках химической водоочистки. Изучены условия работы и причины выхода из строя фильтра, а также требования научно-технической документации. Представлены результаты расчетов на прочность основных элементов натрий-катионитового фильтра. Выводы работы подчеркивают необходимость внедрения систематического подхода к техническому обслуживанию натрий-катионитовых фильтров в целях повышения эффективности процессов водоочистки. А регулярная диагностика и оценка надежности фильтров позволяют значительно повысить их эксплуатационные характеристики и продлить срок службы.

Ключевые слова: натрий-катионитовые фильтры, надежность, остаточный ресурс, техническая диагностика.

Код и рубрика: 628. Санитарная техника. Санитарно-технические сооружения. Водоснабжение.

В современных системах водообработки натрий-катионитовые фильтры играют ключевую роль в обеспечении качества воды, необходимой для различных технологических процессов. Эти устройства предназначены для удаления из воды ионов жесткости, что позволяет предотвратить образование накипи и коррозии в оборудовании, а также гарантировать стабильную работу установок (рисунок 1).

Фильтр представляет собой вертикальный однокамерный цилиндрический аппарат, состоящий из основных элементов: корпуса, верхнего днища, нижнего днища, верхнего и нижнего распределительных устройств, трубопроводов, запорной арматуры, пробоотборного устройства и фильтрующей загрузки.

Эксплуатация фильтра состоит из последовательно проводимых операций: фильтрования, взрыхления, регенерации, отмывки.

В процессе фильтрования происходит удаление из обрабатываемой воды соответствующих катионов солей за счет их поглощения катионитом. После истощения катионита фильтр отключается на регенерацию.

Перед регенерацией проводится взрыхление фильтра для устранения гидродинамической неравномерности фильтрующего слоя и слеживания материала, удаления измельчившихся частичек и обеспечения наиболее полного омывания зерен материала при регенерации.

Регенерация фильтров предназначена для вытеснения соответствующих катионов, поглощенных катионитом из обрабатываемой воды, и замены их катионами регенерационного раствора NaCl .

Отмывка фильтра предназначена для удаления из него продуктов регенерации и получения воды необходимого качества. Отмывка проводится водой, на которой готовится регенерационный раствор

Однако, как и любое другое оборудование, натрий-катионитовые фильтры подвержены износу и деградации, что может негативно сказаться на их эффективности и надежности.

Оценка надежности и диагностика технического состояния натрий-катионитовых фильтров являются важными аспектами их эксплуатации. Они позволяют своевременно выявлять потенциальные неисправности, оценивать степень деградации фильтрующего материала и предсказывать срок службы оборудования. В условиях растущих требований к качеству воды и увеличения нагрузки на системы водоочистки, необходимость в проведении регулярной диагностики становится особенно актуальной.

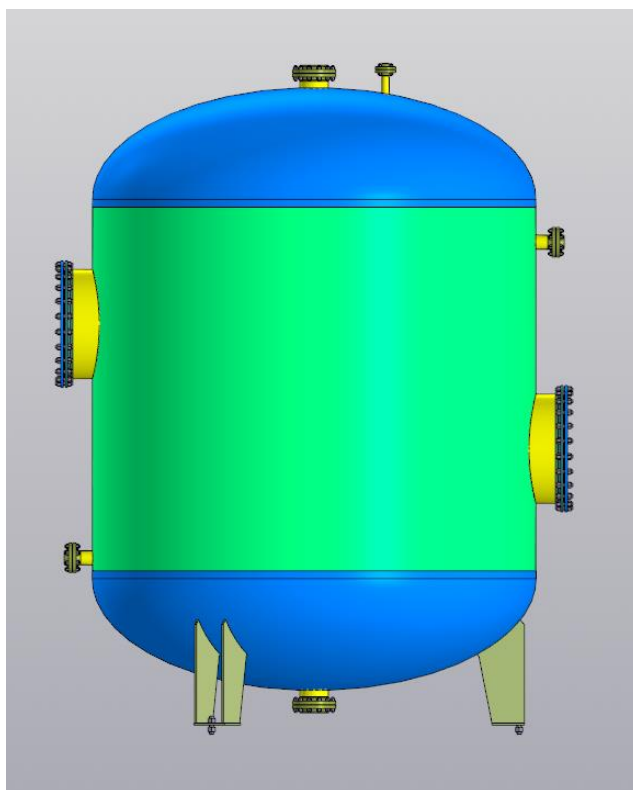


Рисунок 1 – 3D- модель натрий-катионитового фильтра установки химводоочистки

Расчёт на прочность и устойчивость основных элементов натрий-катионитового фильтра (цилиндрической обечайки, нижнего и верхнего днищ эллиптического очертания, опорных стоек лап, патрубков подачи и отвода воды, люков), а также техническое диагностирование проводили согласно нормативным документам [1 – 5].

Условия нагружения включали:

- расчётная температура – $T = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- расчётное внутреннее избыточное давление – $p = 0,63833\text{ МПа}$;
- расчётный изгибающий момент – $M = 7,3957\text{ кН}\cdot\text{м}$;
- расчётное осевое сжимающее усилие $F = 342,42\text{ кН}$.

Результаты расчета показали, что условия прочности и устойчивости выполнены.

Остаточный ресурс сосуда определялся по минимальному значению остаточных ресурсов его элементов и составил 16,8 лет.

Техническое диагностирование натрий-катионитового фильтра установки химводоочистки выполнялось в соответствии с программой проведения технического диагностирования, которая включает:

- анализ технической документации;
- техническое диагностирование;
- визуально-измерительный контроль;
- измерение толщин стенок;
- магнитопорошковая дефектоскопия;
- ультразвуковая дефектоскопия;
- измерение твердости.

В результате проведенной технической диагностики установлено, что дальнейшая безопасная эксплуатация натрий-катионитового фильтра возможна.

Оценка надежности и диагностика технического состояния натрий-катионитного фильтра являются важными аспектами обеспечения эффективной работы установок химической очистки воды. В ходе исследования установлено, что систематический контроль и анализ эксплуатационных параметров фильтра позволяет своевременно выявлять отклонения от норм, предупреждать возможные неисправности в технологическом процессе и обеспечивать высокое качество очищаемой воды.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что системный подход к оценке надежности натрий-катионитовых фильтров не только повышает эффективность процессов очистки воды, но и снижает затраты на техническое обслуживание. Для обеспечения надежной работы устройств и достижения высоких стандартов качества воды рекомендуется регулярно проводить диагностические и профилактические программы.

Таким образом, результаты данной работы подчеркивают важность комплексного подхода к управлению техническим состоянием натрий-катионитовых фильтров, что является залогом успешной эксплуатации химических установок водоочистки в современных условиях.

Список использованной литературы

1 ГОСТ 34233.2 – 2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. – Введ. 2018–08–01. – М.: Изд-во стандартов. – 54 с.

2. ГОСТ 34233.3 – 2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и наружном давлениях. Расчет на прочность обечайек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер. – Введ. 2018–08–01. М.: Изд-во стандартов .– 38с.

3. ГОСТ 14782 – 86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. – Введ. 1988–0–01. – М.: Стандартиформ, 2005. – 26 с.

4. ГОСТ 6032 - 89. Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытания на стойкость против межкристаллитной коррозии. – Введ. 2018–08–01. М.: Изд-во стандартов – 32 с.

5. РД 03-421-01. Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов. – Введ. 2001–06–09. – М.: Изд-во стандартов. – 61 с.

RELIABILITY AND TECHNICAL CONDITION DIAGNOSTICS OF CHEMICAL WATER TREATMENT FILTER

**Frolova Olesya Alexandrovna, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor**

**Galushkin Maksim Evgen'evich, Bachelor's degree, 4rd year
Orenburg State University**

Abstract. *In this work, an assessment of reliability and diagnostics of technical condition for sodium cation exchange filters used in chemical water treatment installations was carried out. The operating conditions and causes of filter failure were studied, as well as requirements from scientific and technical documentation. Results of strength calculations for major elements of the sodium cation exchange filter are presented. Conclusions emphasize the necessity to implement systematic maintenance approach for sodium cation exchange filters in order to improve efficiency of water purification processes. Regular diagnostics and reliability evaluation allow significantly enhancing operational characteristics and extending service life of these filters.*

Keywords: *sodium cation exchange filters, reliability, residual resource, technical diagnostics.*

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ КОРРОЗИИ В ФЮЗЕЛЯЖЕ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Шпенёв Евгений Евгеньевич, студент бакалавриата, 2 курс

Оренбургский государственный университет

Аннотация: В настоящей статье рассматриваются современные стратегии борьбы с коррозией фюзеляжа авиационных конструкций, представляющей собой значительную угрозу для безопасности и экономичности эксплуатации воздушных судов. Особое внимание уделяется превентивным подходам, включающим интеграцию сенсорных систем для мониторинга состояния конструкции (SHM), применение композитных и гибридных материалов, использование самовосстанавливающихся покрытий и создание цифровых двойников для прогнозирования и предотвращения коррозионных повреждений. Показано, что интеграция данных инноваций позволяет перейти от реактивного к проактивному техническому обслуживанию, что способствует повышению надежности авиационных конструкций и продлению срока их службы.

Работа выполнена на кафедре механики материалов, конструкций и машин **под руководством Поярковой Екатерины Васильевны**, заведующего кафедрой, доктора технических наук, доцента.

Ключевые слова: коррозия, фюзеляж самолета, авиационные конструкции, мониторинг состояния, предиктивное обслуживание.

Код и рубрика: 81.93.21 Предупреждение возникновения чрезвычайных ситуаций, их развития и ликвидации их последствий

Коррозия является одной из основных угроз для безопасности полетов, особенно в отношении стареющих воздушных судов. Она может существенно ослабить конструкцию фюзеляжа, приводя к трещинам, разрушениям и, в конечном итоге, к авариям. За последние 30 лет произошло несколько инцидентов и аварий, которые были прямо или косвенно связаны с коррозионными повреждениями фюзеляжа. Тем не менее, коррозионные повреждения встречаются как в гражданской, так и в военной авиации.

Коррозия в фюзеляжах самолетов – распространенная проблема в гражданской авиации. Старые самолеты, эксплуатируемые в условиях высокой влажности и соленого воздуха (например, вблизи океанов), особенно подвержены коррозии.

Военные самолеты также подвержены коррозии, хотя обычно более строгие программы технического обслуживания могут снизить риск серьезных инцидентов. Однако, если самолеты используются в агрессивных средах или не обслуживаются должным образом, коррозия может стать серьезной проблемой.

Несмотря на то, что прямая причинно-следственная связь между коррозией и авиакатастрофой не всегда легко доказуема (поскольку часто это сочетание факторов), можно выделить несколько известных случаев, где коррозия играла существенную роль.

Aloha Airlines Flight 243 (1988 год, но имеет долгосрочные последствия).

Этот случай часто упоминается в контексте коррозии и стареющих самолетов. Взрывная декомпрессия на Boeing 737 произошла из-за усталости металла и коррозии заклепок в фюзеляже в области стыковки обшивки. Хотя это произошло до 1994 года, это событие стало катализатором ужесточения правил технического обслуживания и инспекций в отношении коррозии. Среди жертв числится 1 погибший, несколько раненых.

China Airlines Flight 611 (2002 год).

Boeing 747-200 разбился в Тайваньском проливе. Расследование показало, что причиной катастрофы стала усталостная трещина, образовавшаяся в результате некачественного ремонта задней части фюзеляжа после повреждения при посадке 22 года назад. Неправильный ремонт привел к прогрессирующей усталостной трещине и, возможно, усугубился коррозией. Среди жертв числятся 225 погибших.

In-flight fuselage rupture of an Airbus A330-200 (2016 год).

Во время полета произошел разрыв фюзеляжа. Расследование показало, что разрыв произошел в зоне, подверженной коррозии.

Катастрофа Ан-24 в Черкесске

В результате коррозионного разрушения фюзеляжа самолёта Ан-24 произошёл разрыв конструкции в районе туалета, что привело к катастрофе. Коррозия развивалась в течение нескольких лет из-за воздействия агрессивной среды и недостаточной антикоррозионной защиты.

Также были зафиксированы случаи отслоения внешней обшивки фюзеляжа во время полета на различных типах самолетов (включая Boeing 737 и Airbus A320). В некоторых случаях коррозия заклепок и соединений играла роль в ослаблении конструкции.

Точную статистику по годам и странам в открытых источниках получить весьма затруднительно, так как многие инциденты, связанные с коррозией, не приводят к катастрофам и не попадают в широкую огласку. Тем не менее, можно выделить следующие тенденции:

1. Пик инцидентов, связанных с коррозией, приходился на конец 1990-х и начало 2000-х годов, когда в эксплуатации находилось большое количество старых самолетов. С ужесточением требований к техническому обслуживанию и выводом из эксплуатации старых моделей количество серьезных инцидентов уменьшилось.

2. Страны с большим парком старых самолетов и/или эксплуатирующие самолеты в агрессивных климатических условиях (высокая влажность, соленый воздух) чаще сталкиваются с проблемами коррозии. К таким странам относятся некоторые страны Азии, Латинской Америки и Африки.

3. Boeing и Airbus, как крупнейшие производители гражданских самолетов, чаще упоминаются в связи с инцидентами, но это связано с количеством выпущенных ими самолетов, а не с конструктивными недостатками. Важно учитывать, что многие инциденты, связанные с коррозией, не приводят к катастрофам, но требуют дорогостоящего ремонта и простоя самолетов.

Фюзеляж самолета, будучи подверженным широкому спектру внешних воздействий, является уязвимым для коррозии. Этот процесс, влекущий за собой деградацию материалов, оказывает существенное влияние на прочность и долговечность конструкции, увеличивая риск аварийных ситуаций. Процесс коррозии развивается постепенно, проходя через несколько отчетливых стадий, представленных в таблице 1.

На начальной стадии происходит разрушение пассивного оксидного слоя, который естественным образом формируется на поверхности алюминиевых сплавов, широко используемых в конструкции фюзеляжа, и обеспечивает защиту от агрессивного воздействия окружающей среды. Этот защитный слой может быть поврежден различными факторами, включая механические воздействия (царапины, сколы), химические агенты (загрязнения, соли) или электрохимические процессы (возникновение гальванических пар в присутствии разнородных металлов). Визуально эта стадия проявляется в виде небольших пятен, точек или участков изменения цвета поверхности металла. Коррозия, как правило, инициируется в местах концентрации напряжений, таких как отверстия под крепежные элементы, сварные швы или кромки деталей. Наиболее распространенными типами коррозии на данной стадии являются питтинговая и щелевая. Питтинговая коррозия характеризуется образованием небольших, но глубоких язв (питтингов) на поверхности металла, в то время как щелевая коррозия развивается в узких зазорах между деталями, где создаются благоприятные условия для аккумуляции коррозионно-активных веществ.

После того как пассивный слой разрушен, начинается активное взаимодействие металла с окружающей средой, включая кислород, воду и соли (так называемая вторая стадия развития коррозионных повреждений в фюзеляже самолета). В результате этого процесса образуются продукты коррозии, представляющие собой оксиды, гидроксиды и соли. Важным аспектом является то, что продукты коррозии занимают больший объем, чем исходный металл, что приводит к возникновению внутренних напряжений и способствует дальнейшему разрушению материала. Внешне данная стадия характеризуется увеличением размеров и количества очагов коррозии. Продукты коррозии могут быть видимы в виде белых, серых или коричневых отложений на поверхности металла. Также может наблюдаться шелушение или отслоение лакокрасочного покрытия. На этой стадии возможно развитие гальванической, межкристаллитной и подпленочной коррозии. Гальваническая коррозия возникает при контакте разнородных металлов в присутствии электролита, при этом более активный металл подвергается ускоренной коррозии. Межкристаллитная коррозия распространяется по границам зерен металла, ослабляя его структуру. Подпленочная коррозия развивается под слоем лакокрасочного покрытия, приводя к его вздутию и отслоению.

Продукты коррозии, образующиеся в процессе развития (третья стадия коррозионных повреждений), оказывают давление на окружающий металл, вызывая образование трещин и расслоений. Кроме того, уменьшение толщины металла вследствие коррозии приводит к снижению несущей способности конструкции.

Таблица 1 – Стадии коррозионных повреждений фюзеляжа самолета

Стадия	Научное обоснование	Внешние признаки	Последствия
1. Инициация коррозии	Разрушение пассивного оксидного слоя, механические, химические или электрохимические повреждения	Небольшие пятна, точки, изменение цвета поверхности, концентрация в местах напряжений	Зарождение очагов коррозии, снижение защитных свойств материала
2. Развитие коррозии	Взаимодействие металла с окружающей средой, образование продуктов коррозии, внутренние напряжения	Увеличение очагов коррозии, видимые отложения продуктов коррозии, шелушение покрытия	Увеличение очагов коррозии, ухудшение состояния материала, снижение прочности
3. Распространение коррозии	Давление продуктов коррозии, образование трещин и расслоений, уменьшение толщины металла, концентрация напряжений	Видимые трещины, вмятины, прогибы, деформации, ослабление крепежа	Значительное снижение прочности, риск разрушения, потеря герметичности
4. Разрушение	Потеря несущей способности, критическое уменьшение толщины, сквозные трещины	Полное разрушение детали, нарушение аэродинамики	Аварийные ситуации, потеря управления, разрушение конструкции

Концентрация напряжений вблизи очагов коррозии значительно ускоряет рост трещин при циклических нагрузках, что приводит к развитию усталостной коррозии. На этой стадии на поверхности металла становятся видимыми трещины, вмятины или прогибы. Также могут наблюдаться деформации деталей фюзеляжа. Крепежные элементы, такие как болты и заклепки, могут ослабляться или разрушаться. Наиболее опасным типом коррозии на данной стадии является коррозионное растрескивание под напряжением (КРН). КРН представляет собой процесс разрушения металла под воздействием одновременного воздействия коррозионной среды и статических растягивающих напряжений.

На завершающей стадии происходит полная потеря несущей способности элемента конструкции вследствие критического уменьшения толщины металла или образования сквозных трещин. Это может привести к разрушению детали или узла и, в конечном итоге, к повреждению всей конструкции фюзеляжа. На этой стадии наблюдается полное разрушение детали или узла, потеря герметичности фюзеляжа и нарушение аэродинамических характеристик самолета. Последствия могут быть крайне серьезными, включая аварийные ситуации, связанные с потерей управления, разрушением конструкции в полете или невозможностью эксплуатации самолета.

Скорость развития коррозионных процессов зависит от множества факторов, включая тип металла, состав окружающей среды, температуру, влажность, уровень загрязнения и наличие механических напряжений. Регулярные инспекции и техническое обслуживание играют критически важную роль в выявлении и устранении коррозии на ранних стадиях, что позволяет предотвратить серьезные повреждения и обеспечить безопасность полетов. Использование современных антикоррозионных материалов, защитных покрытий и методов ингибирования коррозии помогает значительно снизить скорость коррозионных процессов и продлить срок службы фюзеляжа самолета.

Развитие авиационных технологий борьбы с коррозией претерпевает существенную трансформацию, смещая акцент с реактивных мер на превентивные стратегии, включающие системную диагностику и интеллектуальную защиту конструкций. Ключевые инновации в данной области включают:

1. Интегрированные сенсорные системы (SHM – Structural Health Monitoring).
2. Использование композитных и гибридных материалов.
3. Самовосстанавливающиеся покрытия (Self-healing coatings).
4. Использование цифровых двойников (Digital Twin).

В современных авиационных конструкциях наблюдается устойчивая тенденция к интеграции сенсорных систем (SHM) непосредственно в элементы конструкции, что позволяет осуществлять непрерывный мониторинг параметров, критически влияющих на развитие коррозионных процессов. К числу контролируемых параметров относятся влажность, температура и наличие микродефектов, таких как микротрещины.

Применение SHM-систем обеспечивает:

- непрерывное отслеживание изменений параметров, способствующих инициированию и прогрессированию коррозии;

– оперативное выявление признаков зарождения микротрещин и очагов межкристаллитной коррозии, что позволяет своевременно принимать меры по предотвращению дальнейшего разрушения;

– снижение потребности в трудоемких и затратных операциях по разборке и демонтажу конструкции для проведения инспекций, что позволяет перейти к стратегии технического обслуживания по состоянию.

Следует отметить, что выбор типа сенсора SHM-систем (в обнаружении ранних стадий коррозии) и его местоположения должен быть тщательно обоснован с учетом специфики конструкции и условий эксплуатации.

Вместе с тем, современные композитные материалы (углепластики, термопластики, сэндвич-структуры с керамической матрицей), применяемые в современном самолетостроении, демонстрируют значительно меньшую коррозионную восприимчивость по сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами. Например, более 50% структуры Boeing 787 Dreamliner выполнено из углеволокна, практически не подверженного коррозии. Airbus A350 также использует композитные и титановые элементы для минимизации гальванической коррозии.

Нанотехнологии способствуют разработке покрытий, обладающих способностью к самовосстановлению защитных свойств при возникновении микроповреждений. Примеры включают:

– полимерные матрицы с микрокапсулами ингибиторов коррозии;

– оксидные нанопленки, восстанавливающие структуру при воздействии влаги или механических повреждений.

Также создание цифрового двойника самолета позволяет моделировать физико-химические воздействия на конструкцию в реальном времени, включая:

- накопление влаги в критических зонах;
- температурные циклы и их влияние на усталость и коррозию;
- деградацию покрытий в процессе эксплуатации.

Так, по данным Airbus Research Division (2023), «Digital Twin – это не просто модель, это стратегический инструмент контроля ресурса и безопасности конструкции».

Интеграция инноваций, таких как SHM, цифровые двойники, композиты и самовосстанавливающиеся покрытия, существенно повышает надежность авиационных конструкций и позволяет перейти от реактивного к предиктивному техническому обслуживанию. Это особенно важно для долгосрочной эксплуатации воздушных судов в агрессивных климатических зонах.

Список использованной литературы

1. Кулагин, В. П. Коррозия и защита металлов в авиации. – М.: Машиностроение, 2006. – 288 с.
2. Малинин, В. А. Конструкционные материалы и защита от коррозии в авиастроении. – М.: Транспорт, 2003. – 252 с.

3. Тимофеев, Ю. И. Надёжность авиационных конструкций. – М.: Высшая школа, 2012. – 368 с.
4. National Transportation Safety Board (NTSB). Aircraft Accident Report: Aloha Airlines Flight 243. NTSB/AAR-89/03, 1989.
5. National Transportation Safety Board (NTSB). Accident Report: Southwest Airlines Flight 812. NTSB/AAR-12/03, 2012.
6. Dursun, T., Soutis, C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys // Materials & Design. – 2014. – Volume 56. – pp. 862–871. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.002>
7. Bellinger, N. C. Corrosion of Aircraft // Encyclopedia of Aerospace Engineering. – 2010. – <https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae472>
8. Pereira, L. M. C., et al. Detection of corrosion in aircraft structures using ultrasonic guided waves // Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2013. – Vol. 55. – № 2. – pp. 72–78.
9. Федеральное агентство воздушного транспорта РФ. Отчёт о расследовании авиационного происшествия с самолётом Ан-24 в районе аэропорта Черкесск. — М.: МАК. – 2003.
10. Техническое руководство по техобслуживанию и контролю за состоянием фюзеляжа для самолётов Boeing 737. – Boeing Commercial Airplanes, Structural Repair Manual (SRM). – 2021.
12. Коррозия и защита изделий и конструкций [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. М. Кушнаренко [и др.]. – 2-е изд., стер. – Москва : Флинта, 2023. – 312 с – Загл. с тит. экрана. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54632172>

MODERN APPROACHES TO CORROSION PREVENTION IN THE FUSELAGE OF AIRCRAFT EQUIPMENT

Shpenev Evgeny Evgenievich, Bachelor's student, 2nd year

Orenburg State University

Abstract: *This article discusses modern strategies for combating corrosion of the fuselage of aircraft structures, which poses a significant threat to the safety and cost-effectiveness of aircraft operation. Particular attention is paid to preventive approaches, including the integration of sensor systems for structural health monitoring (SHM), the use of composite and hybrid materials, the use of self-healing coatings, and the creation of digital twins to predict and prevent corrosion damage. It is shown that the integration of these innovations allows for a transition from reactive to proactive maintenance, which helps to increase the reliability of aircraft structures and extend their service life. The work was carried out at the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines under the supervision of Ekaterina Vasilievna Poyarkova, Head of the Department, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor.*

Keywords: *corrosion, aircraft fuselage, aircraft structures, condition monitoring, predictive maintenance.*

МЕТОДЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

**Атасян Нарек Давидович, Шевчук Никита Михайлович, студенты
бакалавриата, 2 курс**

**Пояркова Екатерина Васильевна, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой механики материалов, конструкций и машин**

Оренбургский государственный университет

Аннотация: В данной работе были рассмотрены основные принципы и положения обследования мониторинга обследования и мониторинга зданий и сооружений. Были описаны подходы к обследованиям, причины разрушений зданий и сооружений, средства обнаружения деформаций строительных конструкций. Работа выполнена на кафедре механики материалов, конструкции и машин Оренбургского государственного университета.

Ключевые слова: Обследование зданий, мониторинг зданий, лазерное сканирование, LiDAR

Код и рубрика: 67.00.00 Строительство. Архитектура

Как известно, обследование и мониторинг технического состояния зданий и представляет собой комплекс мероприятий, направленных на выявление и оценку текущего состояния конструкций, элементов и систем объекта. Подобные манипуляции позволяют своевременно выявлять дефекты, повреждения и отклонения от нормативных требований, предотвращая аварийные ситуации и обеспечивая безопасную эксплуатацию зданий и сооружений.

В России функции по регулированию, контролю и проведению мониторинга технического состояния зданий и сооружений распределены между Минстроем России [9], Ростехнадзором [10] и саморегулируемыми организациями (СРО) в сфере проектирования и инженерных изысканий (например, НП «Союз инженеров-конструкторов» [11]).

Ростехнадзор (государственный строительный надзор) уполномочен налагать штрафы за нарушение требований в области безопасной эксплуатации и мониторинга зданий. Органы архитектурно-стройнадзора субъектов РФ и Роспотребнадзор могут накладывать дополнительные штрафы за нарушение технических регламентов, например, за несвоевременное обновление системы мониторинга или непроведение обязательных осмотров.

Рассматривая техническое состояние строительных конструкций как совокупность фактических характеристик прочности, деформативности, долговечности и устойчивости элементов здания (фундаментов, стен, перекрытий, колонн, балок и других), определяющих их способность выполнять заданные функции в течение установленного срока эксплуатации без превышения допустимых предельно-разрешённых значений параметров, установлены группы факторов, влияющих на него, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Факторы, влияющие на техническое состояние

Группа факторов	Конкретные причины
Конструктивные	Ошибки в расчётах, неверный выбор сечений, недостатки узлов
Материальные	Качество бетона/стали, характеристики заполнителей, коррозионная стойкость
Производственные	Нарушения технологии возведения, плохое уплотнение бетона, дефекты сварки
Эксплуатационные	Перегрузки, вибрации, агрессивная среда, ошибки в эксплуатации
Природно-климатические	Влажность, температурные колебания, морозо-, термодетформации, сейсмичность

Вместе с тем, в открытых источниках отсутствуют официальные статистические данные, позволяющие точно распределить причины аварий зданий и сооружений. Однако, на основе анализа доступной информации и экспертных оценок, можно иллюстрировать в виде круговой диаграммы ориентировочные соотношения группы факторов в Российской Федерации (России), Соединенных Штатах Америки (США) и Европейском Союзе (ЕС), представленные на рисунках 1-3.

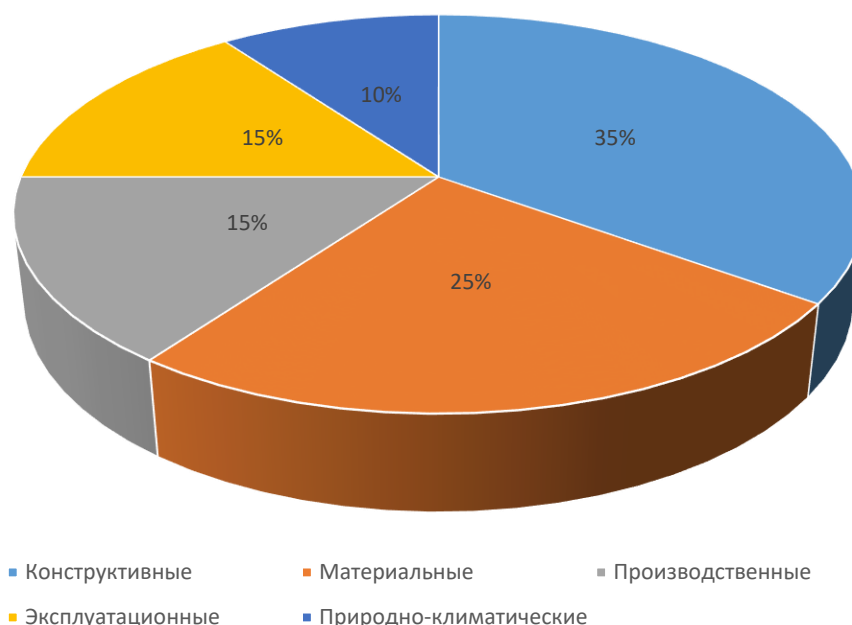


Рисунок 1 – Диаграмма группы факторов, влияющих на разрушения зданий и сооружений в России

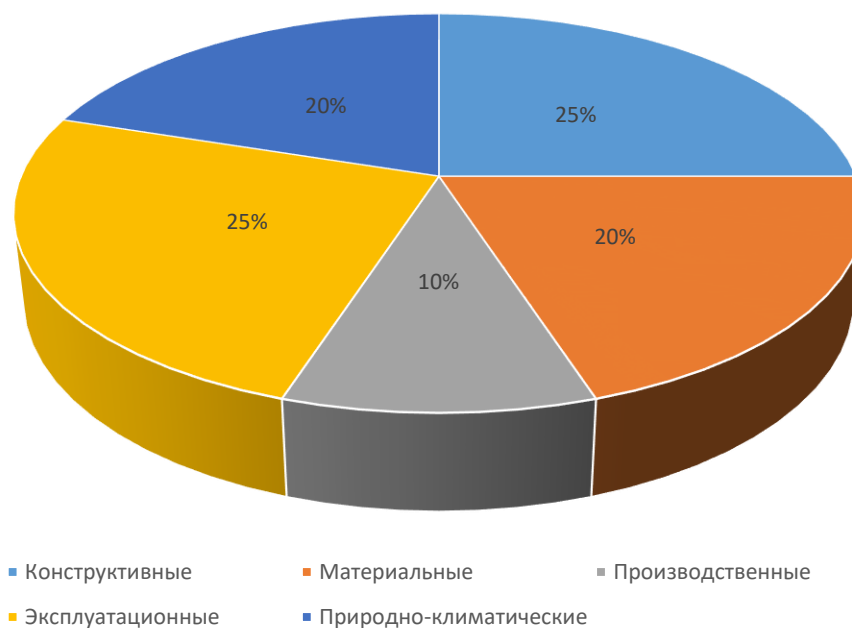


Рисунок 2 – Диаграмма группы факторов, влияющих на разрушения зданий и сооружений в США

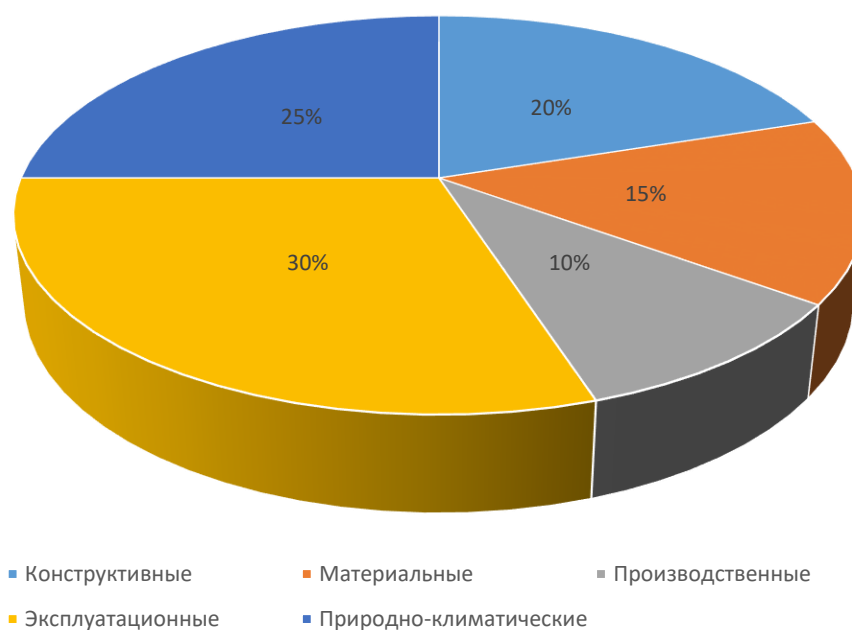


Рисунок 3 – Диаграмма группы факторов, влияющих на разрушения зданий и сооружений в ЕС

Анализ представленных круговых диаграмм выявляет ряд интересных закономерностей. В России ведущую роль играют конструктивные факторы, составляющие 35% всех причин разрушений, что указывает на значимость проектных ошибок, неверного выбора сечений и узлов. Материальные факторы (качество бетона, стальных элементов и коррозионная стойкость) занимают второе

место с долей 25%. Такая структура свидетельствует о необходимости усиленного внимания к качеству проектирования и материалов в отечественной практике строительства и мониторинга.

В США и ЕС распределение влияния факторов выглядит более сбалансированным. В США конструктивные факторы составляют 25%, а эксплуатационные – 25%, что подчеркивает важность правильной эксплуатации и технического обслуживания объектов наряду с проектированием. Материальные и производственные причины занимают соответственно 20% и 10%. В ЕС эксплуатационные факторы занимают даже более значительную долю – 30%, что указывает на более зрелую систему эксплуатации и контроля, где именно условия эксплуатации и воздействие окружающей среды играют ключевую роль в сохранении технического состояния зданий. При этом конструктивные и материальные факторы представляют меньшую долю (20% и 15%), что может свидетельствовать о более высоком уровне проектирования и контроля качества материалов.

Из экспертной оценки следует, что для России характерна более выраженная проблема с проектными решениями и качеством материалов, а это требует усиления нормативного контроля и внедрения современных стандартов обследования и мониторинга. В то же время опыт США и ЕС показывает значимость комплексного подхода, включающего не только техническое обследование, но и постоянный мониторинг условий эксплуатации, что позволяет своевременно выявлять и устранять дефекты, снижая риск аварийных ситуаций. Таким образом, российская практика должна ориентироваться на интеграцию передовых методов диагностики и адаптацию принципов комплексности и последовательности обследований, что повысит надежность и долговечность зданий и сооружений.

Основываясь на анализе выше представленных диаграмм, можно сделать вывод о необходимости комплексного подхода к обследованию и мониторингу технического состояния зданий и сооружений. Такой подход должен учитывать не только выявление и классификацию факторов, влияющих на разрушения, но и особенности их взаимодействия, а также специфику эксплуатации в конкретных климатических и технологических условиях. Важно, чтобы обследование включало систематический сбор и обработку данных, использование современных инструментальных и расчетных методов, а также регулярный мониторинг состояния конструкций в динамике. Это позволит не только своевременно выявлять дефекты и отклонения от нормативных требований, но и прогнозировать возможные риски, что существенно повысит эффективность принимаемых инженерных решений по ремонту, усилению или реконструкции объектов.

Одним из ключевых требований к проведению обследования зданий и сооружений является соблюдение принципа комплексности, предполагающего совмещение визуальных, инструментальных и расчетных методов диагностики. Такой подход обеспечивает более полное и объективное представление о техническом состоянии конструкций, а также учитывает взаимосвязь между элементами здания, условиями его эксплуатации и воздействием климатических факторов.

Принцип последовательности предполагает строгое соблюдение этапности обследования, начиная с подготовительного этапа, включающего сбор исходных данных и разработку программы работ, затем переходя к полевым исследованиям, лабораторным испытаниям, аналитическим расчётам и завершая оформление выводов и рекомендаций.

Особое значение имеет принцип объективности и достоверности получаемых данных, который реализуется через применение сертифицированного, калиброванного оборудования и апробированных методик, а также многоуровневую систему контроля, включающую повторные измерения и верификацию результатов разными методами.

Экономичность обследования обеспечивается за счёт рационального выбора методов и средств, позволяющих достичь необходимой точности при минимальных затратах ресурсов. При этом предпочтение отдается неразрушающим методам контроля, позволяющим сохранить целостность конструкций и сократить затраты на восстановление.

Принцип безопасности охватывает как обеспечение условий безопасного проведения самих работ, включая оценку рисков, связанных с возможным обрушением или падением элементов, так и организацию защитных мероприятий – от ограждений до применения средств индивидуальной защиты персонала.

Наконец, принцип адаптивности означает гибкость в ходе выполнения обследования: по мере получения промежуточных результатов программа работ может быть скорректирована, с перераспределением ресурсов на наиболее проблемные или критически важные участки объекта. Такой подход позволяет повысить эффективность обследования и своевременно выявить потенциальные угрозы для конструктивной надёжности здания.

Вместе с тем, любое обследование следует выполнять, руководствуясь нормативно-правовой базой, представленной в таблице 2.

Процесс обследования зданий и сооружений включает в себя несколько последовательных этапов, каждый из которых играет важную роль в обеспечении точности и полноты получаемых данных.

На подготовительном этапе осуществляется изучение проектной, исполнительной и эксплуатационной документации, что позволяет определить конструктивные особенности объекта и историю его эксплуатации.

Далее разрабатываются технологическая карта и план проведения обследования с учётом особенностей здания и условий его эксплуатации. На этом же этапе происходит согласование объёма и методов обследования с заказчиком, что обеспечивает прозрачность и согласованность дальнейших действий.

Полевые работы включают в себя визуальный осмотр объекта с фото- и видеофиксацией выявленных дефектов, а также проведение геодезических измерений для определения деформаций, осадок и отклонений от проектного положения. Дополнительно производится установка и снятие показаний с различных датчиков — деформационных, температурных и коррозионных, которые позволяют получить объективные количественные характеристики состояния конструкций.

После полевых работ следуют лабораторные исследования, включающие отбор образцов материалов и их последующее испытание на прочность, плотность, влажность и другие показатели. В ряде случаев проводится химический и микроаналитический анализ материалов, особенно при наличии признаков коррозии, выщелачивания или других форм разрушения.

Таблица 2 – Нормативно-правовая база, необходимая при обследовании

Документ	Содержание	Применение
СП 70.13330.2012. Свод правил. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87 [1]	Требования к прочности, жёсткости и долговечности	Базовые расчётные критерии
СП 13-102-2003. Свод правил. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений [2]	Методика проведения обследований	Алгоритмы полевых и лабораторных работ
СП 63.13330. Бетонные и железобетонные конструкции [3]	Критерии предельных состояний	Нормы для оценки разрушений и трещин
ГОСТ 25100. Строительные материалы [4]	Свойства материалов и методы их испытаний	Лабораторный контроль качества бетона, стали

Однако лабораторные исследования нередко затруднены из-за сложности отбора и доставки проб, а также высоких затрат на оборудование и реактивы, и потому порой менее эффективны, чем полевые работы. С их помощью можно получить точные и воспроизводимые, применить широкий спектр методов анализа и многократно тестировать образцы, однако при извлечении пробы она теряет часть влаги и изменяет структуру, а результаты не всегда адекватно отражают реальные условия.

На расчётно-аналитическом этапе осуществляется обработка результатов, полученных в ходе полевых и лабораторных исследований. Выполняются расчёты на прочность, устойчивость и надёжность конструкций с использованием современных методов моделирования, включая конечно-элементный анализ. Результаты сравниваются с установленными нормативными предельными состояниями, что позволяет оценить остаточный ресурс и степень пригодности здания к дальнейшей эксплуатации.

Заключительный этап включает оформление результатов обследования. Готовится технический отчёт, в котором подробно описываются использованные методы, выявленные дефекты, результаты измерений и расчётов, а также формулируются выводы о техническом состоянии конструкций, классификация уровней которого представлена в таблице 2. В документ также включаются рекомендации по ремонту, усилению или ограничению эксплуатации объекта. При необходимости отчёт сопровождается презентацией для заказчика, а также

передачей исходных данных, которые могут использоваться в системе мониторинга технического состояния здания в будущем. Классификация уровней технического состояния приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Классификация уровней технического состояния

Уровень состояния	Характеристика	Дополнительные признаки
Нормальное	Все параметры в пределах проектных значений	Отсутствие видимых дефектов
Предаварийное	Имеются небольшие трещины, местные коррозионные повреждения, но прочность конструкции составляет не менее 90% от предусмотренной проектом [8]	Необходим мониторинг и локальный ремонт
Аварийное	Прочность менее 90% от проектной, значительные деформации, распространённая коррозия или разрушения [8]	Требуется незамедлительное усиление или ограничение эксплуатации
Критическое	Угроза обрушения, несущая способность существенно нарушена	Эксплуатация запрещена, требуется демонтаж или полная реконструкция

Методы диагностики технического состояния строительных конструкций условно делятся на визуальные и инструментальные [12]. Визуальные методы основаны на непосредственном осмотре элементов здания с целью выявления внешних признаков повреждений. К ним относятся трещины, которые оцениваются по ширине раскрытия и направлению, а также отслоения штукатурного слоя, осыпание бетона, появление ржавых пятен — свидетельств коррозии арматуры, и видимые деформации в виде прогибов, выпучиваний или искривлений элементов. Эти признаки позволяют на первом этапе составить общее представление о степени изношенности конструкций и определить участки, требующие более детального инструментального обследования. Инструментальные методы обеспечивают количественную оценку параметров состояния конструкций и позволяют выявлять скрытые дефекты, не проявляющиеся визуально. К ним относятся геодезические измерения смещений, кренов и осадок, позволяющие зафиксировать пространственные изменения положения конструктивных элементов. Кроме того, важным направлением инструментальной диагностики является измерение коррозионной активности арматуры и металлических элементов, которое проводится с использованием электропотенциальных и токовых методов для определения степени коррозионного поражения и прогнозирования его развития.

После описания методов визуальной и инструментальной диагностики важным дополнением к традиционным подходам становится использование

современных дистанционных технологий. Одним из таких решений является применение беспилотных летательных аппаратов, которые значительно расширяют возможности обследования зданий и сооружений.

Беспилотные летательные аппараты (UAV) используются для оперативного получения высокоточных данных фотограмметрии и LiDAR для обследования фасадов и крыш зданий (рисунок 4). Преимущества таких технологий включают высокую скорость обследования, возможность доступа к труднодоступным зонам и значительное снижение стоимости полевых работ.

Основные области применения включают выявление трещин, осыпаний, деформаций, а также создание детализированных 3D-моделей объектов, что позволяет более точно оценивать их техническое состояние и планировать дальнейшие работы.



Рисунок 4 – Отсканированное здание системой LiDAR [12]

Так же имеет место быть лазерное сканирование. Наземный лазерный сканер позволяет осуществлять высокоточную 3D-фиксацию геометрии конструкций, создавая облака точек с миллиметровой точностью (рисунок 5). Мобильные системы, включающие сканеры на носимом оборудовании, обеспечивают быстрый и эффективный обход объектов, позволяя собирать данные в труднодоступных местах. Эти технологии позволяют проводить анализ изменений формы и объема конструкций, что важно для мониторинга их состояния, выявления дефектов и деформаций, а также для создания детализированных 3D-моделей, используемых для дальнейших расчетов и планирования ремонтов.

Современные методы обработки данных мониторинга включают аномалию-детекцию с использованием алгоритмов кластеризации и нейросетей, которые позволяют автоматически распознавать отклонения от нормы в данных, таких как изменения деформаций или возникновения трещин. Прогностическая аналитика использует модели ARIMA и LSTM для прогнозирования будущих деформаций и вероятных отказов конструкций, что помогает заранее выявить потенциальные риски. Интеграция с географическими информационными системами (GIS)

позволяет проводить пространственный анализ данных мониторинга, учитывая влияние окружающей среды на состояние объектов. Это обеспечивает более точную оценку воздействия внешних факторов, таких как осадки, температурные колебания и другие природные условия, на долговечность и безопасность сооружений.



Рисунок 5 – Пример лазерного сканера Leica HDS3000 [10]

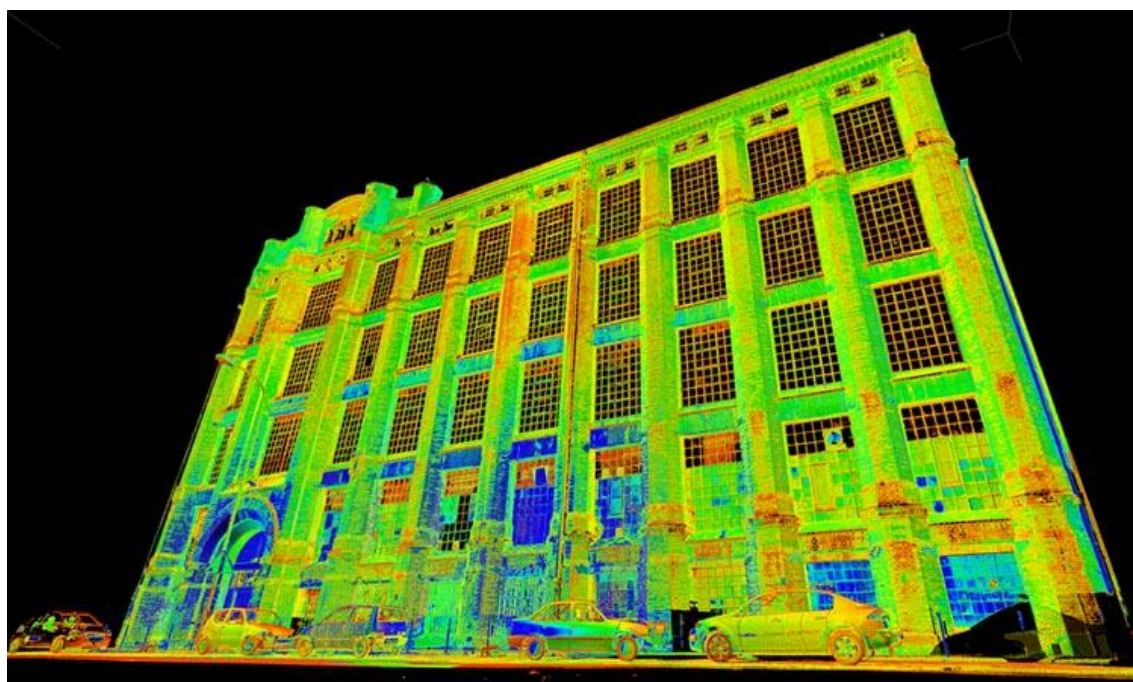


Рисунок 6 – Пример отсканированного здания сканером Leica HDS3000 [11]

Инспекционные роботы, включая наземные и стеновые модели, предназначены для осмотра труднодоступных или опасных участков, таких как туннели, шахты и внутренние полости стен. Эти роботы оснащены камерами высокого разрешения, ультразвуковыми и вихретоковыми датчиками, что позволяет проводить детальную диагностику, выявляя дефекты, трещины и другие повреждения, которые могут быть невидимы для человеческого глаза. Применение таких технологий существенно повышает безопасность и эффективность обследования, позволяя исследовать зоны с ограниченным доступом или в опасных условиях, минимизируя риск для людей и ускоряя процесс сбора данных.

Резюмируя вышеизложенное, можно заключить, что обследование и мониторинг технического состояния зданий и сооружений являются важными процессами, обеспечивающими безопасность и надёжность объектов. Регулярное проведение этих мероприятий позволяет своевременно выявлять и устранять дефекты, предотвращать аварийные ситуации и продлевать срок службы конструкций.

Выбор методов обследования и мониторинга зависит от специфики объекта, его состояния и поставленных задач. Важно учитывать нормативные требования и рекомендации, а также использовать современное оборудование и технологии для получения точных и объективных данных.

Список использованных источников

1. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России). – Режим доступа: <https://minstroy.gov.ru> (дата обращения 21.05.2025).

2. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор). – Режим доступа: <https://gosnadzor.ru> (дата обращения 21.05.2025).

3. Саморегулируемая организация (СРО) в сфере проектирования и инженерных изысканий. НП «Российский союз инженеров». – Режим доступа: <https://www.xn--b1afacefabgbj4bcdfhtofacd41a.xn--p1ai/> (дата обращения 21.05.2025).

4. СП 70.13330.2012. Свод правил. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87 (утв. Приказом Госстроя от 25.12.2012 № 109/ГС) (ред. от 30.12.2020) : введ. 01.07.2013. – 230 с. – Режим доступа: <https://mchs.gov.ru/uploads/document/2022-03-16/76b28310ae-906e1007-b6ac4f42421b7d.pdf> (дата обращения 12.05.2025)

5. СП 13-102-2003. Свод правил. Правила Обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. (утв. Постановлением Госстроя России от 21 августа 2003 г. № 153) введ. 21.08.2003. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200034118> (дата обращения 12.05.2025)

6. СП 63.13330. Бетонные и железобетонные конструкции. (утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской

Федерации от 19 декабря 2018 г. № 832/пр) введ. 20.06.2019. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/554403082> (дата обращения 12.05.2025)

7. ГОСТ 25100. Строительные материалы. (утв. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 июля 2020 г. № 384-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 25100-2020) введ. с 01.01.2021 г. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200174302> (дата обращения 12.05.2025)

8. СТО НОСТРОЙ 2.6.54-2011. Конструкции монолитные бетонные и железобетонные. Технические требования к производству работ, правила и методы контроля. – 2011. – Режим доступа: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293795/4293795516.htm> (дата обращения 21.05.2025).

9. Отсканированное здание системой LiDAR. – Режим доступа: <https://drone.aero/arhitektura-stroitelstvo-geodeziya/bpla-dlya-arhitektury-inzhenerii-i-stroitelstva/> (дата обращения 21.05.2025).

10. Пример лазерного сканера Leica HDS3000. – Режим доступа: <https://gektargroup.ru/articles/geodeziya/lazernoe-skanirovanie-zdaniy-i-sooruzheniy/> (дата обращения 21.05.2025).

11. Пример отсканированного здания сканером Leica HDS3000. – Режим доступа: <https://gektargroup.ru/articles/geodeziya/lazernoe-skanirovanie-zdaniy-i-sooruzheniy/> (дата обращения 21.05.2025).

12. Пояркова, Е.В. Диагностика повреждений металлических материалов и конструкций : учебное пособие / Е. В. Пояркова, С. Н. Горелов; М-во образования и науки Рос. Федерации, ФГБОУ ВПО «Оренбург. гос. ун-т». –Оренбург : ОГУ. – 2014. – 202 с.

METHODS OF SURVEYING AND MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF BUILDINGS AND STRUCTURES

**Narek D. Atasyan, Nikita M. Shevchuk, undergraduate students, 2nd year
Ekaterina V. Poyarkova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head
of the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines**

Orenburg State University

Abstract: *This work considered the basic principles and provisions of survey monitoring survey and monitoring of buildings and structures. Approaches to surveys, causes of destruction of buildings and structures, means of detecting deformations of building structures were described. The work was carried out at the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines of Orenburg State University, under the supervision of Poyarkova E.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines.*

Keywords: *Building survey, building monitoring, laser scanning, LiDAR.*

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСИЛЕНИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Языкова Юлия Михайловна, Байчеркесова Алина Талгатовна, студенты
бакалавриата, 2 курс**

**Пояркова Екатерина Васильевна, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой механики материалов, конструкций и машин**

Оренбургский государственный университет

Аннотация: *Статья посвящена актуальной теме интеграции новых технологий в строительную практику, с акцентом на применение композитных материалов для усиления железобетонных конструкций. В работе рассматриваются основные виды композитных материалов (углеродные, стекловолокно, базальтовые и арамидные волокна) и их физико-механические свойства, технологические особенности и экологическая безопасность. Особое внимание уделяется преимуществам композитных материалов, таким как высокая прочность при сравнительно низком весе, устойчивость к коррозии, возможность вторичной переработки и снижение эксплуатационных затрат.*

В статье анализируются современные методы усиления строительных конструкций с применением композитов, включая обёртывание, инъектирование и замену традиционной арматуры. Также рассматриваются экономические и экологические выгоды использования композитов, а также существующие ограничения, такие как высокая стоимость и необходимость квалифицированного монтажа. Работа подчёркивает перспективы дальнейшего развития технологий композитных материалов и их важную роль в повышении долговечности и безопасности современных строительных объектов.

Ключевые слова: *композитные материалы, железобетонные конструкции, прочность, армирование, строительство, углеродные волокна, стекловолокно, базальтовые волокна, арамидные волокна.*

Код и рубрика: 67.00.00 Строительство. Архитектура

Современные методы строительства требуют повышения прочности и долговечности железобетонных конструкций, особенно когда речь идет об элементах прямоугольного сечения, которые широко используются в строительстве зданий, мостов и других объектов. Применение композитных материалов помогает существенно увеличить несущую способность конструкций, не увеличивая их вес и улучшить стойкость к внешним воздействиям. Композитные системы усиления показывают превосходный результат как при работе конструкций в обычных условиях, так и при их работе в неблагоприятных условиях [1, 2].

Как известно, композитные материалы (композиционные материалы/композиты) представляют собой сочетание двух и более компонентов с

чёткой границей раздела, которые взаимодействуют друг с другом, обеспечивая уникальные свойства [3].

Основными составляющими композитов являются матрица – связующий компонент, обеспечивающий совместную работу армирующих элементов, и армирующие волокна, которые обеспечивают необходимые механические характеристики материала.

Композитные материалы обладают высокой прочностью, низким весом, устойчивостью к коррозии и агрессивным средам, что делает их идеальными для усиления железобетонных конструкций.

Ниже в таблице 1 представлены наиболее часто применяемые композитные материалы и их свойства.

Углеродные волокна, как высокоупругие (ВУ), так и высокопрочные (ВП), действительно обладают высокой прочностью, что позволяет значительно увеличивать прочностные характеристики железобетонных конструкций. Кроме того, они имеют низкую плотность, тем самым снижая общий вес конструкции и облегчая транспортировку и установку. В количественном выражении, модуль упругости углеродных волокон варьируется от 240 до 760 ГПа, а предел прочности при растяжении достигает 5100 МПа при деформации разрыва от 0,5 до 1,75 %, что делает их одними из самых прочных и лёгких материалов.

Таблица 1 – Композитные материалы и их физико-механические свойства

Композитный материал		Модуль упругости, ГПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Деформация при разрыве, %	Удельный вес, кг/м ³
Углеродные волокна	ВУ	390-760	2400-3400	0,5-0,8	1850
	ВП	240-280	4100-5100	1,6-1,75	1750
Стекловолокно		85-90	3500-4800	4,5-5,5	2460
Базальтовые волокна		85–110	2000–3500	3,0–5,0	2650
Арамидные волокна		62-18	3600-3800	1,9-5,5	1450

Стекловолокно, в отличие от стальной арматуры, не подвержено коррозии, что особенно важно в условиях агрессивной среды. При этом его модуль упругости составляет от 85 до 90 ГПа, предел прочности от 3500 до 4800 МПа, а деформация при разрыве достигает от 4,5 до 5,5 %, что обеспечивает высокую устойчивость к нагрузкам и значительную пластичность. Кроме того, стекловолокно не проводит электричество, что исключает электромагнитные помехи, и поэтому его применение становится ключевым в ряде конструкций.

Базальтовые волокна обладают высокой прочностью и устойчивостью к химическим воздействиям. Они превосходят стекловолокно по термостойкости и долговечности, что делает их идеальным выбором для конструкций, подвергающихся экстремальным условиям эксплуатации. Модуль упругости базальтовых волокон находится в диапазоне от 85 до 110 ГПа, предел прочности при растяжении в интервале напряжений от 2000 до 3500 МПа, а деформация при разрыве составляет от 3,0 до 5,0 %. Также они не подвержены коррозии и обладают хорошими изоляционными свойствами, хотя их удельный вес несколько выше – около 2650 кг/м³.

Арамидные волокна известны своей исключительной прочностью и устойчивостью к ударным нагрузкам. Они обладают высоким пределом прочности в диапазоне от 3600 до 3800 МПа, модулем упругости от 18 до 62 ГПа и деформацией при разрыве от 1,9 до 5,5 %, что делает их одновременно лёгкими и прочными. Арамидные волокна не подвержены коррозии и обладают высокой термостойкостью, что обеспечивает их надёжность и долговечность в сложных условиях эксплуатации. Кроме того, эти волокна характеризуются отличными виброизоляционными свойствами, что дополнительно улучшает характеристики конструкций, в которых они применяются.

Преимущества использования композитных материалов заключаются в их высокой прочности и несущей способности при относительно небольшом весе конструкций. Кроме того, они обладают повышенной коррозионной стойкостью, а их долговечность значительно выше, чем у стали и бетона.

Композитные материалы также отличаются технологичностью и гибкостью, что позволяет изготавливать из них конструкции практически любой формы и размеров. Благодаря модульности возведения конструкций из композитов сокращаются сроки и стоимость строительства.

Эти материалы экологичны и безопасны, так как инертны к воздействию окружающей среды. Помимо этого, композиты обладают широкими возможностями вторичной переработки и утилизации отходов по окончании срока службы конструкций. Таким образом, переход к композитным материалам позволяет существенно повысить долговечность и безопасность зданий при минимизации затрат.

Применение композитных материалов в строительстве не только улучшает технические характеристики конструкций, но и обеспечивает значительные экономические и экологические выгоды.

Использование композитов позволяет сократить затраты на материалы и рабочую силу. Благодаря высокой прочности и легкости композитных материалов, их применение снижает необходимость в дополнительных усиливающих элементах, что уменьшает общий вес конструкций и затраты на транспортировку. Кроме того, композитные материалы обладают долгим сроком службы, что уменьшает частоту ремонтов и замен, а также снижает эксплуатационные расходы.

Композитные материалы являются экологически чистыми и безопасными для окружающей среды. Они не выделяют вредных веществ и не подвержены коррозии, что снижает риск загрязнения грунтовых вод и почвы. Более того, композиты могут быть переработаны и использованы повторно, что способствует

уменьшению количества строительных отходов. Это особенно важно в условиях современных экологических стандартов и требований к устойчивому развитию.

Несмотря на многочисленные преимущества, композитные материалы имеют и определённые недостатки, которые необходимо учитывать при их применении в строительстве. Они зачастую дороже традиционных материалов, требуют специализированного оборудования и высокой квалификации работников, а также сложны в ремонте и утилизации. Кроме того, существуют ограничения, связанные с воздействием ультрафиолетового излучения и высоких температур, а также с отсутствием единых стандартов и нормативов, что может затруднять их использование в некоторых регионах и проектах. Подробное сравнение основных достоинств и недостатков композитных материалов представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Преимущества и недостатки композитных материалов

Преимущества	Недостатки
✓ Высокая прочность и несущая способность ✓ Относительно небольшой вес конструкций ✓ Повышенная коррозионная стойкость ✓ Технологичность и гибкость ✓ Возможность изготовления конструкций любой формы и размеров ✓ Сокращение сроков и стоимости строительства ✓ Экологичность и безопасность ✓ Возможности вторичной переработки ✓ Снижение затрат на материалы и рабочую силу	✓ Высокая стоимость по сравнению с традиционными материалами ✓ Необходимость в специализированном оборудовании и высокой квалификации рабочих ✓ Сложность и дороговизна ремонта ✓ Чувствительность к ультрафиолетовому излучению ✓ Потеря механических свойств при высоких температурах ✓ Сложный и энергоёмкий процесс утилизации ✓ Отсутствие четких стандартов и нормативов ✓ Ограниченная доступность в некоторых регионах ✓ Увеличение сроков поставки и затрат на логистику

Учитывая изложенные преимущества и ограничения композитных материалов, важно рассмотреть их свойства в контексте традиционных строительных материалов. Такой сравнительный анализ позволяет более полно оценить целесообразность применения композитов в различных строительных проектах, учитывая долговечность, экономическую эффективность и эксплуатационные характеристики. Далее будет проведено сравнение ключевых свойств традиционных и композитных материалов, что позволит выявить их уникальные преимущества и определить оптимальные области использования.

Сталь отличается высокой прочностью, но её коррозионная стойкость оставляет желать лучшего, а долговечность составляет всего около 50 лет. Технологичность стали можно оценить, как среднюю.

Железобетон также демонстрирует высокую прочность, однако его коррозионная стойкость средняя, а долговечность достигает примерно 70 лет. Технологичность железобетона довольно низкая.

Композитные материалы, напротив, сочетают в себе очень высокую прочность и коррозионную стойкость, а их долговечность превышает 100 лет. Технологичность композитов также на высоте, что делает их идеальным выбором для современного строительства. Эти свойства особенно ценны при усилении железобетонных конструкций.

Вместе с тем, рассматривая методы усиления железобетонных конструкций, можно выделить несколько эффективных подходов.

Во-первых, это обертывание композитными тканями, которое подразумевает обертывание колонн, балок или стен в несколько слоев композитной ткани, чаще всего углеволокна, пропитанной эпоксидной смолой. Такой способ способствует повышению несущей способности колонн на сжатие, увеличению устойчивости к сейсмическим нагрузкам и защите от коррозии. Ранее, в [8] было доказано, что внешнее армирование композитными материалами должно обеспечивать включение в работу элементов усиления совместно с усиливаемой конструкцией, при этом усиленная железобетонная конструкция представляет собой сложную техническую систему [8].

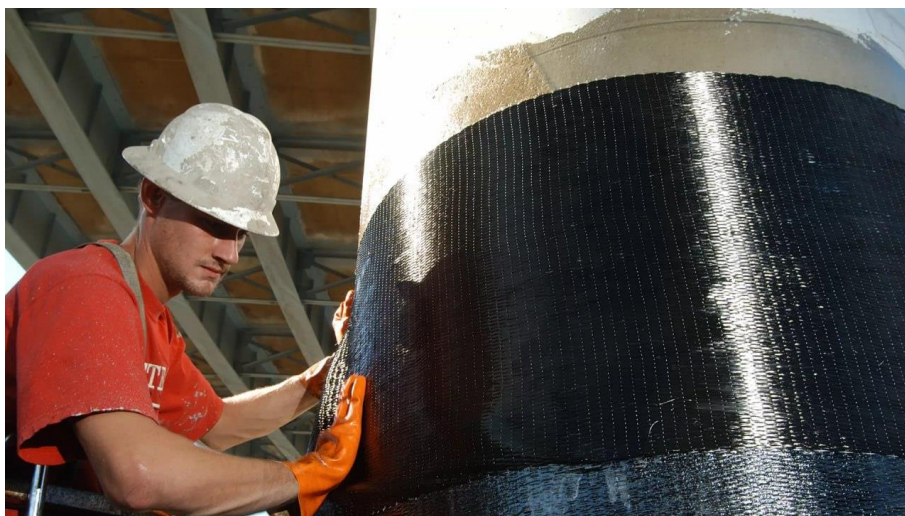


Рисунок 1 – Обертывание колонн в несколько слоев композитной ткани [4]

Во-вторых, это инъектирование композитными материалами, включающее заполнение трещин или пустот в бетоне эпоксидными смолами, усиленными микроволокнами (стекло, углерод), что позволяет точно усилить конструкцию без её демонтажа.



Рисунок 2 – Заполнение трещин или пустот в бетоне эпоксидными смолами, усиленными микроволокнами [5]

В-третьих, установка композитной арматуры, которая включает замену стальной арматуры на композитную (стеклопластиковую, базальтопластиковую) в новых конструкциях или при ремонте, что позволяет создавать коррозионностойкие элементы, уменьшать вес конструкции и обеспечивать долговечность в агрессивных средах, а также электромагнитную нейтральность.



Рисунок 3 – Композитная арматура (стеклопластиковая) [6]

В таблице 3 представлены примеры применения композитных материалов.

Таблица 3 – Применение композитов

Примеры использования КМ	Пояснение	Наиболее известные примеры применения композитов в мире
Усиление балок и колонн	Композитные полосы или ленты, изготовленные из углеродных или стеклонитевых волокон, могут быть адгезионно закреплены на поверхностях железобетонных балок и колонн с целью повышения их несущей способности. Данный метод усиления способствует увеличению долговечности и эксплуатационной надежности конструкций при минимальном приросте массы.	Мост Ибараки в Осаке (Япония) был усилен с применением углеродных ламелей в 1983 году. Данный проект является одним из первых в мире примеров использования углеродных композитных материалов для повышения несущей способности строительных конструкций.
Ремонт трещин и дефектов	При возникновении трещин в железобетонных элементах целесообразно применение композитных материалов для их реставрации и усиления. В частности, инъекционное заполнение трещин специальными композитными смолами способствует повышению механических характеристик конструкции и предотвращает прогрессирование разрушительных процессов.	Инъекционное уплотнение скальных трещиноватых грунтов в основании плотины гидроэлектростанции на реке Енисей в Красноярском крае (Россия).
Укрепление мостов	В мостовых конструкциях композитные материалы используются для усиления пролетных строений и опор, что способствует увеличению эксплуатационного ресурса мостов и повышению безопасности транспортного движения.	Мост в округе Морган (Теннесси, США). В 2020 году осуществлён проект по замене повреждённого бетонного моста на конструкцию, выполненную из волокноно-армированных композитных материалов.
Усиление плит	Композитные материалы применяются для усиления потолочных и половых плит, что обеспечивает повышение их несущей способности и сопротивляемости деформациям при увеличенных нагрузках.	Усиление плит покрытия производственного корпуса химического предприятия в Перми (Россия).

В завершении, стоит отметить о композитных материалах, что их применение в усилении железобетонных конструкций открывает новые горизонты в современном строительстве, сочетая инновационные технологии с повышенной эксплуатационной надежностью [10]. Эти материалы, обладающие высокой прочностью, устойчивостью к коррозии и малым весом, позволяют значительно увеличить прочностные характеристики существующих конструкций, а также продлить их срок службы. При этом, технологию нельзя назвать инновационной, так как она была разработана в 70-х гг. прошлого века. Однако на территории Российской Федерации технология стала использоваться в 2002 г. Важно учитывать, что низкие темпы внедрения использования углепластиков для повышения прочности и прочих характеристик современных строительных конструкций были связаны с отсутствием соответствующей нормативно-правовой базы, которая регламентировала бы контроль качества и методику расчета [7].

Разнообразие [9] методов усиления (от наклейки ламелей и обертывания тканями до инъектирования) позволяет гибко адаптировать технологии к конкретным задачам. При этом ключевым остается принцип минимального вмешательства: композитные решения не увеличивают массу конструкций и часто реализуются без остановки их эксплуатации.

В будущем ожидается дальнейшее развитие технологий, связанных с производством и использованием композитных материалов, что сделает их ещё более доступными и эффективными в строительстве. Следовательно, интеграция композитов в практику усиления железобетонных конструкций может стать одним из ключевых факторов повышения безопасности и надежности строительных объектов.

Список использованной литературы

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / Под ред. Кербера М. Л. – Текст: непосредственный // ПластИнфо. – 2014. – URL: https://plastinfo.ru/information/literature/46_2014/ (дата обращения: 20.05.2025).
2. Батаев, А. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение / А. А. Батаев, В. А. Батаев. – Текст: непосредственный // Лабиринт. – URL: <https://www.labirint.ru/books/565544/> (дата обращения: 20.05.2025).
3. Полищук А. С. Применение композитных материалов при усилении железобетонных конструкций / А.С. Полищук // Вестник магистратуры. – 2019. – №4-2 (91). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-kompozitnyh-materialov-pri-usilenii-zhelezobetonnyh-konstruktsiy> (дата обращения: 31.05.2025).
4. Как правильно клеить композитные материалы на основе углеродного волокна. – Режим доступа: <https://horseen.kz/blog/kak-pravilno-kleit-kompozitnye-materialy-na-osnove-uglerodnogo-voлокna/> (дата обращения: 29.05.2025).
5. Инъектирование бетона: Эффективные методы укрепления конструкций. – Режим доступа: <https://composit-s.ru/inektirovanie-betona-effektivnye-metody-ukrepleniya-konstrukcij/> (дата обращения: 29.05.2025).

6. Стеклопластиковая арматура: характеристики, свойства и область применения. – Режим доступа: <https://арматурыч.рф/statyi/stekloplastikovaya-armatura-harakteristiki-svoystva-i-oblast-primeneniya/> (дата обращения: 29.05.2025).

7. Волгин, А. С., Иванов И. А. Применение композитных материалов при усилении железобетонных конструкций зданий и сооружений, эксплуатирующихся в агрессивных средах / А. С. Волгин, И. А. Иванов // Инновации и инвестиции. – 2021. – №9. – С. 130-133.

8. Римшин В. И. Бетонные конструкции, усиленные композитным материалом / В. И. Римшин, С. И. Меркулов, С. М. Есипов // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2018. – №2 (35). – С. 93-100. – Режим доступа: <https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/715/2018-2-12.pdf> (дата обращения: 31.05.2025).

9. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами. ГУПНИИЖБ. – М.: Интераква. – 2006. – 48 с.

10. Ильина, В. Н. Влияние наноуглеродных наполнителей на свойства композиционных материалов / В. Н. Ильина, С. В. Ильин, В. А. Гафарова, И. Р. Кузеев // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2023. – Т. 15. – № 3. – С. 228-237.

THE USE OF COMPOSITE MATERIALS IN REINFORCING REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Yulia M. Yazykova, Alina T. Baycherkesova, undergraduate students, 2nd year

Ekaterina V. Poyarkova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines

Orenburg State University

Abstract: *The article is devoted to the topical topic of integrating new technologies into construction practice, with an emphasis on the use of composite materials to strengthen reinforced concrete structures. The paper considers the main types of composite materials (carbon, fiberglass, basalt and aramid fibers) and their physical and mechanical properties, technological features and environmental safety. Special attention is paid to the advantages of composite materials, such as high strength with relatively low weight, corrosion resistance, recyclability and reduced operating costs.*

The article analyzes modern methods of reinforcing building structures using composites, including wrapping, injecting and replacing traditional reinforcement. The economic and environmental benefits of using composites are also considered, as well as existing limitations such as high cost and the need for qualified installation. The work highlights the prospects for further development of composite materials technologies and their important role in improving the durability and safety of modern construction facilities.

Keywords: *composite materials, reinforced concrete structures, strength, reinforcement, construction, carbon fibers, fiberglass, basalt fibers, aramid fibers.*



СЕКЦИЯ 3

«ПРОЦЕССЫ РАЗРУШЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ»

ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ ПОЖАРА: ПОЧЕМУ КОНСТРУКЦИИ ТЕРЯЮТ НАДЕЖНОСТЬ

Андреева Елизавета Андреевна, Иноземцева Екатерина Евгеньевна,
Мельников Максим Александрович, студенты бакалавриата, 2 курс

Оренбургский государственный университет

Аннотация. Огнеупорные материалы играют критически важную роль в обеспечении пожарной безопасности зданий и сооружений. Эти материалы, способные выдерживать высокие температуры и предотвращать распространение огня, являются неотъемлемой частью современного строительства. Однако, несмотря на их прочность и эффективность, существуют определенные условия и сценарии, при которых даже огнеупорные конструкции могут потерять свою надежность.

Ключевым фактором, влияющим на устойчивость огнеупорных материалов к пожарам, является их способность сохранять структурную целостность под воздействием экстремальных температур. При высоких температурах металлические элементы конструкций могут размягчаться, а бетон – трескаться и разрушаться. Это приводит к снижению несущей способности и, как следствие, к возможному обрушению. Важно понимать эти процессы для разработки более эффективных строительных решений и материалов.

Работа выполнена на кафедре механики материалов, конструкций и машин Оренбургского государственного университета **под руководством Поярковой Екатерины Васильевны**, доктора технических наук, доцента, заведующим кафедрой механики материалов, конструкций и машин.

Ключевые слова: пожар, огнеупорные материалы, последствия пожара, конструкции, строительство.

Код и рубрика: 67.00.00 Строительство. Архитектура

Огнеупорные материалы являются ключевым элементом конструкционной безопасности в строительстве, особенно в зданиях с высоким риском пожара, таких как склады, производственные цехи и общественные здания. Эти материалы способны выдерживать высокие температуры без потери структурной целостности, что критично для предотвращения обрушения здания в случае пожара.

Использование огнеупорных материалов в конструкциях обеспечивает не только защиту самого здания и находящихся в нем людей, но и существенно замедляет распространение огня, давая больше времени для эвакуации и работы спасательных служб. Также это помогает минимизировать материальный ущерб и влияние на окружающую среду [1, с.105].

Применение технологий огнестойкости в строительстве не ограничивается только использованием специализированных огнеупорных материалов, таких как огнестойкий бетон или кирпич. Важную роль играют также огнезащитные

покрытия и спрей-системы, которые могут значительно повысить огнестойкость стандартных строительных материалов.

К сожалению, в случаях, когда при строительстве экономят на огнеупорных материалах, последствия пожара могут быть катастрофическими. Строящиеся, построенные без должного учета огнестойкости материалов, гораздо быстрее поддаются разрушению под воздействием высоких температур, что увеличивает риск травм и потери жизней. По этой причине строгое соблюдение норм и требований пожарной безопасности является обязательным при проектировании каждого нового объекта [1, с.106].

Пожар оказывает многогранное воздействие на конструкционные материалы, что может привести к их деформации, потере прочности и, как следствие, обрушению конструкций. Основными факторами, влияющими на устойчивость материалов при пожаре, являются температура, продолжительность воздействия огня и характеристики самого материала.

Исследования показывают, что при воздействии высоких температур огнеупорные материалы испытывают не только механические деформации, но и химические изменения, которые могут существенно влиять на их структурную целостность. Так, в исследованиях [7, 8] показано, что длительное воздействие температур приводит к изменению микроструктуры огнеупорных бетонов, что снижает их прочность и увеличивает риск разрушения конструкций при пожаре.

При повышении температуры происходит термическое расширение материалов. Это может вызвать внутренние напряжения, если различные части конструкции расширяются неодинаково. Кроме того, при достижении определённой критической температуры, материалы начинают терять свою прочность. Например, сталь при температуре около 600 °C теряет примерно 50% своей прочности, что делает её подверженной деформации под собственным весом или дополнительной нагрузкой от обрушающихся элементов.

Дерево, будучи органическим материалом, начинает гореть и разрушаться уже при относительно низких температурах. Разрушение деревянных элементов структуры может привести к образованию пустот, что уменьшает общую устойчивость здания [3, с.251].

Бетон, хотя и считается огнестойким материалом, также уязвим при пожаре. Длительное воздействие высоких температур может привести к образованию трещин и, в случае наличия армирования, к коррозии металла внутри бетона. Это снижает его несущую способность и может вызвать обрушение конструкции.

Сталь, используемая в качестве армирования бетона или в качестве несущих конструкций, также чрезвычайно уязвима при высоких температурах. Пожар может снизить её прочность и упругие свойства за счет ослабления металлической структуры. Под воздействием температур, превышающих 500 °C, сталь начинает терять свою жесткость, что может привести к деформации и потере несущей способности [3, с.251].

Кирпич, хоть и является огнеупорным, тоже страдает от длительного воздействия высокой температуры. Интенсивное нагревание может изменить его внутреннюю структуру, снижая способность выдерживать нагрузки. Даже в

случаях, когда внешне кирпичные стены кажутся невредимыми, их внутренняя часть может быть насквозь ослаблена, что существенно уменьшает общую устойчивость конструкции.

Все эти изменения делают материалы не только менее надежными в плане структурной целостности, но и повышают риск обрушения, что делает их повторное использование в строительстве после пожара чрезвычайно рискованным. Оценка ущерба и принятие решения о возможности ремонта или замены требуют тщательного обследования и анализа со стороны квалифицированных специалистов [3, с.252].

Таким образом, пожар воздействует на конструкции, вызывая сложные физико-химические изменения в материалах. Уменьшение механической прочности, деформации, возникновение трещин и полное разрушение – все это факторы, которые существенно снижают надежность и безопасность зданий при пожаре и после него.

Последствия пожара для надежности зданий могут быть катастрофическими, поскольку высокие температуры и продолжительное воздействие огня негативно сказываются на многих строительных материалах. Арматурные стали в бетонных конструкциях, например, начинают терять свою прочность и жесткость при температурах выше 500°C. Это приводит к изменению их характеристик, деформации и, как следствие, к разрушению бетонной матрицы, что значительно уменьшает несущую способность конструкции.

Наиболее уязвимы в пожаре оказываются металлические элементы зданий, такие как стальные балки и колонны. При нагревании металл расширяется и теряет прочность, что может привести к потере устойчивости конструкции и обрушению зданий. В дополнение, стальные профили могут служить проводниками температуры, распространяя огонь на другие, менее защищенные участки здания [2, с.63].

Древесина, используемая в строительстве, также подвержена быстрому уничтожению при воздействии огня, что приводит к обрушению кровель и перекрытий. Несмотря на возможность её защиты специальными огнезащитными составами, эффективность такой защиты зависит от регулярности обслуживания и условий эксплуатации.

Кроме механических повреждений, пожар также может вызвать химические и структурные изменения в материалах. Например, бетон может испытывать спекание, которое изменяет его пористую структуру и снижает прочность. Образование трещин и разрушение внутренних связей усугубляют эту проблему, поскольку они помогают распространению огня и дыма, делая восстановление зданий более затратным и времязатратным.

Эти факторы подчеркивают важность применения огнеупорных материалов и технологий в строительстве, а также необходимость регулярного обследования и обновления защиты зданий от пожара [2, с.64].

Оценка огнеупорных материалов имеет ключевое значение в обеспечении безопасности зданий при пожаре. Тестирование таких материалов проводится для оценки их способности сопротивляться высоким температурам и огню. В

ходе испытаний проверяется стойкость, время выдерживания структурных и неконструктивных элементов под воздействием огня и температуры.

Процесс тестирования включает в себя подвергание материалов воздействию контролируемых температурных условий в специализированных печах так, чтобы воспроизвести различные сценарии реальных пожаров. Такие испытания помогают определить, насколько долго материал может защищать конструкцию, не теряя своих изначальных характеристик, таких как несущая способность и предел огнестойкости.

Сегодня используются различные стандарты и нормы для тестирования огнеупорных материалов. Они помогают установить общие требования к безопасности и эффективности, которым должны соответствовать продукты перед их использованием в строительстве. Например, в Европе это может быть EN 1363-1, в США – ASTM E119. Эти стандарты задают критерии, которые учитывают такие факторы, как тип пламени, интенсивность теплового потока и продолжительность воздействия огня [4, с.70]. В дополнение к европейским и американским стандартам, международный стандарт ISO 834-1:1999 является основным для испытаний огнестойкости строительных материалов и конструкций и широко применяется в Азии и Европе.

Такие комплексные подходы к тестированию помогают обеспечивать, что использование огнеупорных материалов на практике будет максимально надежным и безопасным. Итоговое тестирование и сертификация материалов позволяют не только сохранить целостность здания в экстремальных условиях, но и значительно снизить риск для жизни и здоровья людей при пожаре.

Вместе с тем, безопасность и надежность инженерной конструкции на этапе строительства являются жизненно важными компонентами анализа рисков жизненного цикла и контроля конструкции. Статистика показывает, что несчастные случаи на этапе строительства происходят значительно чаще, чем на обычном этапе эксплуатации [8]. Механизмы высокотемпературной деградации и снижение огнестойкости строительных конструкций на стадии строительства существенно отличаются от тех, что наблюдаются в период эксплуатации. Это обусловлено, прежде всего, двумя основными факторами: 1) стальные конструкции на этапе строительства, как правило, не имеют полноценной противопожарной защиты, что повышает их уязвимость к потере стабильности и разрушению под воздействием огня; 2) некоторые бетонные конструкции находятся в ранней стадии твердения (моложе 28 суток), и процесс гидратации цемента еще не завершён, вследствие чего их поведение при высоких температурах и развитие термических повреждений во времени существенно отличаются от свойств полностью затвердевшего бетона. Поэтому необходимо проводить исследования огнестойкости инженерных конструкций с учетом воздействия пожаров на этапе строительства [7].

После пожара конструкции UHPCFST, подвергшиеся высокотемпературному повреждению, испытывают значительное снижение несущей способности, неизбежно теряя часть своих первоначальных структурных функций. Продолжение использования таких поврежденных конструкций представляет серьезную угрозу безопасности людей. Однако снос

зданий после пожара может привести к ненужной трате ресурсов и загрязнению окружающей среды [9].

И в этой связи в современном строительстве особое внимание уделяется разработке и применению инновационных огнеупорных материалов. Эти материалы предназначены для повышения устойчивости зданий к высоким температурам и огню, что жизненно важно для снижения риска обрушения конструкций во время пожара и последующего восстановления. Перспективные исследования в этой области включают разработку новых композиционных материалов, таких как бетоны с добавлением полипропиленовых волокон, которые при нагреве способны выделять воду и тем самым снижать температуру внутри конструкции.

Также значительные успехи достигнуты в использовании нанотехнологий для создания более эффективных огнестойких покрытий. Наночастицы могут значительно улучшить теплоизоляционные свойства материалов и увеличить их способность отражать тепловое излучение. Это обеспечивает дополнительную защиту стальных и железобетонных конструкций, которые особенно уязвимы в условиях высоких температур.

Разработка умных огнезащитных систем, интегрированных в строительные материалы, также открывает новые возможности для обеспечения безопасности зданий. Использование датчиков температуры и дыма, встроенных в строительные элементы, позволяет создавать системы, которые могут активировать огнезащитные меры автономно, ещё до прибытия пожарных команд [5].

Совместно эти инновации предлагают значительное улучшение в обеспечении безопасности и надежности строительных конструкций, сокращая риск их разрушения во время и после пожара. Это оказывает весомое влияние на сохранность жизни и здоровья людей, а также на скорость восстановления пострадавших объектов.

Таким образом, огнеупорные материалы – неотъемлемая часть строительных норм и правил, призванных обеспечить безопасность конструкций в случае пожара. Они проектируются таким образом, чтобы выдерживать высокие температуры и предотвращать распространение огня, что критически важно для защиты жизни людей и сохранения имущества. Соблюдение этих норм регулируется государственными органами строительного надзора, а также местными строительными кодексами.

Научно-исследовательские институты и университеты проводят эксперименты и испытания огнеупорных материалов, чтобы оценить их эффективность и срок службы. Эти данные используются для обновления и оптимизации строительных стандартов. В зависимости от страны, регламентация этих стандартов может значительно различаться, но тенденция к ужесточению требований является общемировой [6, с.33].

Статистика показывает, что строения, построенные с учетом современных требований к огнеупорным материалам, значительно лучше справляются с последствиями пожара. Например, в США, согласно данным Ассоциации противопожарной защиты (NFPA), использование улучшенных огнестойких

материалов в строительстве с 2000 года позволило снизить количество жертв пожаров на 50% и уменьшить материальный ущерб на 30%. Эти данные акцентируют внимание на важности инвестиций в качественные, современные огнеупорные материалы как часть стратегии обеспечения публичной безопасности.

Вместе с тем, в современном строительстве и эксплуатации зданий все более широкое применение находят комплексные программные решения, позволяющие моделировать не только обычные режимы эксплуатации, но и возникновение чрезвычайных ситуаций, включая пожары, а также природные и климатические катаклизмы, связанные с повышенными температурами. Такие системы позволяют прогнозировать поведение строительных конструкций в условиях термического воздействия, учитывать влияние деформаций, изменения физических свойств материалов и взаимодействия различных факторов риска. Использование цифровых двойников и интеграция данных с датчиков мониторинга температуры и состояния конструкций обеспечивают оперативное принятие решений по обеспечению безопасности и минимизации ущерба.

Одним из ключевых инструментов в этой области являются BIM-технологии (Building Information Modeling), которые позволяют создавать цифровые модели зданий с учетом их пространственных, технических и эксплуатационных характеристик. В частности, в [10] представлена методика расчета железобетонных конструкций с учетом деформаций ползучести и воздействия температурных факторов с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР, что соответствует современным государственным требованиям по информационному моделированию зданий. Такие подходы обеспечивают более точное прогнозирование поведения конструкций при пожарах и других экстремальных условиях, способствуя разработке эффективных мер по повышению их огнестойкости и общей безопасности.

Список использованной литературы

1. Инфракрасная термография в оценке огнестойкости строительных материалов и конструкций в условиях пожара / Д. П. Касымов, М. В. Агафонцев, П. С. Мартынов [и др.] // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XV Всероссийской школы-конференции молодых ученых, 25 февраля – 5 марта 2021 г., Новосибирск – Шерегеш. Новосибирск. – 2021. – С. 105–106.

2. Кошелев, А. С. Обеспечение огнестойкости несущих конструкций как основной фактор предотвращения опасных факторов пожара в общественных зданиях / А. С. Кошелев, Г. А. Переладов. // Молодой ученый. – 2022. – № 4 (399). – С. 61-64. – URL: <https://moluch.ru/archive/399/88291/> (дата обращения: 23.05.2025).

3. Минайлов, Д. А. Выбор температурного режима огневых испытаний строительных конструкций: матер. двадцать третьей международной научно-

технической конференции «Системы безопасности – 2024» / Д. А. Минайлов. – Место издания: Академия ГПС МЧС России. – 2024. – С. 251–254.

4. Пособие по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций из тяжелого бетона (пособие к СТО 36554501–006–2006) / А. Ф. Милованов, В. В. Соломонов, И. С. Кузнецова [и др.]. – Москва: Строительство, 2022. – 123 с.

5. СП 329.1325800.2017. Свод правил. Здания и сооружения. Правила обследования после пожара. (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 30.10.2017 №1490/пр). – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/556793892> (дата обращения: 20.05.2025).

6. Шебеко, Ю. Н. Расчетная оценка эквивалентной продолжительности пожара для строительных конструкций на основе моделирования пожара в помещении / Ю. Н. Шебенко А. Ю. Шебеко, Д. М. Гордиенко // Пожарная безопасность. – 2025 – № 1. – С. 31–39.

7. Tan Wang, Compression performance of ultra-high performance concrete filled steel tube (UHPCFST) columns exposed to elevated temperature during construction / Tan Wang, Min Yu, Wenlan Liao, Chunlei Yu, Jianqiao Ye // Engineering Structures. – 2025. – Volume 326. – Pp. 119553. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119553> – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029624021151> (дата обращения: 31.05.2025).

8. T. Wang et al. Post-fire mechanical behaviour of ultra-high-performance concrete-filled steel tube (UHPCFST) stub columns under compression

9. Ekmekyapar, T. Post-fire resistance of internally ring stiffened high performance concrete filled steel tube columns / T. Ekmekyapar, I. A. Alhatmey // Engineering Structures. – 2019. – Т. 183. – С. 375-388.

10. Meiyu Shao, Building constructions calculation models of reinforced concrete using BIM technologies / Meiyu Shao, Maria Barabash, Olha Bashynska, Yaroslav Bashynskyi, Andrii Bieliatynskyi // Ain Shams Engineering Journal. – 2024. – Volume 15, Issue 9. – Pp. 102894. – <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102894> – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447924002697> (дата обращения: 31.05.2025).

REFRACTORY MATERIALS AND CONSEQUENCES OF FIRE: WHY STRUCTURES LOSE RELIABILITY

**Andreeva Elizaveta Andreevna, Inozemtseva Ekaterina Evgenievna,
Melnikov Maxim Aleksandrovich, undergraduate students, 2nd year**

Orenburg State University

Abstract. Refractory materials play a critical role in ensuring fire safety of buildings and structures. These materials, capable of withstanding high temperatures and preventing the spread of fire, are an integral part of modern construction. However, despite their strength and effectiveness, there are certain conditions and scenarios under which even fire-resistant structures can lose their reliability.

A key factor affecting the resistance of refractory materials to fire is their ability to maintain structural integrity under the influence of extreme temperatures. At high temperatures, metal elements of structures can soften, and concrete can crack and collapse. This leads to a decrease in load-bearing capacity and, as a result, to possible collapse. It is important to understand these processes in order to develop more effective construction solutions and materials.

The work was carried out at the Department of Mechanics of Materials, Structures, and Machines of Orenburg State University under the guidance of Poyarkova Ekaterina Vasilyevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanics of Materials, Structures, and Machines.

Keywords: fire, refractory materials, consequences of fire, structures, construction.

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА РАЗРУШЕНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Асанова Анастасия Эльдаровна, студентка бакалавриата, 4 курс

Оренбургский государственный университет

Аннотация. В данной статье рассматриваются процессы разрушения и прогнозирования механического поведения материалов. В работе подробно описываются основные типы разрушения материалов, методы процессов прогнозирования поведения материалов, виды воздействий на конструкции и материалы, классификация и воздействие окружающей среды на материалы конструкции зданий и сооружений.

Ключевые слова: разрушение, прогнозирование, коррозия, материал, усталость, ползучесть, деформация, конструкции, растрескивание.

Код и рубрика: 67.09.00 Строительные материалы и изделия.

В современном строительстве особое значение приобретает долговечность и надежность зданий и сооружений, которые эксплуатируются в различных климатических и техногенных условиях. Воздействие факторов окружающей среды (температурных колебаний, влажности, коррозионных процессов и других) существенно влияет на механическое поведение строительных материалов и конструкций. Прогнозирование разрушения и деформаций материалов позволяет повысить безопасность эксплуатации, снизить затраты на ремонт и продлить срок службы объектов строительства. В связи с этим изучение процессов разрушения и методов прогнозирования поведения материалов, применяемых в строительстве, является актуальной и востребованной задачей.

Процессы разрушения и прогнозирования механического поведения материалов – это обширная область, которая изучает механизмы разрушения материалов под действием внешних нагрузок и позволяет предсказать разрушение материалов в процессе эксплуатации. Данная область включает в себя анализ зарождения и распространения трещин в материале, а также запас прочности и надежности конструкции.

Существует несколько типов разрушения материалов: хрупкий разрыв, вязкое разрушение, усталость, ползучесть, коррозия.

Хрупкий разрыв материала – это тип разрушения, при котором металл разрушается очень быстро. При данном типе разрушения трещины в материале распространяются внезапно, без пластических деформаций. Для стали скорость появления трещины достигает 2500 м/с. поэтому хрупкое разрушение называют «внезапным» или «катастрофическим». При визуальном изучении излом, имеющий характерный металлический блеск будет указывать на хрупкое разрушение. Данный тип разрушения происходит при пониженной температуре воздуха, данное явление получило название «хладноломкость». Хрупкое разрушение распространяется внутри отдельных зерен металла вдоль плоскости с наиболее плотной упаковкой атомов, которая называется плоскостью скола.

Основной механизм вязкого разрушения связан с необратимыми пластическими деформациями, вызванными превышением предельно допустимого напряжения для упругих элементов. Данный тип разрушения сопровождается пластическими деформациями и малой скоростью распространения трещины. Вязкое разрушение происходит по телу зерна металла. При визуальном изучении матовый и ячеистый излом указывает на вязкое разрушение.

Усталость – это процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению. Изменение состояния материала при усталостном процессе отражается на его механических свойствах. Эти изменения протекают по стадиям и зависят от исходных свойств, вида напряжённого состояния, истории нагружения и влияния среды. На определённой стадии начинаются необратимые явления снижения сопротивления материала разрушению, характеризующиеся как усталостное повреждение. Сначала в структуре материала образуются микротрещины, которые на дальнейших стадиях перерастают в макротрещины либо приводят к окончательному разрушению элемента конструкции [1].

Ползучесть материалов – медленная, происходящая с течением времени, деформация твёрдого тела под воздействием постоянной нагрузки или механического напряжения. Ползучесть наблюдают при растяжении, сжатии, кручении и других видах нагружений. Процессы, которые приводят к ползучести, зависят от вида материалов и от условий эксплуатации здания. Физический механизм ползучести имеет преимущественно диффузионную природу.

Коррозия – это процесс самопроизвольного разрушения металлов при контакте их с окружающей средой. Коррозионные разрушения наблюдаются при контакте металла с влажной и газообразной средой [2, 6]. Существует несколько типов коррозии материала:

1. Равномерная коррозия характеризуется ржавлением железа и потускнением серебра. Потеря блеска никеля на воздухе и высокотемпературное окисление металлов также являются примерами равномерной коррозии.

2. Питтинговая коррозия, как вид разрушения в виде точек локального типа, возникает, когда скорость коррозии на одном участке больше скорости коррозии на другом участке материала. Если поражение находится на небольшой площади, то коррозия находится глубоко в материале, если участки обширные и глубина небольшая – возникают язвенные поражения.

3. Обесцинкование, как вид разрушения медных сплавов, при котором преимущественно растворяется цинк, а медь остается на поверхности в виде пористого слоя. Прокорродировавшее таким образом, изделие нередко остается в исходном виде, но теряет свою прочность и пластичность.

4. Межкристаллитная коррозия (локальное коррозионное разрушение по границам зерен металла), приводящее к потере прочности и пластичности. Межзеренное вещество, действующее как растворимый анод, контактирует

большой поверхностью самих зерен, являющихся катодом. Коррозия протекает быстро, глубоко проникая в металл и приводя к катастрофическим разрушениям.

5. Растрескивание металла под действием периодических или растягивающих напряжений в коррозионной среде называют коррозионной усталостью. Если напряжение не превышает критического значения, называемого пределом усталости, то вне коррозионной среды металл не будет разрушаться при сколь угодно большом числе циклов нагружения. В коррозионной среде истинный предел усталости обычно не достигается, так как металл разрушается после определенного числа циклов независимо от напряжения. Типы сред, вызывающих коррозионную усталость, разнообразны и неспецифичны [2].

Процессы прогнозирования механического поведения материалов представляют собой сложную и многоаспектную задачу, которая требует учёта взаимодействия материалов с разнообразными нагрузками и условиями окружающей среды. Основной целью таких прогнозов является определение того, как материалы будут вести себя в процессе эксплуатации под воздействием комплексных факторов, включая механические, термические, химические и климатические воздействия [9]. Для достижения этой цели необходимо учитывать характеристики материала, такие как прочность, упругость, пластичность, усталостная стойкость и другие механические параметры, влияющие на долговечность и надёжность конструкций [7, 10, 11].

Прогнозирование механического поведения материалов может осуществляться двумя основными методами: теоретическим и эмпирическим. Теоретический подход базируется на фундаментальных физических принципах и математическом моделировании. В его основе лежат уравнения механики сплошных сред, которые описывают деформацию и напряжённое состояние материала под воздействием внешних нагрузок. Такие модели позволяют учитывать сложную взаимосвязь между структурой материала, его физико-механическими свойствами и приложенными воздействиями. Применение теоретических моделей требует точного знания начальных условий, параметров материала и граничных условий, что позволяет прогнозировать поведение материала в широком диапазоне эксплуатационных ситуаций.

Эмпирический метод прогнозирования основан на накопленном опыте и экспериментальных данных. В этом подходе изучается влияние различных факторов окружающей среды, таких как влажность, агрессивность среды, температура, на изменение свойств материала. Экспериментальные исследования включают испытания образцов при различных условиях нагружения и окружающей среды с последующей обработкой полученных результатов с помощью статистических и математических методов. Результатом является формализация зависимостей между воздействующими факторами и изменением механических характеристик, что позволяет создавать эмпирические модели прогнозирования.

Современное проектирование строительных конструкций преимущественно опирается на эмпирический метод предельных состояний. Этот метод учитывает максимально допустимые уровни деформаций и

напряжений, при которых конструкция сохраняет свою работоспособность и безопасность. Однако в реальных условиях эксплуатации конструкции подвергаются длительному воздействию циклических нагрузок и изменяющихся температурных режимов, что существенно усложняет прогнозирование. Для более точного учёта этих факторов применяется термофлуктуационная концепция разрушения и деформирования твёрдых тел, которая рассматривает тепловое движение атомов как ключевой механизм процессов повреждения.

Термофлуктуационная теория описывает разрушение материалов как результат накопления и развития локальных тепловых флуктуаций, приводящих к образованию и росту микротрещин. В этом контексте механические нагрузки играют роль катализатора, уменьшая энергию связей и способствуя активации процессов разрушения. Таким образом, нагрузка не является единственным фактором, но взаимодействует с температурными флуктуациями, определяя скорость и характер повреждений. Это позволяет объяснять явления, которые не поддаются классическим механическим моделям, например, долговременное усталостное разрушение при относительно низких уровнях напряжений.

Особое внимание в прогнозировании уделяется учёту влияния окружающей среды, так как химические и физические воздействия способны существенно изменять механические свойства материалов. Коррозионные процессы, воздействие агрессивных сред, циклы замораживания-оттаивания и другие факторы приводят к образованию дефектов, снижению прочности и изменению пластичности. Включение этих факторов в модели прогнозирования требует комплексного подхода, сочетающего механические, химические и термодинамические методы, что значительно повышает точность оценок долговечности конструкций [8].

В целом, современное прогнозирование механического поведения материалов представляет собой интеграцию теоретических моделей, эмпирических данных и учёта влияния окружающей среды. Такой комплексный подход обеспечивает более надёжные и точные оценки состояния материалов в процессе эксплуатации, что является необходимым условием обеспечения безопасности и экономической эффективности строительных объектов. Дальнейшее развитие методов прогнозирования связано с совершенствованием многофакторных моделей, развитием экспериментальных методик и внедрением цифровых технологий, таких как машинное обучение и искусственный интеллект, для обработки больших объёмов данных и повышения прогнозной точности.

Кроме того, механическое поведение твёрдых тел осложняется физико-химическим воздействием окружающей среды. Окружающая среда, в условиях которой эксплуатируются строительные изделия и конструкции, может иметь различную природу и состав. Это может быть атмосфера (газ, вода), почва; кислоты, щёлочи, соли и их растворы; минеральные и органические вещества в жидком и твёрдом состояниях; а также различные комбинации указанных сред и их сочетания с электрическим током, световыми и радиоактивными излучениями.

Ниже, в таблице 1, представлена классификация воздействий окружающей среды.

Таблица 1 – Классификация воздействий окружающей среды на конструкции

Класс воздействия	Описание	Примеры факторов
Химико-физические воздействия	Воздействия, связанные с химическими реакциями и физическими процессами, изменяющими состав и структуру материалов.	Коррозия, старение, окисление, выщелачивание.
Механические воздействия	Воздействия, вызывающие механические напряжения, деформации и разрушения конструкций.	Ветровые нагрузки, вибрации, циклические нагрузки, землетрясения.
Климатические воздействия	Воздействия, связанные с изменениями климатических условий, влияющие на свойства материалов и конструкций.	Колебания температуры, влажности, замораживание – оттаивание.
Биологические воздействия	Воздействия, вызванные живыми организмами, которые разрушают или изменяют материалы.	Гниение древесины, коррозия под действием микроорганизмов, плесень.
Случайные и катастрофические воздействия	Воздействия внезапного и интенсивного характера, способные привести к значительным повреждениям.	Ураганы, цунами, пожары, наводнения.

В современном строительстве для обеспечения долговечности и надёжности зданий и сооружений необходимо учитывать особенности механического поведения различных строительных материалов. Каждый материал обладает уникальными характеристиками, определяющими его устойчивость к различным видам нагрузок и воздействиям окружающей среды. Понимание типовых механизмов разрушения материалов и стадий их развития является ключевым для разработки эффективных методов прогнозирования поведения конструкций в процессе эксплуатации [5]. Это позволяет своевременно выявлять потенциальные проблемы и принимать меры по их предотвращению, что существенно повышает безопасность и экономическую эффективность строительных объектов.

Ниже в таблице 2 представлены основные материалы, используемые в строительстве зданий и сооружений, их типичные механизмы разрушения, основные стадии повреждений, а также применяемые методы прогнозирования механического поведения и разрушения. Таблица систематизирует информацию,

необходимую для комплексного анализа и выбора подходящих методов оценки долговечности конструкций с учётом специфики материала.

Таблица 2 – Характеристика материалов, механизмов разрушения и методов прогнозирования механического поведения в строительстве

Материал	Типичные механизмы разрушения	Основные стадии разрушения	Методы прогнозирования поведения и разрушения
Сталь	Коррозия (равномерная, питтинговая, межкристаллитная и др.), усталость, хрупкий и вязкий разрыв	1) Инициирование микротрещин. 2) Рост трещин. 3) Макротрещины и разрушение.	Теоретические модели механики сплошных сред; эмпирические методы усталостного анализа; термофлуктуационная теория
Бетон	Коррозия арматуры, растрескивание из-за усадки и температурных деформаций, сульфатная коррозия, морозное разрушение	1) Формирование микротрещин. 2) Рост и объединение трещин. 3) Потеря прочности и разрушение.	Эмпирические методы предельных состояний; моделирование деформаций и трещинообразования; климатическое моделирование
Древесина	Гниение, биологическое разрушение, высыхание и растрескивание, коррозия металлов крепежа	1) Поверхностное повреждение . 2) Глубокое проникновение разрушения. 3) Потеря несущей способности.	Эмпирические оценки долговечности; мониторинг влажности и биологических факторов; моделирование влажностных деформаций
Композитные материалы	Деламинация, накопление усталостных повреждений, коррозия матрицы или волокон	1) Инициирование дефектов. 2) Рост повреждений. 3) Локальные и глобальные разрушения.	Механические модели разрушения композитов; методы неразрушающего контроля; численное моделирование усталости
Кирпич и камень	Выветривание, коррозия солями, морозное разрушение, растрескивание от нагрузок	1) Поверхностные дефекты. 2) Глубокое проникновение повреждений. 3) Потеря прочности.	Эмпирические методы оценки долговечности; моделирование влажностных и температурных воздействий

Анализ представленной таблицы подчёркивает необходимость комплексного подхода к прогнозированию механического поведения строительных материалов. Учитывая специфику каждого материала, а также разнообразие факторов воздействия, оптимальным является сочетание теоретических моделей и эмпирических данных, дополненных современными методами мониторинга и неразрушающего контроля. Такой подход позволяет повысить точность оценки состояния конструкций, своевременно выявлять зоны повышенного риска и продлевать срок службы зданий и сооружений.

Воздействие жидких активных сред на строительные материалы является одним из основных факторов, провоцирующих коррозионные процессы и, как следствие, разрушение конструкций. В частности, сталь в железобетонных конструкциях подвержена коррозии, что требует создания защитных слоев бетона с минимальной толщиной не менее 10 мм. Для предотвращения коррозии в стальных конструкциях применяют защитные покрытия и вводят в состав стали специальные добавки, такие как хром, никель и медь.

Для деревянных конструкций характерны процессы разложения и гниения, которые вызываются воздействием влаги и микроорганизмов. Для защиты древесины применяют методы антисептирования, включая обработку горячими и холодными ваннами, а также покрытие специальными составами и использованием автоклавов.

В строительных материалах на основе цемента и бетона коррозионные процессы связаны с химическими реакциями, такими как разложение цементного камня, образование легкорастворимых солей и вымывание гидроксида кальция. Эти процессы вызывают появление внутренних напряжений и растрескивание бетона, что значительно снижает его эксплуатационные характеристики. Дополнительным фактором разрушения является циклическое замораживание и оттаивание воды, адсорбированной в порах материала.

Современные методы прогнозирования механического поведения материалов основываются на моделировании разрушения и деформации твёрдого тела с учётом нагрузок, времени воздействия, температуры, а также специфики структуры материала и присутствия дополнительных факторов, таких как старение и агрессивные среды. Такой комплексный подход позволяет повысить точность оценки долговечности строительных конструкций и своевременно принимать меры по их защите.

Список использованной литературы

1. Леденёв, В. В. Строительство и механика: справочник / В. В. Леденёв. – Тамбов: ТГТУ. – 2021. – 448 с.
2. Замалетдинов, И. И. Коррозия и защита металлов. Коррозия порошковых материалов: учебное пособие / И. И. Замалетдинов. – Пермь: ПНИПУ. – 2007. – 188 с.
3. Люкшин, Б. А. Композитные материалы / Б. А. Люкшин. – Москва: ТУСУР. – 2012. – 101 с.

4. Масанский, О. А. Материаловедение: учебник / О. А. Масанский, А. А. Ковалева, Т. Р. Гильманшина [и др.]. – Красноярск: СФУ.– 2020. – 300 с.
5. Ярцев В. П. Прогнозирование поведения строительных материалов при неблагоприятных условиях эксплуатации / В. П. Ярцев, О. А. Киселева. – Минск: БНТУ. – 2009. – 74 с.
6. Коррозия и защита изделий и конструкций [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. М. Кушнарченко [и др.]. – 2-е изд., стер. – Москва : Флинта, 2023. – 312 с – Загл. с тит. экрана. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54632172>
7. Узяков, Р. Н. Влияние непрогнозируемых факторов на коррозионные повреждения трубопроводов и оборудования [Электронный ресурс] / Р. Н. Узяков, Ю. А. Чирков, В. М. Кушнарченко, Е. В. Пояркова // Электронный научный журнал нефтегазовое дело : электрон. науч. журнал. – 2019. – № 6. –С. 87-100.
8. Пояркова, Е. В. Диагностика повреждений металлических материалов и конструкций [Электронный ресурс] : учебное пособие / Е. В. Пояркова, С. Н. Горелов; М-во образования и науки Рос. Федерации, ФГБОУ ВПО «Оренбург. гос. ун-т». – Оренбург : ОГУ. – 2014. – 202 с.
9. Пояркова, Е. В. Анализ информативности диагностических параметров при магнитном контроле комбинированных сварных элементов металлоконструкций из низколегированных сталей / Е. В. Пояркова, Л. С. Диньмухаметова, А. А. Грехов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 5. – С. 68-70.
10. Диньмухаметова, Л. С. Технологическая наследственность как фактор отказоустойчивости оборудования для транспорта нефти и нефтепродуктов / Л. С. Диньмухаметова, Е. В. Пояркова, А. А. Грехов // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 10-2. – С. 199-205.
11. Щипачев, А. М. Влияние усталостной повреждаемости на твердость и внутреннюю накопленную энергию металла / А. М. Щипачев, Е. В. Пояркова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2007. – Т. 9. – № 6. – С. 152-157.

INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL FACTORS ON DESTRUCTION AND PREDICTION OF BEHAVIOR OF MATERIALS

Asanova Anastasia Eldarovna, undergraduate student, 4th year

Orenburg State University

Annotation. *This article discusses the processes of destruction and prediction of the mechanical behavior of materials. The paper describes in detail the main types of destruction of materials, methods of forecasting the behavior of materials, types of impacts on structures and materials, classification and environmental impact on materials.*

Keywords: *destruction, forecasting, corrosion, material, fatigue, creep, deformation, structures, cracking.*

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛА ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЧИН ЕГО РАЗРУШЕНИЯ

Гафарова Виктория Александровна, кандидат технических наук, доцент

Лановик Алексей Валентинович, магистрант, 2 курс

Нургалиева Карина Азатовна, бакалавр, 2 курс

Шерматов Джамшед Наимджонович, кандидат технических наук, доцент

Хисамов Марс Хамитович, доцент

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Аннотация. Настоящая статья посвящена поиску причин преждевременного отказа подшипников качения в приводе ножа экструдера *Werner&Pfleider ZSK 120/1500* на производстве полиэтилена на одном из нефтехимических заводов.

Ключевые слова: подшипник качения, механические свойства, износ

Код и рубрика: 55.00.00 Машиностроение

Подшипники – это неотъемлемая часть сложных технических систем (СТС), имеющих вращающиеся элементы, которые работают исправно только при условии, что все элементы системы надежны [1].

Срок службы подшипника зависит от нескольких факторов. В первую очередь, это качество производства, условия хранения, качество сборки, установки и соответствие эксплуатационных параметров типоразмеру подшипника, выбранному конструктором. Также важно, чтобы монтаж был выполнен качественно, а смазка и уплотнение были эффективными.

На работу подшипников влияет множество факторов, поэтому сложно реализовать их потенциал с точки зрения ресурса работы.

Основные причины преждевременного выхода подшипников из строя можно разделить на три группы: проблемы, возникшие в процессе производства, проблемы при монтаже и установке в узел при сборке, а также проблемы, возникшие в процессе эксплуатации изделия [2, 3].

Чтобы подшипники работали без сбоев, важно, чтобы материал был высокого качества, если требования не соблюдаются или контроль качества на каждом этапе производства недостаточен, то могут возникнуть проблемы, которые приведут к снижению прочности и физико-механических характеристик материала [4]. Изучение причин разрушения в процессе эксплуатации позволяет корректировать условия производства и работы деталей, а также определять сроки следующего ремонта и технического обслуживания системы.

Внешний осмотр подшипника показал, что микроскопически малые вершины шероховатости на внутренней поверхности внешней обоймы, образующиеся в процессе механической обработки, срезаны, а поверхность качения выглядит зеркально гладкой. Это свидетельствует об износе вследствие недостаточного смазывания. Трещина поперек поверхности качения – результат воздействия динамических нагрузок, ударов или ошибок монтажа (рисунок 1).

На снимках видны многочисленные следы трения. На наружной обойме присутствуют беговые дорожки.

Во внутренней обойме так же отчетливо видна трещина с обеих сторон, рисунок 2. На одной стороне видны следы коррозии внутренней обоймы, что свидетельствует о попадании влаги в рабочий узел. Вероятно, по причине недостатка или отсутствия смазывающего вещества (масла) в узле, было утеряно свойство самовыталкивания посторонней жидкости, вода, необходимая для остужения гранул полиэтилена, из приемной ванны гранулятора, попала в привод ножа.

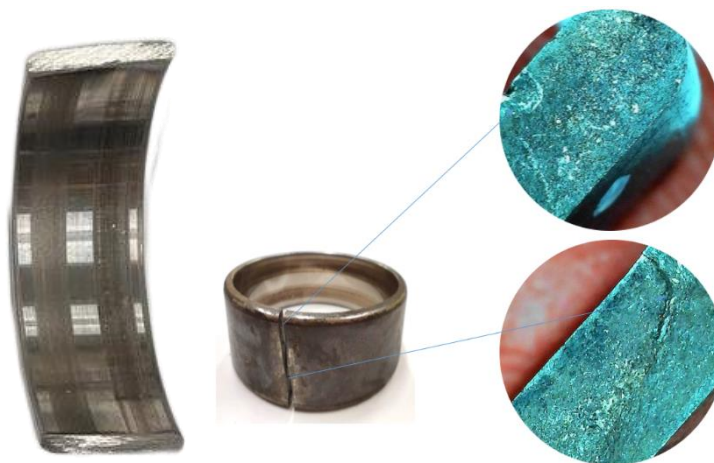


Рисунок 1 – Снимки излома наружной обоймы

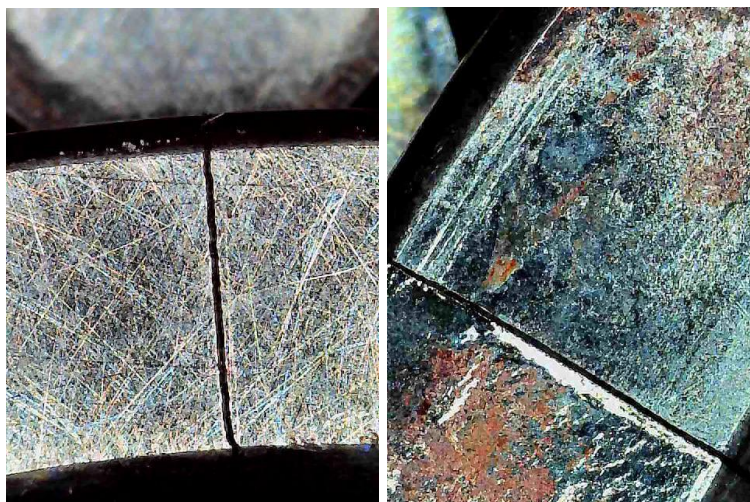


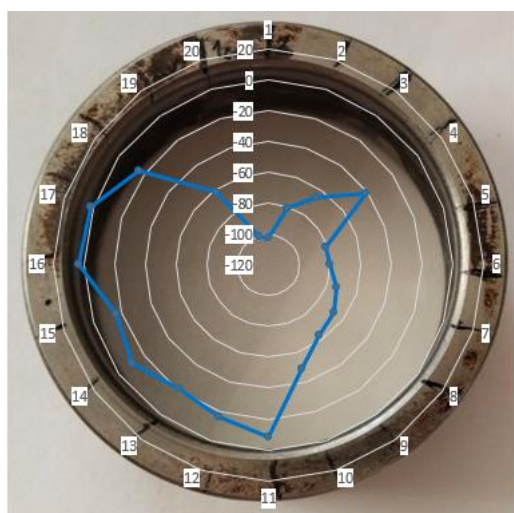
Рисунок 2 – Изображение трещины во внутренней обойме с обеих сторон со следами коррозионного износа

На поверхности роликов подшипника видны следы выкрашивания и образования борозд по окружности ролика (рисунок 3).

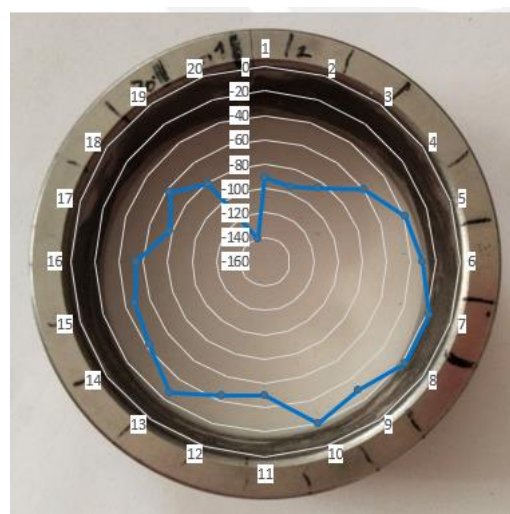


Рисунок 3 – Ролики подшипника

По результатам измерений напряжённости постоянного магнитного поля, составлены гистограммы со значениями нормальной составляющей постоянного магнитного поля корпуса, находящегося в системе подшипника. На гистограмме можно увидеть резкие изменения в значениях напряженности магнитного поля, своеобразные пики, которые напрямую указывают на наличие дефектов металла подшипника (рисунок 4).



внутренняя 1 сторона



внутренняя 2 сторона

Рисунок 4 – Значения нормальной составляющей постоянного магнитного поля корпуса в системе H_n , А/м

Металлографические исследования фрагмента подшипника выполнены на оптическом микроскопе Axio Scope.A1, Carl Zeiss Microscopy при увеличении 1000x (рисунок 5).

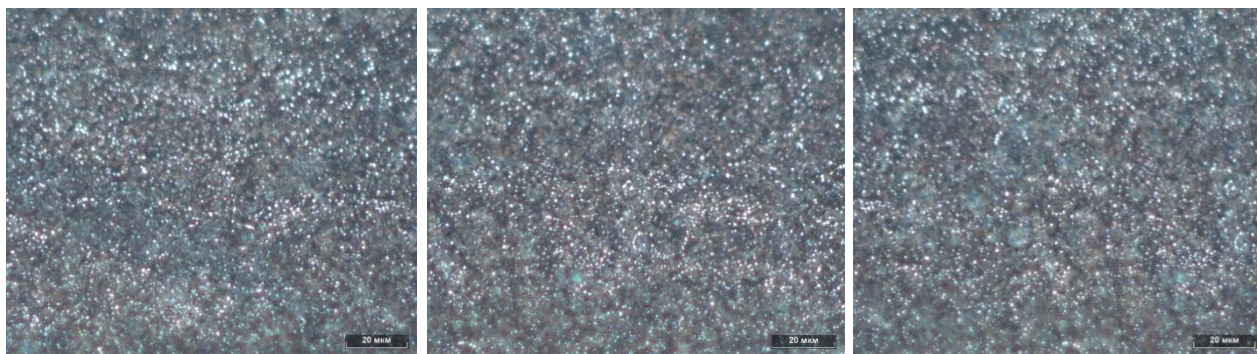


Рисунок 5 – Снимки микрошлифа

Далее полученные снимки сравнивались с эталонами шкалы карбидных сеток из ГОСТ 801-2022.

В результате сравнения карбидной сетки микрошлифа, дана оценка 1 балл. Это означает что структура металла в образце имеет минимальную карбидную неоднородность. Следовательно материал, используемый при изготовлении наружного кольца подшипника, не имел металлургических дефектов.

В результате исследования показано, что по измеренным показателям подшипник соответствует стандарту, в тоже время установлено, что имело место нарушение системы смазки, и это привело к попаданию в узел влаги, инициирующей коррозию материала, появлению сколов, следов трещин и износа в виде выкрашивания металла по окружности роликов. Необходимо повысить уровень подготовки персонала.

Список использованной литературы

1. Киселева, В. В. Виды разрушений подшипников качения / В. В. Киселева, М. С. Лившиц, Н. Д. Ханюченко // Материалы III международной научно-практической конференции: REFERATOTECH. – 2022. – С. 228-230.
2. Морозова, Л. В. Исследование причин разрушения сепараторов однорядных радиальных подшипников качения / Л. В. Морозова, В. Б. Григоренко, Д. В. Конышев, А. И. Власов // Труды ВИАМ. – 2019. – № 10 (82). – С. 84-94. – DOI 10.18577/2307-6046-2019-0-10-84-94.
3. Ахмеров, Р. Р. Влияние частоты вращения на коэффициент радиальной жёсткости шарикового подшипника при больших осевых нагрузках / Р. Р. Ахмеров // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2018. – № 6. – С. 38-39.
4. Серебренников, А. А. Специфика нагрузок подшипников качения в вибрационных смесителях / А. А. Серебренников // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 6. – С. 378-381.

INVESTIGATION OF THE ROLLING BEARING MATERIAL AND DETERMINATION OF THE CAUSES OF ITS DESTRUCTION

**Gafarova Viktoriya Aleksandrovna, candidate of technical sciences,
associate professor**

Lanovik V. Aleksej, undergraduate student, 2th year,

Nurgalieva A. Karina, undergraduate student, 2th year,

Shermatov N. Dzhamshed, candidate of technical sciences, associate professor

Hisamov H. Mars, associate professor

Ufa State Petroleum Technological University

Abstract. *This article is devoted to the search for the causes of premature failure of rolling bearings in the drive of the knife of the Werner&Pfleider ZSK 120/1500 extruder in the production of polyethylene at one of the petrochemical plants.*

Keywords: *rolling bearing, mechanical properties, wear*

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НАРАЩИВАНИИ НОГТЕЙ

**Карнаева Карина Валерьевна, Ктиторова Екатерина Васильевна,
студенты бакалавриата, 2 курс**

Оренбургский государственный университет

Аннотация: *Наращивание ногтей стало неотъемлемой частью красоты, которая требует глубокого понимания механических свойств материалов, используемых в процессе. В данной статье изучаются основные аспекты сопротивления материалов, включая механические нагрузки, свойства акриловых и гелевых систем, а также факторы, влияющие на прочность и долговечность искусственных ногтей.*

Ключевые слова: *сопротивление материалов, наращивание ногтей, механика, акрил, гель, полигель, прочность, долговечность, механические нагрузки, адгезия, модуль упругости.*

Код и рубрика: 81.95.01 *Общие вопросы технической эстетики, художественного конструирования, дизайна*

Наращивание ногтей – это не только искусство, но и наука, основанная на принципах механики и материаловедения. Понимание того, как различные материалы реагируют на нагрузки, позволяет профессионалам создавать прочные и эстетически привлекательные ногти.

Ногти в повседневной жизни подвергаются различным видам нагрузок, включая сжатие, изгиб, удары и отслаивание. Сжатие происходит, когда мы держим предметы или нажимаем на поверхности, что может привести к повреждению или поломке ногтя. При выполнении таких действий, как вскрытие упаковок или использование инструментов, возникает изгиб, который может привести к появлению трещин. Удары, например, при случайном контакте с твердыми предметами, могут привести к образованию синяков под ногтем или его повреждению. Отслаивание возникает, когда ногти подвергаются воздействию резких перепадов температур или химических веществ, особенно если они тонкие или ослабленные [1].

Искусственные ногти, такие как акриловые, гелевые и полигелевые, являются современными средствами для увеличения прочности, эстетичности и долговечности натуральных ногтей. Они специально разработаны для повышения сопротивляемости к различным механическим нагрузкам, с которыми ногти сталкиваются в повседневной жизни. В отличие от натуральных ногтей, искусственные ногти обладают значительно большей прочностью и способностью выдерживать давление, что существенно снижает риск их повреждения, трещин или поломки даже при интенсивной эксплуатации.

Одним из ключевых преимуществ искусственных ногтей является их повышенная гибкость и эластичность. Эти свойства позволяют им лучше адаптироваться к изгибам и деформациям, возникающим при выполнении

различных действий – например, при захвате предметов, нажатии или использовании инструментов. Благодаря этому, искусственные ногти сохраняют свою форму и структурную целостность даже при сильных механических воздействиях, что важно для сохранения эстетического вида и предотвращения повреждений.

Структура материалов, используемых для создания искусственных ногтей, играет определенную роль в их способности поглощать удары и уменьшать вероятность появления трещин или сколов. Например, гелевые системы благодаря своей эластичности и способности к деформации при ударе эффективно распределяют энергию воздействия, снижая вероятность повреждения. Акриловые материалы, обладая высокой твердостью и прочностью, обеспечивают надежную защиту ногтевой пластины, особенно при правильной технологии нанесения и уходе.

Кроме того, искусственные ногти отличаются более гладкой и однородной поверхностью по сравнению с натуральными, что способствует улучшенной адгезии с собственными ногтями и снижает риск их отслаивания. Гладкая поверхность также более устойчива к воздействию внешних факторов, таких как вода, химические вещества, косметика и моющие средства, что в свою очередь повышает их долговечность и эстетичный внешний вид.

Механика материалов в контексте наращивания ногтей охватывает такие важные аспекты, как прочность на сжатие, гибкость, удлинение и устойчивость к ударным нагрузкам. Прочность на сжатие является важным свойством материалов для наращивания ногтей, поскольку в повседневной жизни ногти подвергаются значительным механическим нагрузкам. При наращивании ногтей используются различные материалы, такие как акрил, гель и полигель. Каждый из них имеет свои особенности, но все они требуют понимания механики материалов **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**. Ногти, особенно длинные, подвержены различным механическим нагрузкам: сжимающим, растягивающим и изгибающим. Это создает необходимость в выборе прочных и устойчивых материалов, которые смогут выдержать эти нагрузки.

Акриловые материалы обладают высокой прочностью на сжатие, что позволяет им выдерживать большие нагрузки, такие как нажатие клавиш на клавиатуре или поднятие небольших предметов. Однако, их модуль упругости (мера жесткости) высок, поэтому они менее гибкие и могут растрескиваться при сильных ударах, например, при случайном ударе о дверной косяк. Гелевые системы используются для создания более натуральных и эластичных ногтей. Их меньшая прочность на сжатие может привести к деформации под давлением, например, при длительном удержании тяжелого предмета, но они лучше выдерживают изгибы, такие как при мытье посуды, за счет своей высокой прочности на изгиб и низкого модуля упругости. Полигель, как комбинация акрила и геля, предлагает сбалансированный подход, сочетающий прочность акрила с эластичностью геля, что делает его отличным решением для наращивания ногтей. Гибкость и эластичность материалов играют важную роль в предотвращении изломов и трещин **[3Ошибка! Источник ссылки не найден., 4]**. Устойчивость к ударным нагрузкам также является

важным аспектом, особенно учитывая, что ногти часто подвергаются случайным ударам. Использование покрытий и технологий, повышающих прочность, может значительно повысить устойчивость искусственных ногтей к повреждениям. Направление нагрузок и их распределение, обусловленные геометрической конструкцией ногтя, также важны для предотвращения разрушений.

На прочность и долговечность наращенных ногтей значительно влияют внешние факторы окружающей среды и условия эксплуатации, такие как температура, влажность и химические агенты. Эти факторы могут оказывать существенное воздействие на структуру материалов, их адгезию и общую устойчивость конструкции.

Например, температура играет важную роль в сохранении механических свойств искусственных ногтей. При повышенных температурах материалы, используемые для наращивания, могут расширяться из-за теплового расширения, что в некоторых случаях приводит к деформации ногтевой пластины или ослаблению связи между искусственным покрытием и натуральным ногтем. Особенно это актуально в условиях экстремального тепла, например, при нахождении на солнце или в помещениях с высокой температурой. С другой стороны, низкие температуры могут сделать материалы более жесткими и хрупкими, что увеличивает риск появления трещин и сколов при механических воздействиях.

Влажность также оказывает значительное влияние на качество и прочность наращенных ногтей. Повышенная влажность способствует снижению адгезивных свойств используемых клеевых и полимерных материалов, что увеличивает риск отслаивания или появления пузырьков внутри покрытия. Особенно опасна влажная среда сразу после процедуры, когда еще не полностью затвердели или не закреплены все компоненты. Длительное пребывание во влажных условиях может привести к размягчению или разрушению связующих слоев, что ухудшает общую устойчивость ногтей [5].

Химические вещества, содержащиеся в различных косметических и бытовых средствах, также могут негативно сказываться на состояниях материалов для наращивания. Например, агрессивные моющие средства, содержащие щелочи или кислоты, могут разрушать или ослаблять структуру покрытий, вызывая их быстрое старение или повреждение. Средства для снятия лака, содержащие ацетон, особенно вредны для гелевых и полигелевых систем, так как могут разрушать или размягчать материал, снижая его механическую прочность. Также косметические средства с высоким содержанием масел или спиртов могут ухудшать адгезию и способствовать отслаиванию или появлению трещин [6].

Оценка прочности материалов при наращивании ногтей с учетом механических факторов требует междисциплинарного подхода, включающего механику деформации, материаловедение, методы контроля и моделирование. Такой подход позволяет повысить точность оценки стойкости и долговечности искусственных ногтей, снизить риск повреждений и обеспечить их надежную эксплуатацию. Развитие этих направлений способствует созданию более

устойчивых и долговечных материалов, а также повышению качества услуг в сфере наращивания ногтей.

Список использованной литературы

- 1 Зеленова Г. С. Моделирование ногтей / Зеленова Г. С. – Москва: ЗАО «ОЛЕХДУС», 2010 – 136 с.
- 2 professionals.beauty [Электронный ресурс].: Сравнение различных методов наращивания ногтей: преимущества и недостатки акрила, геля и других материалов для создания искусственных ногтей. – Режим доступа: <https://professionals.beauty/blog/> (дата обращения 31.05.2025).
- 3 Гелевый маникюр: что это, плюсы и минусы. – Режим доступа: <https://nails-class.ru/manicure/> (дата обращения 31.05.2025).
- 4 Разнообразие техник наращивания ногтей: от геля до стекловолокна. – Режим доступа: <https://bpw.style/blog/> (дата обращения 31.05.2025).
- 5 Разнообразие техник наращивания ногтей: от геля до стекловолокна: – Режим доступа: <https://mksegment.ru/b/> (дата обращения 31.05.2025).
- 6 dzen [Электронный ресурс].: Как избежать отслоек при наращивании ногтей. – Режим доступа: https://dzen.ru/a/aCg-kSTxsFChZD_f (дата обращения 31.05.2025).

THE INFLUENCE OF MECHANICAL FACTORS ON THE STRENGTH OF MATERIALS DURING NAIL EXTENSION

**Karnaeva Karina Valerievna, Ktitorova Ekaterina Vasilievna,
undergraduate students, 2nd year**

Orenburg State University

Abstract: *Nail extensions have become an integral part of beauty, which requires a deep understanding of the mechanical properties of the materials used in the process. This article examines the main aspects of material resistance, including mechanical loads, properties of acrylic and gel systems, as well as factors affecting the strength and durability of artificial nails.*

Keywords: *Resistance of materials, nail extensions, mechanics, acrylic, gel, polygel, strength, durability, mechanical loads, adhesion, modulus of elasticity.*

АКТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СТАРЕЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Золотов Никита Станиславович, Королихин Никита Владиславович,
студенты бакалавриата, 2 курс

Оренбургский государственный университет

Аннотация. В данной статье рассматриваются современные подходы к оценке остаточного ресурса конструкций из алюминиевых сплавов, широко применяемых в авиации, транспортной и строительной отраслях. Приведены основные механизмы деградации материала, особенности разрушения и методы диагностики состояния конструкций на различных этапах их жизненного цикла. Основное внимание уделено сочетанию механических испытаний, методов неразрушающего контроля и численного моделирования. Полученные результаты могут быть использованы при техническом обслуживании и продлении ресурса несущих элементов ответственных объектов.

Работа выполнена на кафедре механики материалов, конструкций и машин Оренбургского государственного университета **под руководством Поярковой Екатерины Васильевны**, доктора технических наук, доцента, заведующим кафедрой механики материалов, конструкций и машин.

Ключевые слова: остаточный ресурс, алюминиевые сплавы, усталость, разрушение, диагностика, ресурс конструкции.

Код и рубрика: 81.00.00 Общие и комплексные проблемы технических и прикладных наук и отраслей народного хозяйства.

Одной из ключевых задач в эксплуатации инженерных конструкций является своевременное и достоверное определение остаточного ресурса. Особенно остро эта проблема стоит в отношении алюминиевых сплавов, которые используются в авиации, вагоностроении, судостроении и других отраслях, где важны малый удельный вес и высокие показатели прочности. Со временем эксплуатационные свойства материала снижаются из-за накопления усталостных повреждений, коррозии, температурных и механических воздействий. Это может привести к внезапным разрушениям, что особенно опасно в критически нагруженных зонах [1].

Основными причинами деградации алюминиевых конструкций являются циклические нагрузки, длительное воздействие климатических факторов, образование очагов коррозионного повреждения и старение материала вследствие процессов упрочнения. Усталостное разрушение в таких условиях развивается скрыто, с образованием микротрещин, которые могут долгое время оставаться незамеченными, но при определённой критической длине вызывать катастрофические последствия [2].

Методы неразрушающего контроля, которые применяют для оценки остаточного ресурса алюминиевых конструкций:

- визуально-измерительный контроль;
- капиллярный контроль;
- вихретоковый метод;
- радиографический контроль;
- ультразвуковой контроль.

Для систематизации и наглядного сравнения основных методов оценки остаточного ресурса алюминиевых конструкций в таблице 1 представлены их ключевые характеристики, преимущества и ограничения. Это позволяет более чётко понять возможности и ограничения каждого подхода в различных условиях эксплуатации.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика методов оценки остаточного ресурса алюминиевых конструкций

Метод оценки остаточного ресурса	Основные характеристики	Преимущества	Ограничения	Область применения
Механические испытания (разрушающие)	Определение предела выносливости, усталостных характеристик	Высокая точность результатов	Разрушающий характер, трудоёмкость	Лабораторные исследования, калибровка моделей
Неразрушающий контроль (УЗК, радиография, капиллярный контроль и др.)	Выявление поверхностных и внутренних дефектов	Возможность контроля на месте эксплуатации	Ограниченная чувствительность к микродефектам	Мониторинг состояния в эксплуатации
Численное моделирование (КЭМ, фрактомеханика)	Моделирование напряжений, трещин и усталостного разрушения	Учёт сложной геометрии и нагрузок, прогнозирование развития и повреждений	Требует точных исходных данных, высокая вычислительная нагрузка	Прогнозирование остаточного ресурса, оптимизация конструкций
Цифровые двойники и системы мониторинга	Сбор и анализ данных в реальном времени	Адаптивная оценка, своевременное принятие решений	Требует развитой инфраструктуры мониторинга	Ответственные конструкции, авиация, транспорт
Методы акустической эмиссии и термографии	Детектирование и роста трещин	Раннее выявление повреждений	Чувствительны к помехам, сложность интерпретации	Контроль состояния в эксплуатации
Правила и стандарты (FAA, EASA, ГОСТ и др.)	Регламентирование методик оценки и контроля	Обеспечение единого подхода, нормативная база	Могут требовать адаптации к конкретным условиям	Авиация, транспорт, промышленность

Визуально-измерительный контроль выявляет поверхностные дефекты. Капиллярный контроль осуществляется с помощью индикаторных жидкостей, которые флуоресцируют в ультрафиолетовом освещении, и выявляет дефекты, выходящие на поверхность. Вихретоковый метод позволяет контролировать объекты на высокой скорости без контакта с поверхностью. Радиографический контроль выявляет поверхностные, подповерхностные, внутренние и сквозные дефекты, в том числе мелкие. Ультразвуковой контроль показывает дефекты, залегающие в толщине металла, а также определяет газовую пористость. Каждый из методов позволяет обнаруживать дефекты, не разрушая материал конструкции. Эти методы высокоэффективны при мониторинге состояния алюминиевых деталей в эксплуатации, особенно если они повторяются на регулярной основе [3].

Оценка остаточного ресурса начинается с определения текущего состояния конструкции. На практике используются механические испытания, в том числе циклические, для установления усталостных характеристик, таких как предел выносливости и критическая длина трещины. Проводится также исследование трещиностойкости, включающее измерение коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} , который характеризует сопротивление распространению трещины [4, 9].

Современные подходы к оценке остаточного ресурса включают применение цифровых двойников, машинного обучения и систем мониторинга в реальном времени. Используются сенсорные сети и технологии интернета вещей (IoT) для постоянного отслеживания нагрузки и выявления микрповреждений. Алгоритмы на основе больших данных анализируют накопленную информацию для прогнозирования сроков службы. Также применяются методы акустической эмиссии и термографии, позволяющие выявлять ранние стадии разрушения. Эти технологии повышают точность диагностики и позволяют оптимизировать графики технического обслуживания, снижая риски внезапных отказов.

Фрактографический анализ разрушенных образцов или участков с трещинами позволяет установить механизм разрушения и выявить зоны концентрации напряжений. Это важно для построения моделей распространения трещин и прогнозирования их дальнейшего роста. Анализ поверхности разрушения под микроскопом показывает характер развития усталости, наличие коррозионных повреждений и иных дефектов [5].

Основные механизмы деградации алюминиевых сплавов включают усталостное разрушение, коррозионное растрескивание, ползучесть, старение и эрозионный износ. Усталость развивается под действием переменных нагрузок и приводит к накоплению микрповреждений, формированию и росту трещин. Коррозионное растрескивание возникает при одновременном воздействии коррозионной среды и растягивающих напряжений, особенно в зонах сварных швов и концентрации напряжений. Ползучесть проявляется при длительном воздействии высоких температур и напряжений, приводя к пластической деформации и разрушению структуры сплава. Старение алюминиевых сплавов связано с перераспределением упрочняющих фаз, что снижает прочностные характеристики и способствует хрупкому разрушению. Эрозионный износ

возникает при механическом воздействии частиц жидкости или газа на поверхность материала, вызывая локальное разрушение. Также важно учитывать межкристаллитную коррозию, которая развивается вдоль границ зёрен и ослабляет структуру материала изнутри. Все эти механизмы могут действовать совместно, ускоряя деградацию конструкции. Их учёт необходим для точного прогнозирования остаточного ресурса и своевременного принятия решений о ремонте или замене элементов.

Методы численного моделирования, в частности конечный элементный метод (КЭМ), позволяют с высокой точностью воспроизводить сложное поведение стареющих алюминиевых конструкций в условиях реальной эксплуатации. Такой подход учитывает локальные концентрации напряжений, изменяющиеся свойства материала вследствие старения, а также сложную геометрию конструкций, что обеспечивает адаптивную и более точную оценку остаточного ресурса. Совмещение КЭМ с фрактомеханическими и усталостными моделями способствует прогнозированию возникновения и развития повреждений, оптимизации конструкций и снижению риска внезапных отказов, что особенно важно при продлении срока службы ответственных элементов техники [11].

Вместе с тем, современный этап развития науки позволяет активно использовать численные методы оценки остаточного ресурса. Распространено применение моделей линейного накопления повреждений (например, правило Минера), которые учитывают амплитуду и количество циклов нагружения. Более точные прогнозы обеспечивают конечно-элементные модели, способные учитывать сложную геометрию конструкции, неоднородное распределение напряжений и сложные условия нагружения. Программные пакеты ANSYS, Abaqus, NASTRAN позволяют выполнять моделирование трещинообразования и усталостного разрушения, проводить параметрические исследования и оптимизацию конструкции [6, 12].

Применение современных подходов к оценке остаточного ресурса стареющих алюминиевых конструкций базируется на комплексном учёте процессов деградации материала и накопления повреждений в течение длительного времени эксплуатации. Особое внимание уделяется анализу усталостных процессов, коррозионного воздействия и микроструктурных изменений, которые существенно влияют на механические свойства и долговечность сплавов. Современные методы позволяют не только выявлять текущие повреждения, но и прогнозировать их развитие с учётом реальных эксплуатационных нагрузок и условий окружающей среды.

Важным направлением является использование цифровых двойников и интегрированных систем мониторинга состояния конструкций, которые собирают и анализируют данные в режиме реального времени. Это обеспечивает динамическую адаптацию моделей прогноза остаточного ресурса и позволяет своевременно принимать управленческие решения по ремонту, замене или усилению элементов.

Особое внимание в области оценки остаточного ресурса уделяется алюминиевым конструкциям авиационной техники, таким как фюзеляжные

панели, несущие балки крыльев, шпангоуты и подкосы. Эти элементы подвергаются многократным циклическим нагрузкам, вибрациям и воздействию агрессивных факторов окружающей среды, что приводит к постепенному накоплению усталостных повреждений и коррозионных дефектов. Надёжность и безопасность эксплуатации авиалайнеров напрямую зависит от своевременной и точной оценки состояния этих конструктивных элементов, что требует применения современных методов диагностики и численного моделирования.

Таким образом, современные подходы сочетают эмпирические данные, экспериментальные методы и численное моделирование, обеспечивая высокую точность и надёжность оценки состояния стареющих алюминиевых конструкций.

На международном уровне существуют нормативные документы, регламентирующие методики оценки остаточного ресурса авиационных алюминиевых конструкций. В частности, руководство FAA (Federal Aviation Administration) AC 91-56B «Damage Tolerance and Fatigue Evaluation of Structure» и стандарты SAE ARP 5A «Damage Tolerance Analysis Procedure» широко применяются для разработки программ технического обслуживания и прогнозирования срока службы авиационных конструкций. В Европе аналогичные требования содержатся в регламентах EASA CS-25 (Certification Specifications for Large Aeroplanes), которые строго контролируют процессы оценки усталостной прочности и остаточного ресурса. В России вопросы оценки и продления ресурса авиационных конструкций регулируются федеральными авиационными правилами и нормативами, такими как ФАП-255 и ГОСТ Р 53393, которые включают методы неразрушающего контроля и требования к техническому обслуживанию воздушных судов. В Китае аналогичные стандарты разрабатываются и внедряются в рамках национальных авиационных регламентов CAAC (Civil Aviation Administration of China), направленных на обеспечение безопасности эксплуатации и продление срока службы авиационной техники. Все эти документы задают основу для интеграции экспериментальных данных, методов неразрушающего контроля и численного моделирования, обеспечивая комплексный подход к обеспечению безопасности и продлению срока службы авиаконструкций.

Подробную информацию о нормативных документах можно найти на официальных сайтах соответствующих организаций:

- Федерального авиационного агентства США (FAA) – www.faa.gov (<https://www.faa.gov/>);
- Европейского агентства по авиационной безопасности (EASA) – www.easa.europa.eu (<https://www.easa.europa.eu/>);
- Федерального агентства воздушного транспорта России (Росавиация) – favt.ru (<https://favt.ru/>);
- Гражданской авиационной администрации Китая (CAAC) – www.caac.gov.cn (<http://www.caac.gov.cn/>).

Комплексный междисциплинарный подход, включающий экспериментальные методы контроля состояния материала и цифровое

моделирование, повышает достоверность оценки остаточного ресурса стареющих конструкций из алюминиевых сплавов. Он минимизирует ошибки при технической диагностике и способствует своевременному принятию решений по ремонту, замене или модернизации элементов. Практическое применение таких методов особенно эффективно при эксплуатации авиационных агрегатов, каркасов подвижного состава и опорных конструкций различных объектов, где безопасность и надежность эксплуатации имеют критическое значение.

Большое значение имеет комплексный подход, сочетающий экспериментальные методы и численное моделирование. Такой подход обеспечивает более высокую достоверность оценки остаточного ресурса, минимизирует вероятность ошибок при технической диагностике и способствует снижению риска эксплуатации изношенных конструкций [7, 10].

Использование интегральных моделей позволяет оптимизировать графики технического обслуживания и своевременно заменять или усиливать повреждённые участки, тем самым значительно повышая безопасность эксплуатации [1, 5].

Таким образом, задача оценки остаточного ресурса конструкций из алюминиевых сплавов требует междисциплинарного подхода, включающего механику разрушения, материаловедение, методы контроля и цифровое моделирование. Развитие этих направлений повышает точность прогнозов, снижает эксплуатационные риски и способствует повышению надежности конструкций в различных отраслях техники [2, 6].

Список использованной литературы

1. Шелухин О. В. Диагностика и прогнозирование ресурса металлических конструкций. – М.: Машиностроение, 2018. – 320 с.
2. Кузнецов А. И. Прочность алюминиевых сплавов при усталостных нагрузках // Вестник машиностроения. – 2021. – № 5. – С. 22–27.
3. Glinka G., Shen G. Universal features of fatigue crack growth // International Journal of Fatigue. – 1991. – Vol. 13(5). – P. 377–386.
4. ASTM E647-15e1. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. – ASTM International, 2015.
5. Бутенко В. И., Ковалев А. Н. Методы расчета остаточного ресурса конструкций. – СПб.: Политехника. – 2020. – 280 с.
6. Хлебников В. М., Протопопов А. С. Оценка остаточного ресурса металлоконструкций методом механики разрушения // Инженерный журнал. – 2020. – № 4. – С. 45–52.
7. Macha E., Niesłony A. Experimental methods in fatigue of materials and structures. – Springer, 2010. – 488 p.
8. Коновалов Н. Н. Оценка показателей достоверности ультразвукового контроля сварных соединений / Н.Н. Коновалов // Дефектоскопия. – 2003. – № 9. – С. 4–8.

9. Бирдегулов, Л.Р. Исследование трещиностойкости металлов / Л. Р. Бирдегулов, А. М. Щипачев. // *Juvenis scientia*. – 2016. – № 2. – 28-32 с.
10. Анцев Г. В. Анализ методов построения карт динамических режимов нелинейных систем в присутствии детерминированного хаоса / Г. В. Анцев, Ф. В. Звягин, Л. Н. Лысенко, В. А. Петров // *Известия РАН*. – 2016. – № 2 (92). – С.26-36.
11. Шаблий, Л. С. Компьютерное моделирование типовых гидравлических и газодинамических процессов двигателей и энергетических установок в ANSYS Fluent: учеб. пособие / Л. С. Шаблий, А. В. Кривцов, Д. А. Колмакова. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2017. – 108 с.: ил.
12. Сергеев, А. И. К вопросу автоматизации проектирования технологических процессов / А. И. Сергеев, А. В. Непейн // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры [Электронный ресурс]: сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции; Оренбург. гос. ун-т. – Электрон. дан. – Оренбург: ОГУ, 2022. – С.1672-1675.

METHODS FOR ASSESSING THE RESIDUAL LIFE OF AGING STRUCTURES MADE OF ALUMINUM ALLOYS

**Zolotov Nikita Stanislavovich, Korolikhin Nikita Vladislavovich,
Bachelor's degree, 2nd year**

Orenburg State University

Abstract. *This paper examines modern approaches to assessing the residual life of structures made of aluminum alloys, which are widely used in aviation, transport, and construction industries. The article outlines the main mechanisms of material degradation, features of failure, and methods for diagnosing the condition of structures at various stages of their life cycle. Special attention is given to the combination of mechanical testing, non-destructive evaluation methods, and numerical modeling. The obtained results can be applied in the maintenance and service life extension of load-bearing elements of critical structures.*

The work was carried out at the Department of Mechanics of Materials, Structures, and Machines of Orenburg State University under the guidance of Poyarkova Ekaterina Vasilyevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanics of Materials, Structures, and Machines.

Keywords: *residual life, aluminum alloys, fatigue, fracture, diagnostics, structural durability.*

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЗРЫВНЫХ НАГРУЗОК

Труфанова Полина Сергеевна, Рябова Анастасия Александровна,
студенты бакалавриата, 3 курс

Пояркова Екатерина Васильевна, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой механики материалов, конструкций и машин

Оренбургский государственный университет

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы взрывной прочности конструкций, факторы, влияющие на сопротивляемость материалов и конструктивных элементов взрывным нагрузкам, а также методы оценки взрывной прочности. Особое внимание уделено классификации взрывов и применению современных программных комплексов для моделирования взрывных процессов и поведения конструкций под воздействием взрывных волн. Авторами предложен алгоритм комплексной оценки взрывной прочности, включающий определение условий взрыва, моделирование взрывной волны, расчет прочностных характеристик материалов, численное моделирование динамической реакции конструкций и оценку их устойчивости. Также приведены формулы для расчета факторов опасности промышленных объектов, подвергающихся воздействию взрывных волн, и давления, создаваемого взрывом газовоздушных смесей. Результаты исследования способствуют повышению эффективности проектирования и обеспечению безопасности инженерных сооружений в условиях экстремальных взрывных воздействий.

Ключевые слова: экстремальные нагрузки, конструкция, взрыв, взрывная прочность, прочность, моделирование, оценка и анализ.

Код и рубрика: 30.19.29 Разрушение

Как известно, экстремальные нагрузки на конструкции представляют собой воздействия, превышающие расчетные значения, способные привести к повреждению или разрушению объектов. К числу таких нагрузок относятся стихийные бедствия (землетрясения, наводнения, ураганы), техногенные аварии, перегрузки, усталостные воздействия и изменения условий эксплуатации. Одним из наиболее опасных видов экстремальных воздействий является взрыв, который характеризуется резким выделением энергии и образованием ударной волны, способной вызвать значительные разрушения [2].

Взрывная прочность материалов и конструкций – это их способность сохранять целостность и функциональность под воздействием взрывной нагрузки. Она зависит от множества факторов, включая физико-механические свойства материалов, геометрию и конструктивные особенности объектов, а также условия эксплуатации. Взрыв представляет собой процесс мгновенного выделения энергии, сопровождающийся изменением состояния вещества,

образованием ударных волн и сжатых газов, которые воздействуют на конструкцию механически и термически.

Классификация взрывов включает химические, ядерные, аварийные, взрывы пылегазовых смесей и взрывы под высоким давлением, каждый из которых характеризуется специфическими особенностями воздействия на конструкции. Особое внимание уделяется динамическим характеристикам нагрузки, так как именно они определяют степень разрушений и методы защиты.

Для обеспечения промышленной безопасности и повышения надежности конструкций необходимо учитывать комплекс факторов, влияющих на взрывную прочность: механические свойства материалов, особенности конструкции, условия эксплуатации и внешние воздействия. Современные методы оценки взрывной прочности включают как экспериментальные испытания, так и численное моделирование, что позволяет оптимизировать проектирование и прогнозировать поведение конструкций под взрывными нагрузками.

В данной работе рассматриваются основные подходы к оценке взрывной прочности, анализируются программные комплексы для моделирования взрывных процессов, а также предлагается системный алгоритм оценки прочности материалов и конструкций, включающий все этапы от определения условий взрыва до оценки устойчивости конструкции. Такой комплексный подход способствует минимизации рисков и повышению безопасности объектов, эксплуатируемых в условиях повышенной взрывной опасности.

На взрывную прочность конструкций влияют множество факторов, среди которых ключевыми являются:

- материалы, применяемые для изготовления конструктивных элементов, отличающиеся разнообразием механических свойств, влияющих на сопротивляемость взрывным нагрузкам;

- конструктивные особенности объекта, включая геометрию и архитектурные решения, которые определяют распределение нагрузок и жёсткость конструкции, что существенно влияет на её способность противостоять взрывным воздействиям;

- условия эксплуатации, такие как режим работы, температурный режим, влажность и другие внешние факторы, способные изменять физико-механические свойства материалов и, соответственно, их взрывную прочность, что необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации.

Современные методы оценки взрывной прочности материалов и конструкций включают экспериментальные исследования и численное моделирование, что позволяет получить достоверные данные о поведении материалов при взрывных воздействиях. Экспериментальные методы основываются на проведении испытаний образцов в условиях, максимально приближенных к реальным, что обеспечивает получение информации о изменениях физических и механических свойств материалов под воздействием взрывной волны.

Для анализа поведения конструкций в условиях взрывных нагрузок широко применяются программные комплексы, которые позволяют

моделировать сложные динамические процессы, оптимизировать конструктивные решения и прогнозировать возможные разрушения. Выбор конкретного программного обеспечения определяется целями исследования, необходимым уровнем точности и масштабом моделирования. Наиболее часто используемыми средствами являются:

1. ANSYS – универсальный комплекс для инженерного анализа с широкими возможностями моделирования динамических процессов, включая ударные и взрывные нагрузки.

2. LS-DYNA – специализированный программный продукт для нелинейного динамического анализа методом конечных элементов, широко используемый в моделировании взрывов и ударов.

3. Различные версии программ (коммерческие, академические, студенческие) предоставляют разный уровень доступа к функциям, что важно учитывать при планировании исследований.

Подробный анализ программных комплексов по ключевым критериям представлен в таблице 1.

В качестве обоснования выбора программного конкретного продукта стоит привести следующую информацию:

– ANSYS – это мощный и универсальный программный комплекс, который позволяет решать широкий спектр задач, включая расчеты прочности, тепловых процессов, электромагнетизма и динамики. Для студентов и преподавателей доступны версии с ограничениями по размеру и функционалу, что облегчает обучение и проведение исследований на базовом уровне. Академическая версия идеальна для углубленных исследований, но не подходит для коммерческого использования. Коммерческая версия обеспечивает полный доступ к функционалу для промышленных задач.

– LS-DYNA – специализированный инструмент для нелинейного динамического анализа взрывных и ударных процессов, который широко применяется в промышленности (производство боеприпасов, авиастроение, нефтегазовая отрасль, химическая промышленность) и научных исследованиях. Бесплатная студенческая версия позволяет получить базовые навыки работы с ПО, а коммерческая версия – решать сложные задачи с высокой точностью.

Использование указанных программных комплексов обосновано необходимостью моделирования сложных динамических процессов, связанных с воздействием взрывных волн на материалы и конструкции. Применение аналитических методов и компьютерного моделирования позволяет снизить затраты на дорогостоящие физические испытания, оптимизировать проектирование и повысить безопасность конструкций.

Выбор конкретной версии программного обеспечения должен базироваться на целях исследования, доступности лицензий и требуемом уровне детализации моделирования. Для учебных и исследовательских целей оптимальны академические и студенческие версии ANSYS и LS-DYNA, в то время как для промышленных приложений необходимы коммерческие лицензии с полным функционалом.

Таблица 1 – Аналитическое обоснование использования программных комплексов для моделирования сложных физических процессов

Критерий	ANSYS Discovery	ANSYS Student	ANSYS Academic	ANSYS Commercial	LC-DYNA Student Edition	LC-DYNA Commercial
Тип лицензии	Бесплатная пробная версия	Бесплатная для студентов	Академическая (университеты)	Коммерческая (платная)	Бесплатная для обучения	Коммерческая (платная)
Доступность	Ограниченный функционал	Ограничение на размер задач (FEA до 512 узлов, CFD до 256k)	Полный функционал, только для учебы и исследований	Полный функционал, для коммерческих объектов	Ограниченная функциональность	Полный функционал
Основные возможности	Быстрый расчет, базовые модели	Полноценный расчет прочности и тепловых характеристик	Расширенные возможности моделирования	Полный спектр инженерных расчетов	Нелинейный динамический анализ, ударные и взрывные нагрузки	Продвинутое моделирование сложных динамических процессов
Область применения	Студенты, преподаватели для обучения	Студенты, преподаватели	Университеты, исследователи	Промышленные компании, научные исследования	Инженеры, исследователи, учебные заведения	Промышленные компании, научные центры
Особенности	Доступность, простота использования	Ограничение по размеру моделей	Не подходит для коммерческих задач	Поддержка сложных задач, интеграция с другими модулями	Хорошо подходит для моделирования взрывных процессов	Высокая точность, поддержка сложных сценариев
Стоимость	Бесплатно (ограниченно)	Бесплатно	Сниженная (академическая лицензия)	Высокая, зависит от лицензии	Бесплатно (обучающая версия)	Высокая коммерческая

Все вышеописанные программы позволяют моделировать возможные разрушения и оптимизировать проектирование. При использовании аналитических методов оценки взрывной прочности материалов и конструкций разрабатывают математические модели, описывающих поведение материалов при взрыве, что позволяет проводить предварительные оценки без необходимости в дорогостоящих испытаниях [7].

Для комплексного анализа поведения материалов и конструкций под воздействием взрывных нагрузок необходимо не только выбрать подходящее программное обеспечение, но и применить методологию, обеспечивающую точную и достоверную оценку взрывной прочности. Моделирование взрывных процессов требует интеграции численных методов и экспериментальных данных для адекватного воспроизведения динамического взаимодействия взрывной волны с конструкционными элементами. В этом контексте алгоритм оценки взрывной прочности играет ключевую роль, поскольку он систематизирует последовательность действий — от определения параметров взрывного воздействия до анализа отклика материалов и конструкций, что позволяет эффективно прогнозировать возможные разрушения и оптимизировать защитные мероприятия.

Переход от выбора программного комплекса к практическому алгоритму оценки взрывной прочности обусловлен необходимостью учитывать специфические физические и механические характеристики материалов, параметры взрывного заряда и условия эксплуатации конструкций. Алгоритм включает этапы моделирования ударной волны, определения динамических нагрузок, оценки предельных состояний материалов, а также численного анализа устойчивости конструкций. Такой системный подход обеспечивает надежность расчетов и способствует разработке эффективных инженерных решений для повышения взрывной стойкости объектов различного назначения. Алгоритм оценки взрывной прочности представлен на рисунке 1.

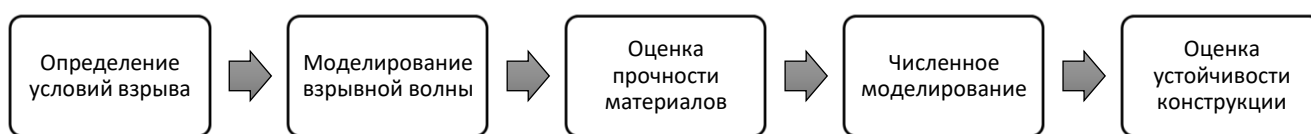


Рисунок 1 – Алгоритм оценки взрывной прочности

1. Определение условий взрыва.

На этом этапе проводится сбор и анализ исходных данных о взрывном воздействии: тип взрывного вещества, масса заряда, расстояние до объекта, характеристики взрывной волны (давление, длительность, скорость распространения). Эти параметры являются фундаментальными для дальнейшего моделирования и влияют на точность оценки прочности.

2. Моделирование взрывной волны.

Используются математические модели и численные методы для воспроизведения распространения ударной и детонационной волн в среде,

окружающей конструкции. Это позволяет определить динамические параметры нагрузки, с которыми будет взаимодействовать материал или конструкция. На данном этапе учитывается влияние гидродинамических процессов, взаимодействие газовых потоков и ударных нагрузок

Взрывная волна описывается с использованием различных математических моделей, среди которых наиболее распространённой является модель, основанная на уравнениях гидродинамики. При этом особое внимание уделяется учёту длительности воздействия – времени, в течение которого давление взрывной волны воздействует на конструкцию. Максимальное значение давления определяется величиной, создаваемой взрывом газозоодушных смесей, и рассчитывается по формуле [1, 6]:

$$P_{max.взр} = \frac{P_0 \cdot T_{взр} \cdot \sum n_{п.г.}}{T_0 \cdot \sum n_{исх.смеси}},$$

где P_0 – начальное давление, при котором находится смесь, МПа;

T_0 – начальная температура исходной смеси, К;

$T_{взр}$ – адиабатическая температура горения стехиометрической смеси горючего с воздухом при постоянном объеме, К;

$n_{п.г.}$ – число молей газообразных продуктов горения;

$n_{исх.смеси}$ – число молей исходной газовой смеси.

3. Оценка прочности материалов.

На основе данных о воздействии взрывной волны проводится анализ поведения материалов с использованием критериев прочности, таких как предел текучести, предел прочности, модуль упругости и другие механические характеристики. Здесь возможно применение как экспериментальных данных, так и результатов численного моделирования, что обеспечивает более точную оценку предельных состояний.

Для оценки прочности материалов под воздействием взрывной волны в качестве ключевого параметра используется предельное напряжение. Расчет предельного напряжения выполняется с применением стандартных методов механики материалов, что обеспечивает объективную количественную характеристику сопротивления материала разрушению.

Кроме того, важным параметром является предел текучести — максимальное напряжение, при котором материал способен сопротивляться мгновенным ударным нагрузкам без возникновения необратимых деформаций. Предел текучести широко применяется при расчетах динамической устойчивости конструкций и определяется как в статических испытаниях на растяжение (например, по ГОСТ 1497), так и в динамических испытаниях, включая метод Хопкинсона.

Предел прочности материала также рассчитывается с учетом энергии, необходимой для распространения разрушения, что позволяет оценить его способность поглощать ударную нагрузку до возникновения трещин и разрывов.

Ударная вязкость характеризует устойчивость материала к хрупкому разрушению под воздействием взрывных нагрузок и является особенно значимой для сталей и композиционных материалов, эксплуатируемых при низких температурах. Значение ударной вязкости определяется, например, испытаниями на маятниковом копре согласно ГОСТ 9454.

К числу важных упругих характеристик материала относятся модуль Юнга, который отражает жесткость материала при деформациях, и коэффициент Пуассона, влияющий на распределение напряжений при воздействии ударной волны. Упругие свойства обычно определяются посредством испытаний на растяжение-сжатие, а также с использованием тензометрии и ультразвуковых методов для измерения скорости распространения звука в материале.

Дополнительно в комплекс оценки включаются параметры динамической прочности, предел усталости, пластичность и скорость распространения ударной волны, что позволяет сформировать всестороннее представление о поведении материалов в экстремальных взрывных условиях.

4. Численное моделирование.

С использованием выбранного программного комплекса (ANSYS, LS-DYNA и др.) проводится детальный расчет динамической реакции конструкции на взрывные нагрузки. Моделируются деформации, напряжения и возможные зоны разрушения с учетом нелинейных и временных эффектов. Это позволяет выявить критические участки и оценить запас прочности объекта.

Для повышения точности анализа поведения конструкций под воздействием взрывной волны широко применяются численные методы, в частности метод конечных элементов. Эти методы позволяют моделировать сложные нелинейные и динамические процессы, включая распространение ударных волн, деформации и разрушения материалов. Использование численного моделирования обеспечивает возможность детального исследования локальных эффектов, оптимизации конструкции и прогнозирования ее устойчивости в реальных условиях эксплуатации.

5. Оценка устойчивости конструкции.

Завершающий этап включает анализ общей устойчивости конструкции, выявление возможных механизмов разрушения (хрупкое разрушение, пластическая деформация, усталость и др.) и формулирование рекомендаций по повышению взрывной стойкости. Также проводится сравнение расчетных данных с нормативными требованиями и результатами экспериментальных испытаний.

Вместе с тем, можно оценить фактор опасности промышленных конструкций, при которых их можно восстановить без сноса, с помощью формулы:

$$V_1 = \left(\frac{17500}{\Delta p_{\text{отр}}} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{i_+} \right)^{9,3},$$

где $V_{1,2}$ – фактор опасности;

$\Delta p_{\text{отр}}$ – отраженное давление, Па;

i_+ – импульс фазы сжатия, Па·с.

Фактор опасности конструкций, при которых они подлежат сносу:

$$V_2 = \left(\frac{40000}{\Delta p_{\text{отр}}} \right)^{7,4} + \left(\frac{460}{i_+} \right)^{11,3}.$$

Таким образом, представленный алгоритм оценки взрывной прочности материалов и конструкций обеспечивает комплексный и системный подход к исследованию динамического поведения объектов при воздействии взрывных нагрузок. Интеграция теоретических моделей, численных методов и экспериментальных данных позволяет повысить точность прогнозов, минимизировать риски конструктивных ошибок и разработать эффективные инженерные решения для повышения безопасности и надежности объектов различного назначения в условиях экстремальных воздействий.

Список использованной литературы

1. Бирбраер, А. Н. Экстремальные воздействия на сооружения. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 594 с.
2. Ansys Developer Portal: официальный сайт. – URL: <https://developer.ansys.com/> (дата обращения: 02.06.2025).
3. Oasys: официальный сайт. – URL: <https://www.oasys-software.com/dyna/software/ls-dyna/> (дата обращения: 02.06.2025).
4. Сазыкин, В. Г. Воздействие взрыва на строительные конструкции при численном моделировании / В. Г. Сазыкин, С. Ю. Беляева, А. В. Прибытков // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2024. – № 3-2(90). – С. 202-205. – EDN: EWPEVU.
5. Взрывные технологии: учебник для вузов / В. В. Селиванов, И. Ф. Кобылкин, С. А. Новиков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014 – 519 с.
6. Корольченко, А. Д. Экспериментальное определение устойчивости сборных металлических конструкций к взрывным нагрузкам / А. Д. Корольченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2023. – №3. – С. 9-16. – URL: <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.03.9-16> (дата обращения: 15.05.2025).

ANALYSIS OF BEHAVIOR OF MATERIALS AND STRUCTURES UNDER THE INFLUENCE OF EXPLOSIVE LOADS

Trufanova Polina Sergeevna, Ryabova Anastasia Aleksandrovna, undergraduate students, 3rd year, Poyarkova Ekaterina Vasilievna, Doctor of

**Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanics
of Materials, Structures and Machines**

Orenburg State University

Abstract. *The article considers the issues of explosive strength of structures, factors affecting the resistance of materials and structural elements to explosive loads, as well as methods for assessing explosive strength. Particular attention is paid to the classification of explosions and the use of modern software packages for modeling explosive processes and the behavior of structures under the influence of blast waves. The authors propose an algorithm for a comprehensive assessment of explosive strength, including determining explosion conditions, modeling a blast wave, calculating the strength characteristics of materials, numerically modeling the dynamic response of structures and assessing their stability. Formulas are also provided for calculating the hazard factors of industrial facilities exposed to blast waves and the pressure created by the explosion of gas-air mixtures. The results of the study contribute to improving the efficiency of design and ensuring the safety of engineering structures under extreme explosive effects.*

Keywords: *extreme loads, structure, explosion, explosive strength, durability, modeling, evaluation and analysis.*

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ТЕРМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ МАГНЕЗИТОВОГО СЫРЬЯ

Махновская Ангелина Сергеевна, аспирант

Оренбургский государственный университет

Аннотация: В настоящем исследовании проведено комплексное изучение магнезитового сырья методами термогравиметрического анализа (ТГА), дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и порошковой рентгеновской дифрактометрии (XRD). Целью работы являлась идентификация фазового состава сырья, определение термических характеристик процессов разложения и оценка влияния присутствия примесей на термическое поведение магнезита.

Работа выполнена на кафедре механики материалов, конструкций и машин **под руководством Поярковой Екатерины Васильевны**, заведующего кафедрой, доктора технических наук, доцента.

Ключевые слова: магнезит, оксид магния, доломит, карбонат кальция, минералогический анализ, фазовый состав, термическое разложение

Код и рубрика: 81.09.03 Свойства и структура материалов

Оксид магния (MgO) является важным промышленным материалом, широко используемым в огнеупорной промышленности, строительстве, сельском хозяйстве и медицине [1, 8, 10, 11]. В связи с растущим спросом на высококачественный MgO и ограниченностью его доступности, разработка эффективных технологий получения оксида магния из природного сырья является актуальной задачей. Одним из перспективных источников MgO является магнезит ($MgCO_3$), однако его использование требует предварительной подготовки сырья и оптимизации процесса кальцинации [2, 9, 11]. Эффективная технология получения MgO из магнезита должна учитывать особенности его минералогического состава, термическое поведение и влияние примесей, что требует проведения детальных исследований сырьевой базы.

Данное исследование направлено на оценку потенциала извлечения MgO из образцов магнезитового сырья и разработку технологических решений для его получения. Для достижения этой цели, образцы магнезитового сырья были исследованы с использованием комплекса современных аналитических методов, включая термогравиметрический анализ (ТГА), дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК) и порошковую рентгеновскую дифрактометрию (XRD). Высокая точность и разрешающая способность полученных данных обеспечена использованием современного аналитического оборудования, в частности сверхбыстрого калориметра Flash DSC 1 (Mettler Toledo) и порошкового рентгеновского дифрактометра D/teX Ultra. Результаты исследований, описанные ниже, дают представление о фазовом составе, термических характеристиках и потенциальной пригодности исследуемого сырья для получения оксида магния.

Термограмма магнезитового сырья (рисунок 1) демонстрирует сложный характер термического разложения.

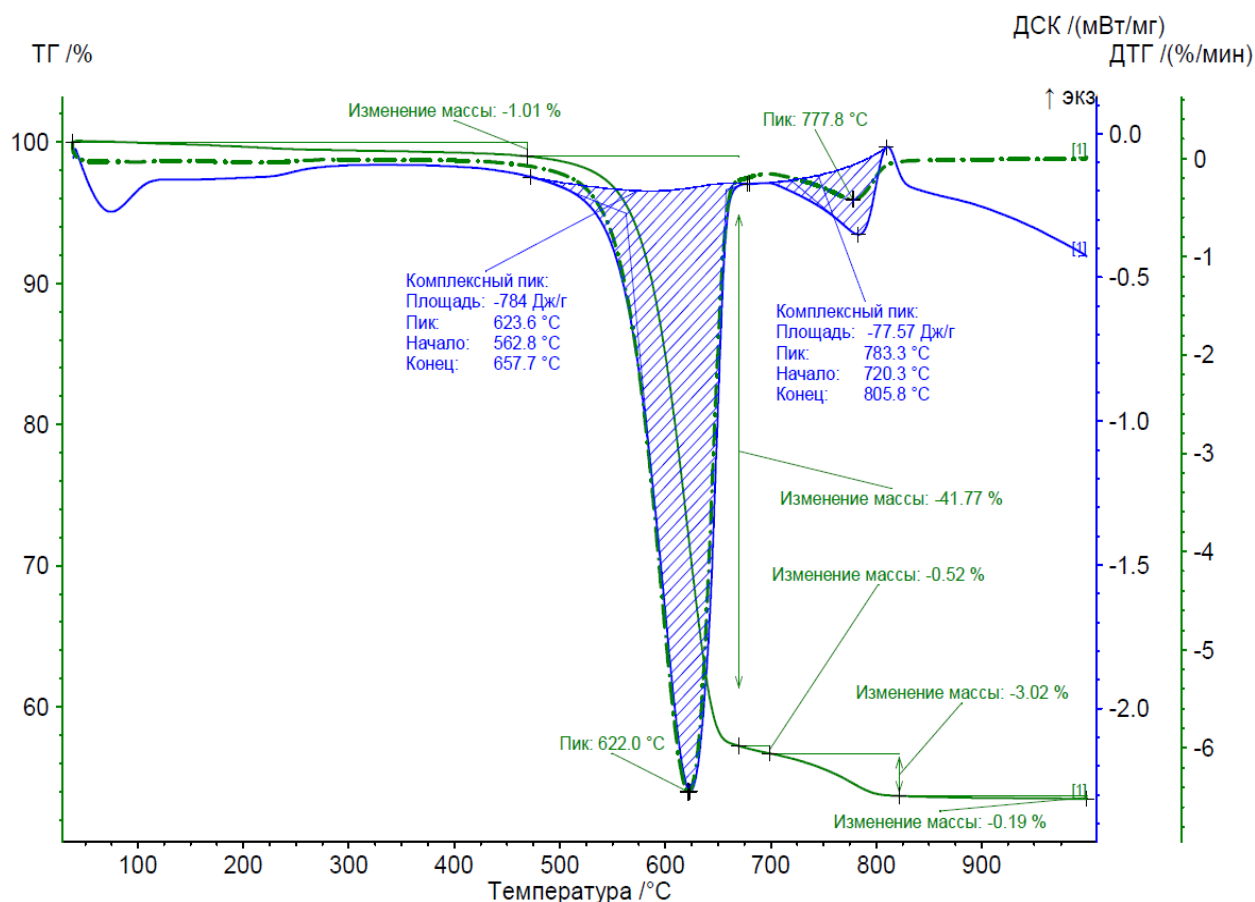


Рисунок 1 – Термограмма магнезитового сырья

Основная потеря массы в диапазоне температур от 500 °C до 700 °C (41,77 %) связана с декарбонизацией магнезита ($\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$), что подтверждается наличием эндотермического пика на кривой ДСК при 623,6 °C (- 784 Дж/г). Полученная температура декарбонизации несколько ниже значений, приводимых в литературе для чистого магнезита (650-700°C) [2], что может быть обусловлено как влиянием примесей (карбоната кальция или доломита), так и возможным частичным изоморфным замещением ионов магния ионами кальция в кристаллической решетке магнезита. Присутствие ионов кальция, даже в небольших количествах, может влиять на стабильность структуры магнезита и облегчать его термическое разложение [3]. Известно, что присутствие ионов Ca^{2+} в кристаллической решетке магнезита приводит к снижению температуры его разложения.

Дополнительный эндотермический пик на кривой ДСК при 783,3 °C (- 77,57 Дж/г) указывает на наличие кальцита или доломита. Температура разложения кальцита хорошо согласуется с литературными данными (800-900 °C) [3, 4]. Однако, относительно небольшая площадь пика указывает на невысокое содержание данной фазы в образце. Вероятно, данный пик может быть связан с двухступенчатым распадом доломита, при этом первый этап

$(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 \rightarrow \text{MgO} + \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2)$ частично перекрывается с основным пиком разложения магнезита, в то время как второй этап ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) происходит при более высокой температуре.

Небольшая потеря массы, наблюдаемая в диапазоне низких температур (до 200 °С), вероятно, обусловлена удалением адсорбированной воды и летучих органических веществ. Потеря массы в области высоких температур (после 700°С) может быть связана с дальнейшей декарбонизацией остаточных карбонатов или с фазовыми переходами в оксиде магния (MgO), образующемся после разложения магнезита.

Результаты порошковой рентгеновской дифрактометрии (рисунок 2) подтверждают наличие магнезита в исследуемом сырье.

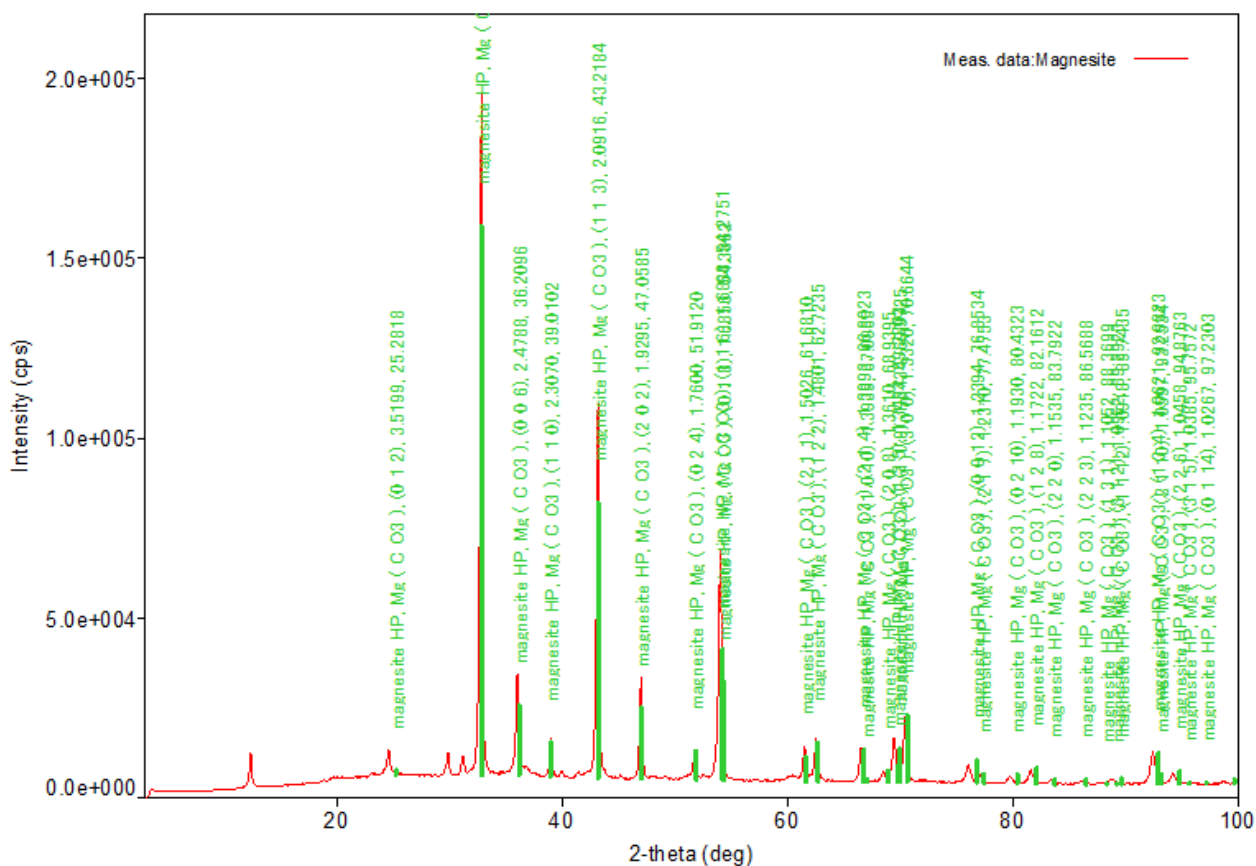


Рисунок 2 – Результаты порошкового рентгеновского дифрактометра для магнезитового минерального сырья

Положения дифракционных пиков достаточно объективно коррелируют со справочными данными для магнезита. Параметры элементарной ячейки магнезита ($a = 4.61 \text{ \AA}$ и $c = 14.87 \text{ \AA}$) также согласуются с данными базы о минералах [5].

Кроме пиков магнезита на дифрактограмме присутствуют отражения, которые могут соответствовать кальциту (CaCO_3) или доломиту ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Для точной идентификации данных фаз рекомендуется более детальный анализ дифракционных данных, включая полнопрофильный анализ (Rietveld

refinement), который позволит оценить относительное содержание каждой фазы в образце [6, 7].

В целом комплексное исследование методами ТГА/ДСК и XRD показало, что исследуемое магнезитовое сырье содержит в основном магнезит с примесью карбоната кальция или доломита. Присутствие примесей влияет на термическое поведение магнезита, снижая температуру его разложения.

Список использованной литературы

1. Шапоров, В. П. О некоторых нерешенных проблемах в области производства и применения активных оксида и гидроксида магния / В. П. Шапоров, О. Э. Сердюков, Файад Макки Алаа, Д. Д. Нечипоренко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – №4 (36). – С. 31-38. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-nekotoryh-nereshennyh-problemah-v-oblasti-proizvodstva-i-primeneniya-aktivnyh-okside-i-gidroksida-magniya> (дата обращения: 28.05.2025).
2. Деревянко, В. Н. Влияние режимов обжига магнезита на структуру и свойства магнезиального камня / В. Н. Деревянко, А. И. Бегун, А. Н. Гришко, А. А. Максименко // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2014. – №8 (197). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-rezhimov-obzhiga-magnezita-na-strukturu-i-svoystva-magnezialnogo-kamnya> (дата обращения: 18.05.2025).
3. Аверина, Г. Ф. Исследование взаимосвязи объемных деформаций, состава и структурных характеристик магнезиальных вяжущих / Г. Ф. Аверина, Т. Н. Черных, А. А. Орлов, Л. Я. Крамар // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2017. – Т. 17. – № 3. – С. 40–47. – DOI: 10.14529/build170306.
4. Аверина, Г. Ф. Изучение объемных деформаций магнезиального камня и их зависимости от активности применяемых вяжущих / Г. Ф. Аверина, Н. В. Ковалёв, А. Е. Сницарь, З. Р. Давыдов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2017. – Т. 17. – № 4. – С. 35–39. – DOI: 10.14529/build170405.
5. База данных о минералах, определенных Международной минералогической ассоциацией (ИМА). – Режим доступа: <https://www.icdd.com/pdf-4-minerals/> (дата обращения: 21.05.2025)
6. Бесплатный онлайн-сервис, позволяющий извлекать цифровые данные порошков из изображений диаграмм XRD. – Режим доступа: <https://www.icdd.com/jade-pattern-digitizer/?page=www.icdd.com/JadeSAS/jade-pattern-digitizer/> (дата обращения: 21.05.2025).
7. Графический пользовательский интерфейс PreDICT для программы индексации порошковых дифракционных картин DICVOL. – Режим доступа: <https://www.icdd.com/predict/> (дата обращения: 21.05.2025).
8. Пояркова, Е. В. Производство и применение оксида магния в Российской Федерации / Е. В. Пояркова, А. С. Махновская // Горная промышленность. – 2024. – № 3. – С. 135-138.

9. Пояркова, Е. В. Роль термической активации магнийсодержащего сырья в процессе получения жженой магнезии / Е. В. Пояркова, А. С. Махновская // Южно-Сибирский научный вестник. – 2024. – № 3 (55). – С. 146-153.

10. Аяшева (Махновская), А. С. Извлечение оксида магния при выщелачивании магнезильного сырья с использованием угольной кислоты / А. С. Аяшева (Махновская), Е. В. Пояркова // Башкирский химический журнал. – 2023. – Т. 30. – № 2. – С. 89-96.

11. Осадченко, И. М. Оксид магния: свойства, методы получения и применения (аналитический обзор) / И. М. Осадченко, М. П. Лябин, А. Д. Романовскова // Природные системы и ресурсы. – 2018. – Т. 8. – №3. – С. 5-14.

PHASE COMPOSITION AND THERMAL BEHAVIOR OF MAGNESITE RAW MATERIAL

Angelina Sergeevna Makhnovskaya, postgraduate student

Orenburg State University

Abstract: *In this study, a comprehensive study of magnesite raw materials was carried out using thermogravimetric analysis (TGA), differential scanning calorimetry (DSC) and powder X-ray diffractometry (XRD). The aim of the work was to identify the phase composition of the raw material, determine the thermal characteristics of the decomposition processes and assess the effect of the presence of impurities on the thermal behavior of magnesite.*

The work was carried out at the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines under the supervision of Ekaterina Vasilievna Poyarkova, Head of the Department, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor.

Key words: *magnesite, magnesium oxide, dolomite, calcium carbonate, mineralogical analysis, phase composition, thermal decomposition*

Code and heading: *81.09.03 Properties and structure of materials.*

ПРОГРЕССИВНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ОДНОКАРБИДНОГО ТВЕРДОГО СПЛАВА

Свиденко Екатерина Валерьевна, кандидат технических наук, доцент
Мозгунова Виктория Сергеевна, бакалавр, 4 курс

Оренбургский государственный университет

Аннотация: Существует множество способов повышения эксплуатационных свойств однокарбидного твердого сплава. Это и карбонитрация и ионное азотирование и термическая обработка. В настоящее время все больше изучают влияние лазерной обработки на свойства твердого сплава. На основании экспериментального анализа видно, что лазерная обработка дает хороший эффект на такие свойства как микротвердость, износостойкость, микроструктура. При лазерной обработке однокарбидных твердых сплавов возможно образование дефектов в процессе воздействия излучения лазера: отслаивание участков поверхностного слоя, появление микротрещин, оплавление материала с образованием сетки микротрещин по периферии, следовательно, важно определить режимы, способствующие получению бездефектной поверхности.

Ключевые слова: лазерная обработка, микротвердость, износостойкость, микроструктура, однокарбидный твердый сплав.

Код и рубрика: 55.00.00 Машиностроение.

После проведенной лазерной обработки твердого сплава марки ВК6 была изучена микротвердость, микроструктура, измерен износ по передней и задней поверхности на кафедре МТМ [1-4]. Микроструктура представлена на рисунке 1 при увеличении 1000.

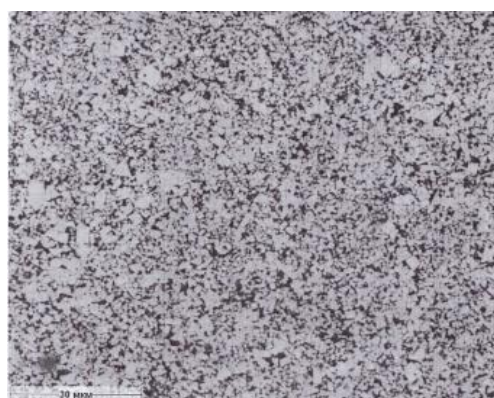
После анализа микроструктуры были проведены испытания на микротвердость. Производилось по пять замеров каждого образца и высчитывалось среднее значение, чтобы максимально избежать погрешности, результаты замеров микротвердости представлен в таблице 1 и на рисунке 2.

Таблица 1 – Замеры микротвердости ВК6 после лазерной обработки

Образец	Режимы обработки граней	Замеры микротвердости					Средняя микро- твердость
		1	2	3	4	5	
1	Исходный	1315	1248	1248	1248	1315	1275
2	N=150 Вт; D=1,5 мм; V=15 мм/с	1315	1387	1315	1387	1315	1344
3	N=200 Вт; D=1,5 мм; V=15 мм/с	1315	1387	1465	1465	1315	1389
4	N=250 Вт; D=1,5 мм; V=15 мм/с	1465	1387	1387	1465	1465	1434
5	N=300 Вт; D=1,5 мм; V=15 мм/с	1500	1465	1465	1465	1465	1482



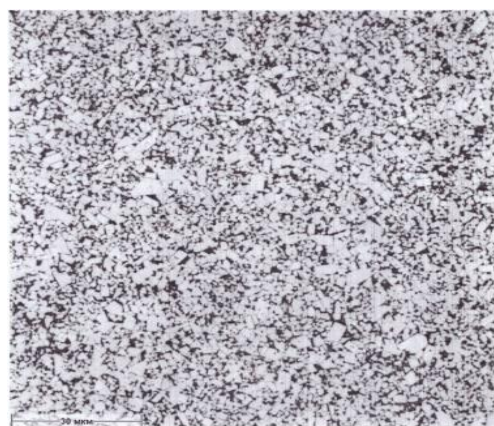
а



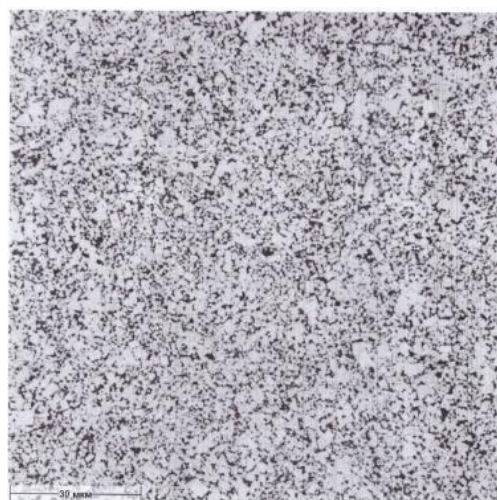
б



в



г



д

а – исходный образец;
 б – N=150 Вт; D=1,5 мм; V=15 мм/с;
 в – N=200 Вт; D=1,5 мм; V=15 мм/с;
 г – N=250 Вт; D=1,5 мм; V=15 мм/с;
 д – N=300 Вт; D=1,5 мм; V=15 мм/с

Рисунок 1 – Микроструктура твердого сплава ВК6 после лазерной обработки, х 1000

Из рисунка 2 видно, что происходит увеличение микротвердости в результате лазерной обработки. Наилучший результат микротвердости замечен по режиму N=300 Вт; D=1,5 мм; V=15 мм/с микротвердость составила 1482, для сравнения у исходного образца 1275, следовательно, микротвердость увеличилась на 207 единиц.

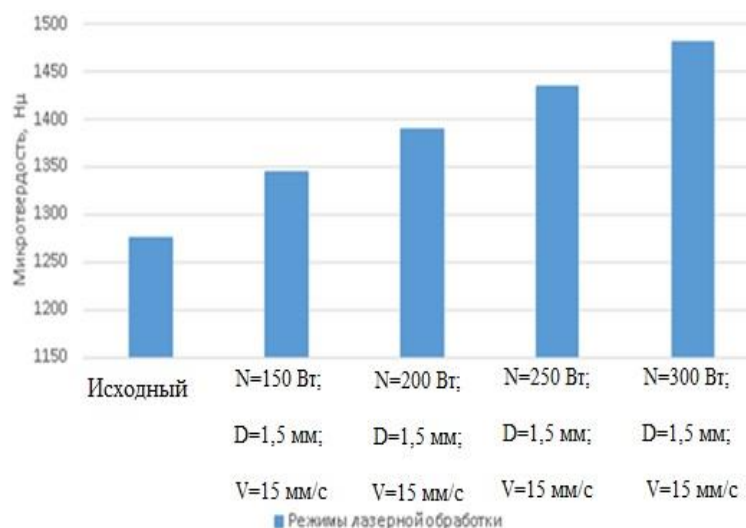


Рисунок 2 – Изменение микротвердости в результате различных режимов лазерной обработки ВК6

Были проведены испытания на резание на токарном станке 16K20 после лазерной обработки и пластины в исходном состоянии, было сделано 10 проходов. Результаты износа представлены на рисунки 3.

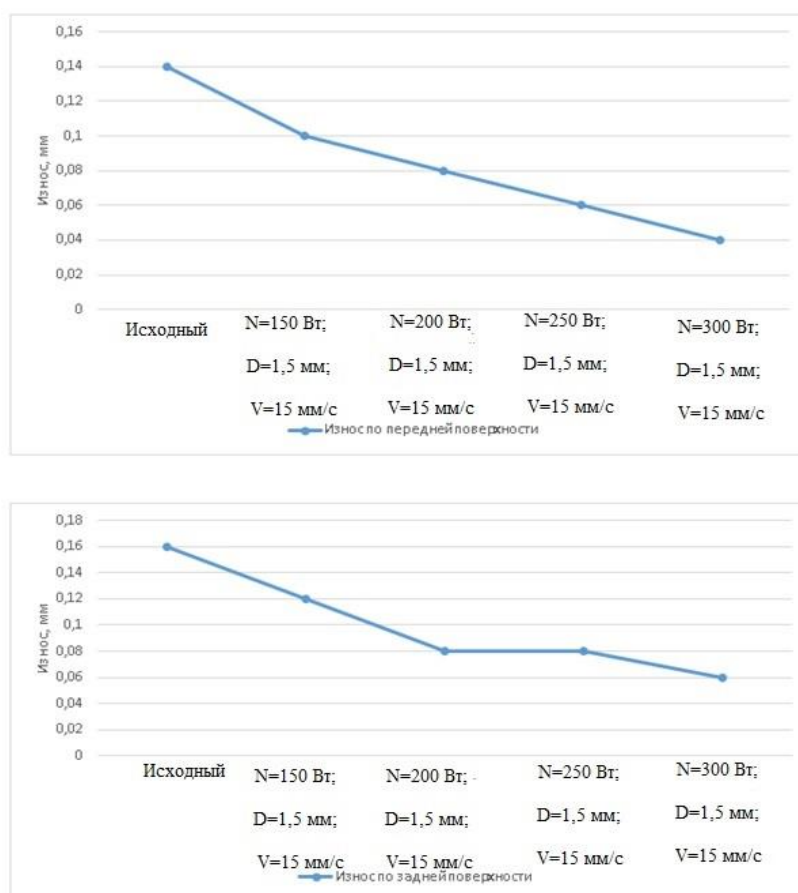


Рисунок 3 – Износ по передней и задней поверхности после лазерной обработки твердого сплава ВК6

Из рисунка 3 видно, что износ по передней поверхности исходного образца составил 0,14 мм, а после лазерного воздействия от 0,1 до 0,04, по задней поверхности исходного образца 0,16, а после лазерного воздействия от 0,12 до 0,08. Данный анализ показывает существенное увеличение износостойкости после лазерной обработки.

Список использованной литературы

1. Панов, В. С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них / В. С. Панов, А. М. Чувиллин // М.: МИСИС. – 2001. – 428 С.
2. Лахтин, Ю. М. Материаловедение: учебник для высших технических учебных заведений / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева // М.: Альянс. – 2014. – 528с.
3. Схиртладзе, А. Г. Ремонт технологических машин и оборудования: учеб. пособие для вузов / А. Г. Схиртладзе, В. А. Скрябин, В. П. Борискин // Старый Оскол: ТНТ. – 2011. – 431 С.
4. Пантелеенко, Ф. И. Восстановление деталей машин: справочник / Ф. И. Пантелеенко; под ред. В. П. Иванова // М.: Машиностроение. – 2003. – 672 С.

PROGRESSIVE LASER TREATMENT OF SINGLE-CARBIDE HARD ALOY

Svidenko Ekaterina Valeryevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

Mozgunova Victoria Sergeevna, bachelor, 4th year

Orenburg State University

Annotation: *There are many ways to improve the performance of a single-carbide hard alloy. These include carbonitration, ion nitriding, and heat treatment. Currently, the effect of la-grain treatment on the properties of a hard alloy is being studied more and more. Based on the experimental analysis, it can be seen that laser treatment has a good effect on such properties as microhardness, wear resistance, and microstructure. During laser treatment of single-carbide hard alloys, defects may form during exposure to laser radiation: peeling of sections of the surface layer, the appearance of microcracks, melting of the material to form a network of microcracks along the periphery, therefore, it is important to determine the modes that contribute to obtaining a defect-free surface.*

Keywords: *laser treatment, microhardness, wear resistance, microstructure, single-carbide hard alloy.*

Code and category: *55.00.00 Mechanical engineering.*

ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕЖИМЫ КАРБОНИТАЦИИ, ПОВЫШАЮЩИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ТВЕРДОГО СПЛАВА МАРКИ ВК10

Свиденко Екатерина Валерьевна, кандидат технических наук, доцент
Мозгунова Виктория Сергеевна, бакалавр, 4 курс

Оренбургский государственный университет

Аннотация: *Высокоэффективной технологией упрочнения твердых сплавов является карбонитрация. Карбонитрация это – нагрев в расплаве солей при 440 – 700 °С с выдержками 3 – 45 минут для режущего инструмента. Применение карбонитрации для обработки деталей повышает прочность на 60 – 90%, сильно повышает износостойкость по сравнению с нитроцементацией, цементацией, азотированием газовым, способствует маленьким деформациям пределах допуска чертежа. Технология применима для упрочнения деталей из любых марок твердого сплава, обеспечивает микронную точность деталей. Среди технологий низкотемпературного упрочнения карбонитрация в расплавах солей является наиболее экономичным процессом, она сокращает продолжительность выдержки до 0,4 – 7 часа, вместо 11 – 62 часов при газовом азотировании. В течении этого процесса практически отсутствует хрупкость карбонитрированного слоя, характеризующаяся для длительных процессов азотирования газового.*

Ключевые слова: *карбонитрация, микротвердость, износостойкость, микроструктура, износ.*

Код и рубрика: *55.00.00 Машиностроение.*

Современное машиностроение предъявляет высокие требования к износостойкости и твердости материалов, используемых для изготовления режущего инструмента и ответственных деталей. Твердые сплавы марки ВК10 широко применяются благодаря своей высокой прочности и износостойкости. Однако с целью увеличения срока службы и повышения эксплуатационных характеристик данных материалов актуально развитие и оптимизация методов их термической обработки.

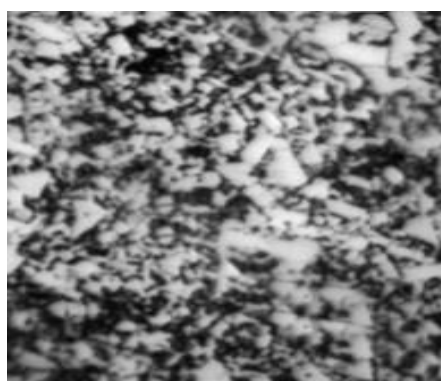
Одной из перспективных технологий является карбонизация – процесс насыщения поверхности твердых сплавов углеродом при высоких температурах, что способствует улучшению микроструктуры, росту карбидных включений и, как следствие, повышению износостойкости и микротвердости материала. Несмотря на известность метода, вопросы оптимизации режимов карбонизации для сплавов ВК10 остаются недостаточно изученными, особенно в части сокращения времени обработки при сохранении или улучшении свойств.

Настоящее исследование направлено на изучение влияния различных режимов карбонизации на микроструктуру, износостойкость и микротвердость твердого сплава ВК10, что позволит разработать эффективные технологические решения для повышения эксплуатационных характеристик материалов в

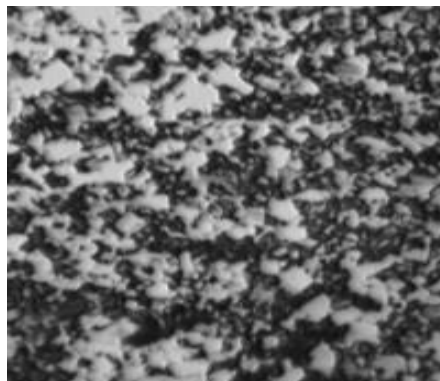
промышленности. Одним из таких эффективных способов является карбонизация – термическая обработка в расплаве солей при температурах 440–700 °С с выдержкой от 3 до 45 минут, обеспечивающая насыщение поверхности углеродом и формирование карбидных фаз [1-4].

После проведения карбонизации твердого сплава ВК10 была изучена его микроструктура и микротвердость, а также измерен износ по передней и задней поверхности образцов.

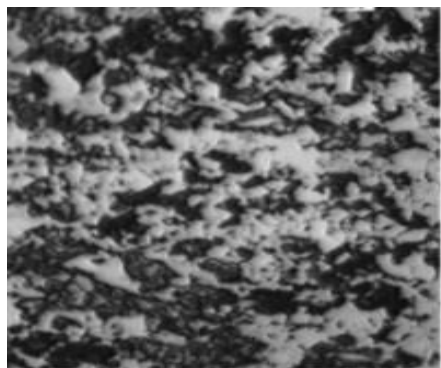
Микроструктурные исследования, представленные на рисунке 1 при увеличении 1000×, продемонстрировали изменения, связанные с ростом карбидных включений и измельчением зерен матрицы. Эти изменения обуславливают улучшение износостойкости и механических свойств сплава, что подтверждается результатами испытаний микротвердости и износа.



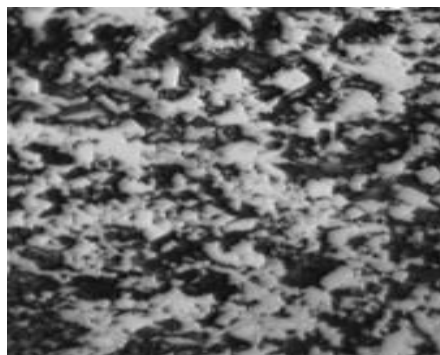
а



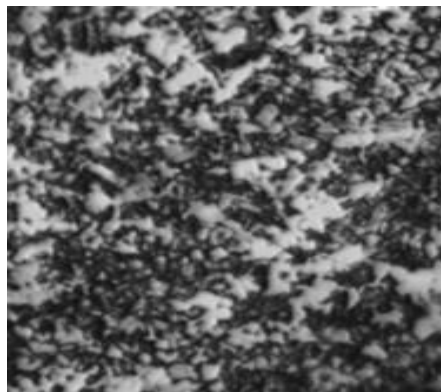
б



в



г



д

а – исходный образец;
б – после карбонитрации 15 минут;
в – после карбонитрации 20 минут;
г – после карбонитрации 40 минут;
д – после карбонитрации 80 минут

Рисунок 1 – Микроструктура твердого сплава ВК10 после карбонитрации, х 1000

Для оценки микротвердости исследуемых образцов проводились по пять измерений на каждом образце, после чего рассчитывалось среднее значение с целью минимизации погрешностей. На рисунке 2 представлена зависимость микротвердости твердого сплава ВК10 от длительности карбонизации. Анализ графика показывает, что с увеличением времени обработки наблюдается устойчивый рост микротвердости, что связано с прогрессирующим ростом карбидных включений и структурным уплотнением поверхностного слоя. Максимальное значение микротвердости достигается при длительности карбонизации 140 минут, что свидетельствует о достижении оптимального уровня поверхностного упрочнения.

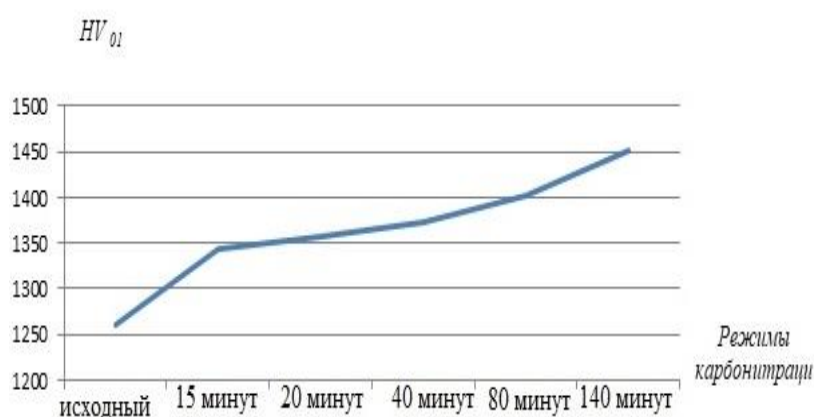


Рисунок 2 – Изменение микротвердости в результате длительности карбонитрации

Для оценки износостойкости после карбонизации были проведены испытания на токарно-винторезном станке модели 16К20, включающие 10 проходов по каждому образцу. Износ измерялся как по передней, так и по задней поверхности образцов. Результаты представлены на рисунках 3 и 4. На рисунке 3 видно, что износ по передней поверхности существенно снижается с увеличением времени карбонизации, что указывает на повышение сопротивления материала абразивному износу. Аналогичная тенденция наблюдается и на задней поверхности (рисунок 4), где уменьшение износа после обработки подтверждает эффективность карбонизации в улучшении эксплуатационных характеристик сплава ВК10.

Данные, представленные на графиках, свидетельствуют о том, что карбонизация способствует формированию более устойчивой и износостойкой микроструктуры за счет роста карбидных фаз и уменьшения размеров зерен матрицы. Это положительно влияет на рабочие характеристики твердых сплавов, делая их более пригодными для применения в условиях интенсивного механического воздействия.

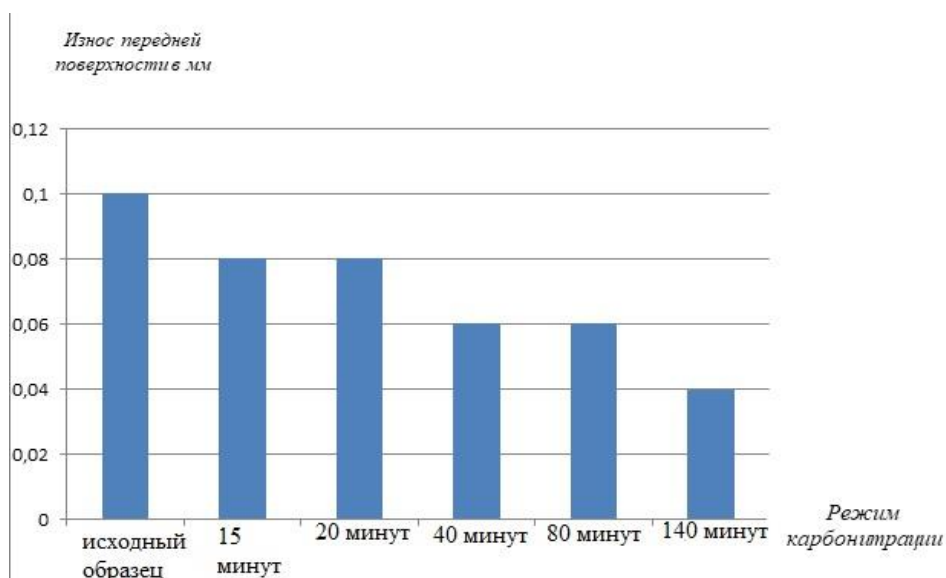


Рисунок 3 – Износ по передней поверхности твердого сплава ВК10 после карбонитрации

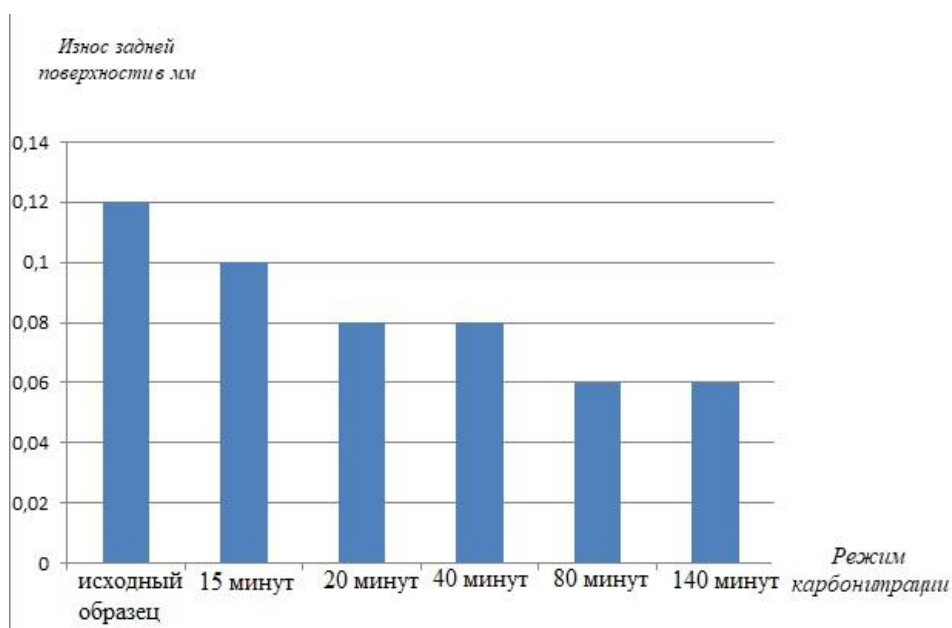


Рисунок 4 – Износ по задней поверхности твердого сплава ВК10 после карбонитрации

В результате проведенного исследования установлено, что карбонизация является эффективным методом поверхностного упрочнения твердого сплава марки ВК10. Оптимизация режимов обработки позволяет значительно повысить микротвердость и износостойкость материала за счет структурных изменений в микроструктуре, включая рост карбидных включений и уменьшение размеров зерен матрицы. Максимальные показатели микротвердости и минимальные значения износа достигаются при длительности карбонизации около 140 минут. Полученные результаты подтверждают перспективность применения

карбонизации для улучшения эксплуатационных характеристик твердых сплавов и расширения их области использования в условиях интенсивного механического воздействия.

Список использованной литературы

1. Лахтин, Ю. М. Материаловедение: учебник для высших технических учебных заведений / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева // М.: Альянс. – 2014. – 528с.
2. Панов, В. С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них / В. С. Панов, А. М. Чувиллин // М.: МИСИС. – 2001. – 428 с.
3. Пантелеенко, Ф. И. Восстановление деталей машин: справочник / Ф. И. Пантелеенко; под ред. В. П. Иванова// М.: Машиностроение. – 2003. – 672 с.
4. Схиртладзе, А. Г. Ремонт технологических машин и оборудования: учеб. пособие для вузов / А. Г. Схиртладзе, В. А. Скрыбин, В. П. Борискин // Старый Оскол: ТНТ. – 2011. – 431 с.

EFFECTIVE CARBONITRATION MODES THAT INCREASE WEAR RESISTANCE AND MICROHARDNESS OF A HARD ALLOY OF THE VK10 BRAND

Svidenko Ekaterina Valeryevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

Mozgunova Victoria Sergeevna, bachelor, 4th year

Orenburg State University

Annotation: Carbon-nitration is a highly efficient hardening technology for hard alloys. Carbonitration is the heating of salts in a melt at 440-700 ° C with a duration of 3 to 45 minutes for cutting tools, the use of carbonitration for machining parts increases strength by 60-90%, greatly increases wear resistance compared with nitrocementation, cementation, gas nitriding, and promotes small deformations within the drawing's tolerance. The technology is applicable to the hardening of parts made of any grade of hard alloy, provides micron precision parts. Among low-temperature hardening technologies, carbonitration in salt melts is the most economical process, it reduces the holding time to 0.4–7 hours, instead of 11 – 62 hours with gas nitriding. During this process, there is practically no brittleness of the carbonitriated layer, which is characterized for long-term gas nitriding processes.

Keywords: carbonitration, microhardness, wear resistance, microstructure, wear.

Code and category:55.00.00 Mechanical engineering.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Валиева Назгуль Азатовна, Хамитова Лилия Камилевна, Наумова Анастасия Владимировна, студенты бакалавриата, 2 курс
Пояркова Екатерина Васильевна, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой механики материалов, конструкций и машин

Оренбургский государственный университет

***Аннотация:** в данной статье рассматриваются современные методы проектирования дорожных одежд с учетом климатических условий России, что обуславливает специальные требования в процессе выбора материалов дорожной одежды и технологий строительства автомобильных дорог. В рамках статьи рассмотрены основные наиболее подходящие материалы, а также особенности материалов, с учетом их преимуществ и недостатков.*

***Ключевые слова:** климатические зоны России, цементобетонные смеси, дорожные одежды, эксплуатационные характеристики.*

***Код и рубрика:** 67.00.00 Строительство. Архитектура*

Современные методы проектирования дорожных одежд с учетом климатических условий обуславливают учет множества факторов, оказывающих влияние на долговечность и надежность дорожного полотна в процессе его эксплуатации. К таким факторам относятся перепады температур, солнечная радиация, атмосферные осадки и ветер, каждый из которых вносит свой вклад в формирование дефектов дорожных покрытий и земляного полотна. Для системного анализа и применения этих данных используется понятие геокомплекса — совокупности природных условий, включающей климат, геологические и рельефные особенности территории. Важным аспектом является возможность поддержания дорожных одежд в требуемом техническом состоянии, что зависит от географического расположения дорог, особенностей водно-тепловых режимов, влияющих на гидрологию, геоморфологию почвы, растительность.

Следует отметить, что деление территории России на дорожно-климатические зоны, учитываемое при проектировании, регламентируется нормативными документами, в частности ГОСТ Р 59120-2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Общие требования» [6].

В рамках изучения вопросов проектирования дорожных одежд с учетом климатических условия были проанализированы различные исследовательские работы, в частности представленные прошлым веком, когда массового проектировалось и строилось достаточно большое количество дорог. В рамках такого анализа обратимся к мнению В. Ф. Бобкова, который в [1] отмечает: «Отдавая должное результатам исследовательских работ середины прошлого века по дорожно-климатическому районированию, отмечая их значение для

огромной и разнообразной по природным и климатическим условиям территории России, важно понимать, что требования и рекомендации, позволяющие учитывать особенности географического комплекса при проектировании автомобильных дорог, далеко не всегда прошли качественную и достаточную проверку в районах с недостаточно развитой инфраструктурой. Сложившийся подход к выделению однородных территорий только по зональным признакам геокомплекса при дорожно-климатическом районировании без дополнительного иерархического ее деления не позволяет обеспечивать требуемый уровень эксплуатационной надежности транспортных сооружений по критерию работоспособность, поскольку каждая зона территориально распространена в пределах и европейской, и азиатской частей России и включает большое разнообразие природных и климатических признаков геокомплекса» [1].

Существующая система дорожно-климатического районирования территории бывшего Советского Союза, разработанная в 1950-х годах, не отражает современных особенностей природно-климатических условий ряда регионов, охватывающих значительные площади Российской Федерации. Это обстоятельство, обстоятельно исследованное в [8-10], ограничивает возможности оптимального определения межремонтных периодов эксплуатации автомобильных дорог. В условиях активного освоения новых территорий, в частности обширной Арктической зоны, возникает необходимость разработки унифицированного методического подхода, обеспечивающего согласованное выделение внутри существующих зон однородных по географическим и климатическим характеристикам районов. В рамках таких районов предполагается применение однотипных дорожных конструкций, обладающих сопоставимыми показателями прочности и устойчивости, что позволит повысить эффективность проектирования и эксплуатации дорожных одежд с учётом специфики климатических факторов [8].

На рисунках 1 и 2 представлены схемы деления территории бывшего СССР и современной Российской Федерации на дорожно-климатические зоны и подзоны. Первая схема (рисунок 1) основана на нормативных документах середины XX века (НиТУ 128-55, СНиП II-Д.5-62, СНиП II-Д.5-72) и отражает исторический подход к районированию, учитывающий особенности климата того времени. Вторая схема (рисунок 2), разработанная и утверждённая в 2021 году (СП 34.13330.2012), демонстрирует современное деление с более детальной градацией и учётом актуальных климатических условий, что позволяет более точно проектировать дорожные конструкции в различных регионах России.

Рациональный учёт региональных факторов является ключевым элементом при проектировании и строительстве автомобильных дорог в сложных и слабо изученных природных условиях. Данный подход предполагает детальное изучение местных природных особенностей и выделение однородных дорожных районов на основе комплексного анализа зональных и внутризональных признаков. Это позволяет уточнить характеристики грунтов, конструктивных материалов и технических требований, что способствует

созданию прочных и устойчивых дорожных конструкций с учётом специфики территорий.

Важным направлением является также и разработка методологии, обеспечивающей высокое качество проектирования транспортных сооружений с учётом природно-климатических условий отдельных регионов России. Такая методика предусматривает дифференциацию по зональным, внутризональным и региональным признакам, что позволяет адаптировать проектные решения к геофизическим и климатическим особенностям каждого выделенного дорожного района.

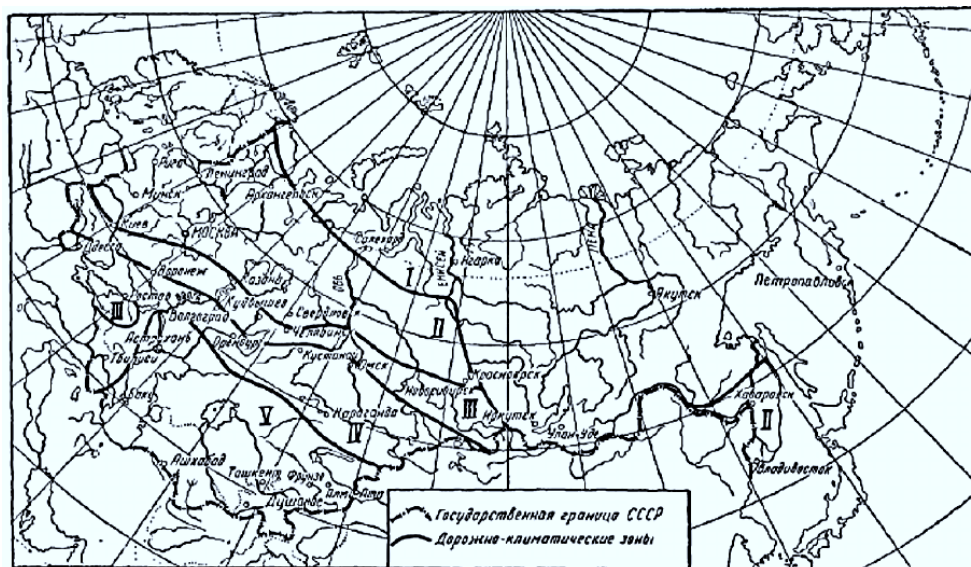


Рисунок 1 – Схема деления территории СССР на дорожно-климатические зоны, нашедшая отражение в НиТУ 128-55, СНиП II-Д.5–62, СНиП II-Д.5–72 [8]



Рисунок 2 – Схема деления территории РФ на дорожно-климатические зоны – подзоны, нашедшая отражение в СП 34.13330.2012 (2021) [8]

Вместе с тем, С. В. Ефименко с соавторами утверждают, что: «На сегодняшний день отсутствует единая стандартизованная отраслевая методика

дорожно-климатического районирования, обеспечивающая требуемый уровень надежности конструктивно-технологических решений на стадиях проектирования и строительства автомобильных дорог» [8].

Обращаясь к современному этапу развития дорожной системы страны, важно отметить, что в последние десятилетия наблюдается значительный скачок в развитии транспортно-дорожной отрасли, динамичное развитие межрегиональных, международных и транзитных потоков. Все выше перечисленное обуславливает запрос на развитие сети автомобильных дорог, которые будут отвечать всем современным требованиям.

Так, в работе С. В. Алексеева [7] представлены особенности учета влияния природно-климатических условий при проектировании автомобильной дороги. Показано, что условия окружающей среды напрямую влияют на специфику проектирования дорог. Однако, они могут играть двоякую роль: как содействовать, так и противодействовать длительной службе дорожных одежд и земляного полотна. Так как невозможно повлиять на погодные условия, то необходимо обеспечить полноценную защиту всех дорожных конструкций.

На рисунке 3 представлена структурированная схема основных погодно-климатических факторов, оказывающих комплексное воздействие на состояние дорожных конструкций. В частности, показано, как перепады температур, атмосферные осадки, солнечная радиация и ветер приводят к образованию дефектов покрытия, таких как трещины, выбоины, колейность и ускоренный износ. Данная схема подчёркивает важность учёта всех перечисленных факторов при проектировании и реконструкции автомобильных дорог для обеспечения долговечности и надёжности дорожной одежды с учётом климатических особенностей района строительства.



Рисунок 3 – Схема воздействия на дорожную конструкцию [7]

Рациональный учёт природно-климатических факторов при проектировании и реконструкции автомобильных дорог позволяет повысить их эксплуатационную надёжность и долговечность. Основными воздействующими факторами являются перепады температур, солнечная радиация, атмосферные осадки и ветер, каждый из которых вносит существенный вклад в развитие дефектов дорожных покрытий и земляного полотна. Современные нормативные документы и методические рекомендации (СП 34.13330–2021, ГОСТ Р 58401 и др.) предусматривают детальный анализ и учёт данных факторов на всех этапах жизненного цикла дороги, что особенно актуально при реконструкции старых и строительстве новых автомобильных дорог.

Таким образом, интеграция результатов климатического районирования с современными требованиями к проектированию обеспечивает адаптацию конструктивных решений к специфике региональных условий и способствует созданию более прочных и устойчивых дорожных одежд. В связи с этим в современном дорожном хозяйстве возникает необходимость внедрения новых технологий и материалов, способных эффективно противостоять неблагоприятным природно-климатическим воздействиям.

Россия расположена в умеренном климатическом поясе, в том числе в зоне резко-континентального климата. Данные климатические зоны характеризуются возможностью значительного перепада температур в дневное и ночное время, а также колоссальной разницей температур в разные времена года.

На территории равнин и в зонах предгорья в летний период температура может достигать 25-35 °С, а в определенные периоды аномальной жары достигать 40 °С. Зимой же температурные значения могут достигать –35 °С. В ряде районов может наблюдаться засушливая погода, в то время как другие территории, наоборот, отличаются повышенной влажностью.

Таким образом, сложные климатические условия регионов России, характеризующиеся частыми переходами температуры через 0 °С, интенсивным увлажнением и высокой солнечной радиацией требуют использования для устройства дорожного полотна современных материалов с повышенной прочностью и долговечностью.

Говоря о дорожной одежде, важно отметить, что дорожную одежду подразделяют на четыре вида: капитальную, облегченную, переходную и низшую. Классификация основана на работоспособности дорожной одежды, которая зависит от условий движения и категории дороги.

В настоящей статье уделено особое внимание капитальной дорожной одежде, отличающейся высокой надёжностью, соответствующей требованиям движения и срокам эксплуатации автомобильных дорог высокого класса.

Согласно [6], для капитальных дорожных одежд применяют следующие виды покрытий: цементобетонные, армобетонные сборные и монолитные, железобетонные монолитные и сборные или из предварительно напряжённого железобетона, асфальтобетонные.

Анализ ряда научных исследований позволил обобщить, что в настоящее время более оптимальным вариантом при проектировании дорожных одежд можно считать цементобетонное покрытие.

Рассматривая цементобетонное покрытие как один из наиболее современных и эффективных вариантов дорожных одежд, важно отметить его основные преимущества. Наиболее важными являются следующие:

- экономическая эффективность. В среднем стоимость такого покрытия в сравнении с покрытием из асфальтобетона ниже на 10-15% на каждый километр дороги;

- долговечность. В ряде исследований приводится средний срок службы таких дорог в России, он составляет в среднем тридцать и более лет;

- высокие технико-эксплуатационные характеристики. Дорожное покрытие из цементобетонного покрытия не подвержено деформации под воздействием крупногабаритного автотранспорта. Данное покрытие отличается высокой прочностью и несущей способностью;

- экологическая безопасность. С учетом средней скорости движения на трассах России, которая составляет 90–110 км/час, расход топлива движущегося автотранспорта может снижаться на 5–10%, что в свою очередь снижает экологическую нагрузку от выбросов автотранспорта. Кроме этого, само покрытие из цементобетона не выделяет токсичных выбросов;

Тем не менее, несмотря на достаточно большое количество преимуществ, данное покрытие имеет свои недостатки, которые также стоит учитывать. Среди них можно выделить следующие:

- в процессе укладки важно использовать цемент высокого качества, также применять прочный щебень и стальную арматуру;

- в процессе производства бетона и его укладки необходимо специализированное оборудование, которое может быть достаточно дорогостоящим;

- достаточно долгий период достижения необходимой прочности бетона, в среднем четыре недели. В данный период необходимо правильно обеспечивать специальный уход за покрытием, а также решать варианты с объездными путями.

Т. В. Москвитина с соавторами в своей работе [3] констатируют следующее: «Анализ экономической составляющей показывает, что стоимость 1 м² дороги с цементобетонным покрытием на 10-15% ниже, чем асфальтобетонной дороги. Если в цементобетон включить инновационные добавки, стоимость материала вырастет на 30%. Но с учетом того, что срок эксплуатации дороги с цементобетонным покрытием до капитального ремонта составляет 30 лет, а для дороги с асфальтобетонной одеждой этот показатель равняется 8 годам, один год службы дороги из высококачественного цементобетона, улучшенного присадками и добавками, обходится намного дешевле. Это делает использование данного материала для строительства автомобильных дорог более выгодным» [3].

Важно отметить, что на современном этапе в промышленном производстве представлен достаточно широкий спектр материалов, ранее не представленных на рынке, соответственно такие материалы не применялись для строительства дорожного покрытия. Кроме этого строители, занимающиеся проектированием и изготовлением автомобильных дорог, используют в своей работе современное

высокотехнологичное оборудование, которое обеспечивает качественное и достаточно быстрое достижение поставленных задач.

Сам бетон стал более качественным, в его составе появились инновационные компоненты, придающие материалу новые свойства. В зависимости от конструкции и технологических особенностей производства цементобетонные дорожные одежды могут быть:

- монолитными и сборными;
- армированными и неармированными;
- однослойными и двухслойными.

Кроме этого, анализ ряда работ по теме исследования, показал, что помимо обычного бетона, в процессе строительства автодорог можно сначала использовать напряженный бетон. Для любой из указанных выше конструкций должен использоваться только тот цемент, который соответствует дополнительным специальным требованиям [5].

И. Э. Удальцов отмечает: «Благодаря доступным сегодня технологиям и дорожно-строительной технике возможно укладывать цементобетонное покрытие в два слоя. Сначала укладывается слой из цемента низких марок с крупным щебнем. Поверх него делается слой покрытия из цемента высоких марок с применением мелкого износостойкого щебня. Благодаря такой конструкции дорожное полотно сохраняет свое высокое качество, но стоимость его прокладки снижается. При работе дорожно-строительной техники применяются трехмерные системы, позволяющие добиться исключительной ровности дорожного покрытия. Используемые сегодня бетонные смеси отличаются особыми свойствами, что делает технологию укладки более совершенной. Например, ранее бетон, набирающий прочности, необходимо было поливать водой и укрывать пленкой для сохранения влаги. Сегодня поддержание требуемой влажности обеспечивается с помощью специальных составов, которые наносятся на покрытие» [5].

В соответствии с представленной выше информацией следует обобщить, что проектирование и выполнение работ по устройству дорожных одежд на основе цементобетона можно считать достаточно сложной задачей с технической точки зрения. Важно, чтобы в рамках данного процесса строго соблюдались все необходимые нормы и требования. Точное соблюдение всех норм и правил может являться гарантией того, что данное полотно прослужит долго и будет иметь высокое качество.

Разнообразие цементобетонных смесей и дополнительных компонентов, а также современные технологические решения обеспечивают возможность подбора максимально подходящих вариантов для конкретных местностей.

Прежде чем приступить к строительству нового дорожного полотна из цементобетона, подрядное предприятие должно провести детальное изучение местности, выявить ландшафтные особенности, определить погодноклиматические условия, а также установить, какие нагрузки будет испытывать будущее покрытие.

Как уже отмечалось выше, современные автомобильные дороги должны иметь высокие транспортно-эксплуатационные характеристики, обеспечивать

безопасность движения, и при этом возводиться с минимально возможными строительными затратами. В этих условиях решающую роль играет выбор технологий и инструментов, используемых для проектирования.

Большинство автомобильных дорог проектируется с помощью систем автоматизированного проектирования (САПР), представляющих собой комплекс методических, информационных и программных средств. Автоматизированное проектирование (АП) позволяет разработать и выпустить проектно-сметную документацию, обладающую уровнем качества, недостижимым средствами традиционного проектирования. Так, Е. В. Волковой и А. И. Солоненко в [12] изложена методика процесса АП дорожных одежд на автомобильных дорогах в программной системе РАДОН RU программного комплекса CREDO [13], показаны основные критерии назначения конструкций дорожных одежд и проанализированы основные принципы работы системы. Помимо выполнения расчетов по заданным толщинам конструкции, система позволяет выполнять оптимизационный расчет по подбору конструкции минимальной толщины, наименьшего запаса прочности, минимальных показателей по базовой сметной стоимости.

В настоящее время на отечественном рынке программных продуктов одним из лидеров является компания-разработчик «Кредо-Диалог», которая создает программные продукты КРЕДО (CREDO) и входит в число ведущих разработчиков отечественного инженерного ПО для производства инженерных изысканий и проектирования объектов транспортного строительства и промышленного и гражданского строительства [14]. Программные продукты КРЕДО внесены в единый реестр российских программ для ЭВМ и баз данных Минкомсвязи РФ.

Технологии КРЕДО активно используются для:

- обработки материалов инженерных изысканий;
- проектирования объектов промышленного, гражданского и транспортного строительства;
- разведки, добычи и транспортировки нефти и газа;
- создания и ведения крупномасштабных цифровых планов городов и промышленных предприятий;
- подготовки данных для землеустройства и геоинформационных систем;
- решения многих других инженерных задач.

Применение комплекса КРЕДО позволяет создать единую технологическую цепочку для решения различных инженерных задач в области геодезии, геологии, транспортного строительства, маркшейдерского обеспечения работ, землеустройства, создания генеральных и дежурных планов, ведения сметной документации.

ТИМ КРЕДО РАДОН – программа для расчета и автоматизированного проектирования дорожных одежд (жестких и нежестких типов) при проектировании новых и реконструкции существующих дорог, а также улиц. Она обеспечивает высокую скорость и точность расчетов, поддерживает

использование геосинтетических материалов и включает базы данных автомобилей и материалов по стандартам Российской Федерации (с учетом ПНСТ 541-2021 и ПНСТ 542-2021), а также Республики Казахстан (СП 3.03-104-2014). Библиотеки автомобилей и материалов в программном продукте универсальны, расширяемы и обеспечивают поиск по различным критериям (рисунки 4, 5). Базы данных ускоряют заполнение и редактирование исходных данных, предлагая выбор автомобилей по марке или по современной классификации с учетом конструктивной схемы и грузоподъемности.

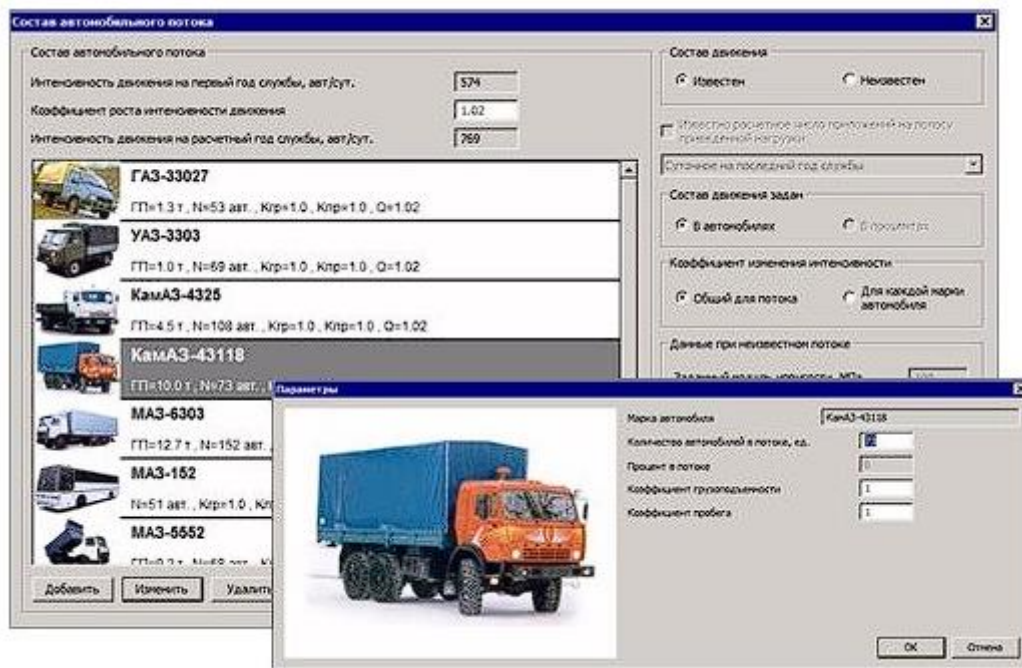


Рисунок 4 – Библиотеки автомобилей в программе ТИМ КРЕДО РАДОН [15]

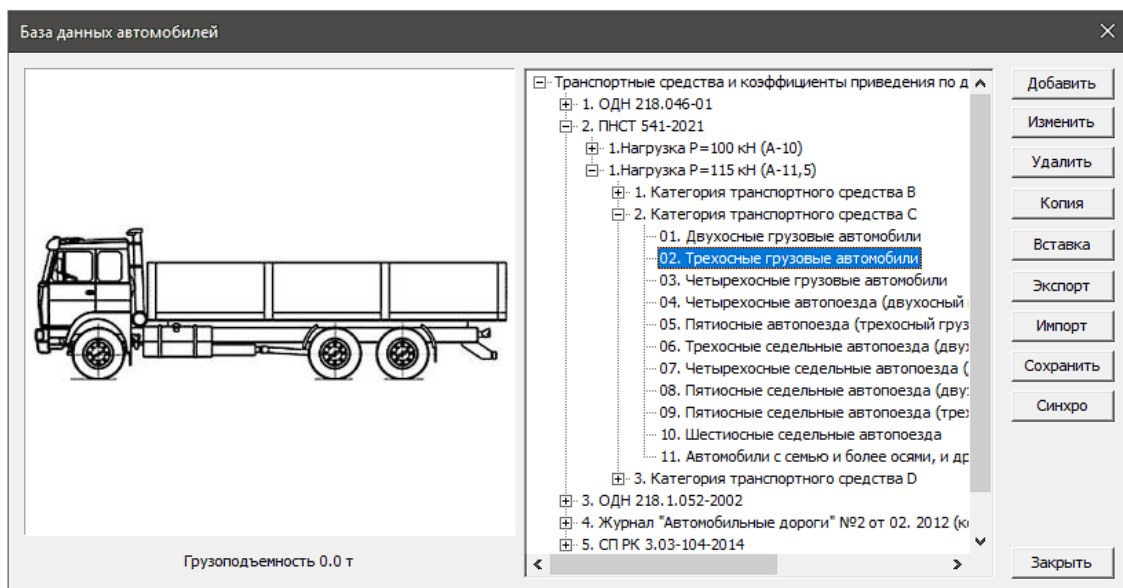


Рисунок 5 – Библиотеки автомобилей по классификации современных транспортных средств в программе ТИМ КРЕДО РАДОН [15]

Программа позволяет задавать толщину слоев покрытия с точностью до 1 мм (оптимизационные расчеты – с точностью 5 мм), назначать защитные слои, сравнивать варианты конструкций, импортировать/экспортировать данные.

ТИМ КРЕДО РАДОН позволяет проектировщику выбрать подходящую методику расчета, упрощая анализ результатов и внесение изменений в конструкцию.

Ввод исходных данных (климат, дорога, интенсивность движения, нагрузки, конструкция) осуществляется через интуитивно понятный интерфейс с подсказками, справочной информацией и контролем корректности. Система предоставляет гибкие настройки расчета, позволяя использовать как нормативные, так и индивидуальные данные (коэффициенты прочности, нагрузки, коэффициенты Кд, условия морозозащиты и т.д.) для решения нестандартных задач.

Результаты расчета отображаются в рабочем окне вместе со схемой конструкции (рисунок 6).

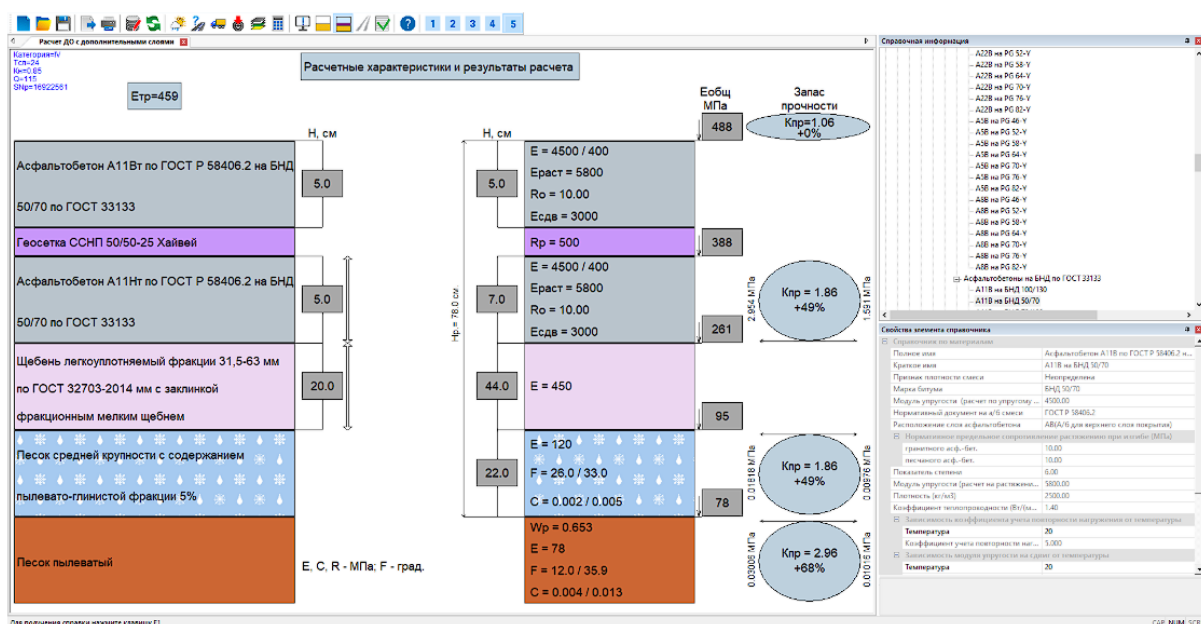


Рисунок 6 – Результат расчета конструкции дорожной одежды в рабочем окне программы ТИМ КРЕДО РАДОН [15]

Программа позволяет создавать несколько вариантов конструкций дорожных одежд в рамках одного проекта (рисунок 7). В рабочем окне отображается активный вариант конструкции и результаты расчета.

Технико-экономическое сравнение вариантов конструкций доступно в формате таблицы (RTF) и в виде схемы с условными обозначениями слоев (DXF) (рисунок 8).

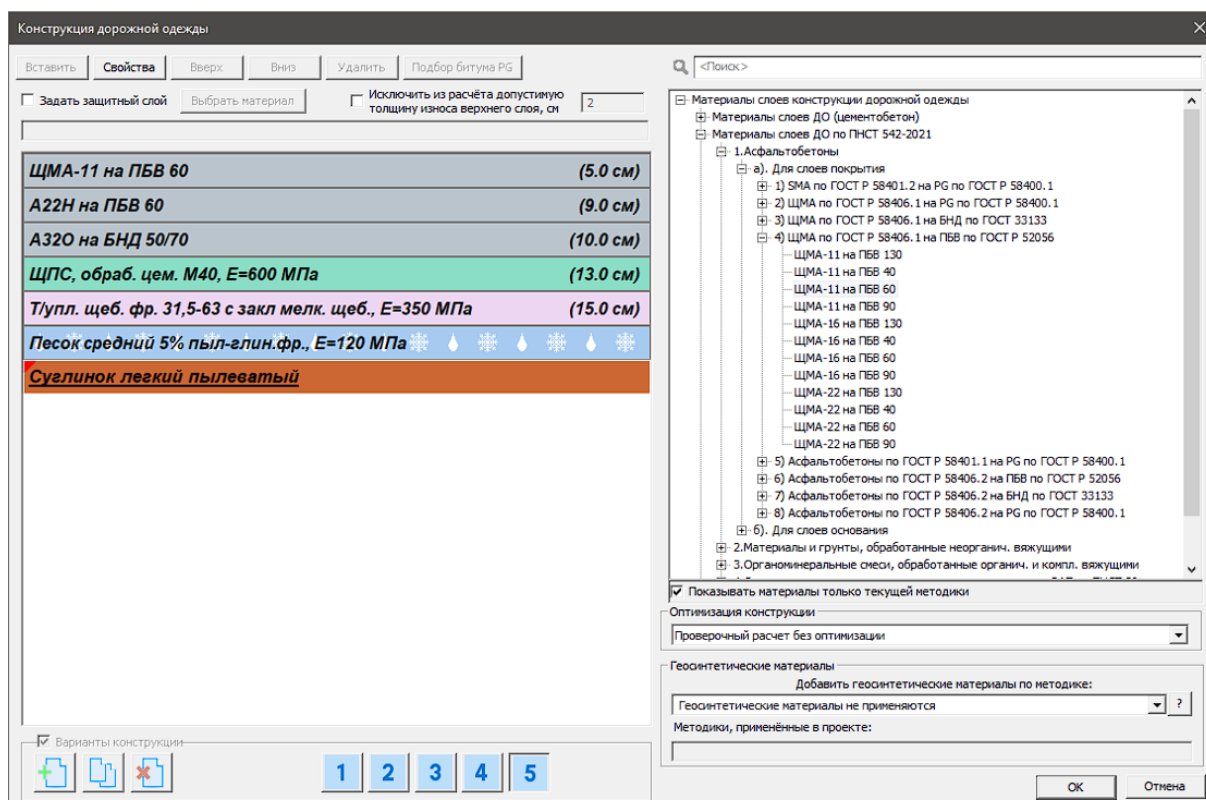


Рисунок 7 – Варианты конструкций дорожной одежды в программе ТИМ КРЕДО РАДОН [15]

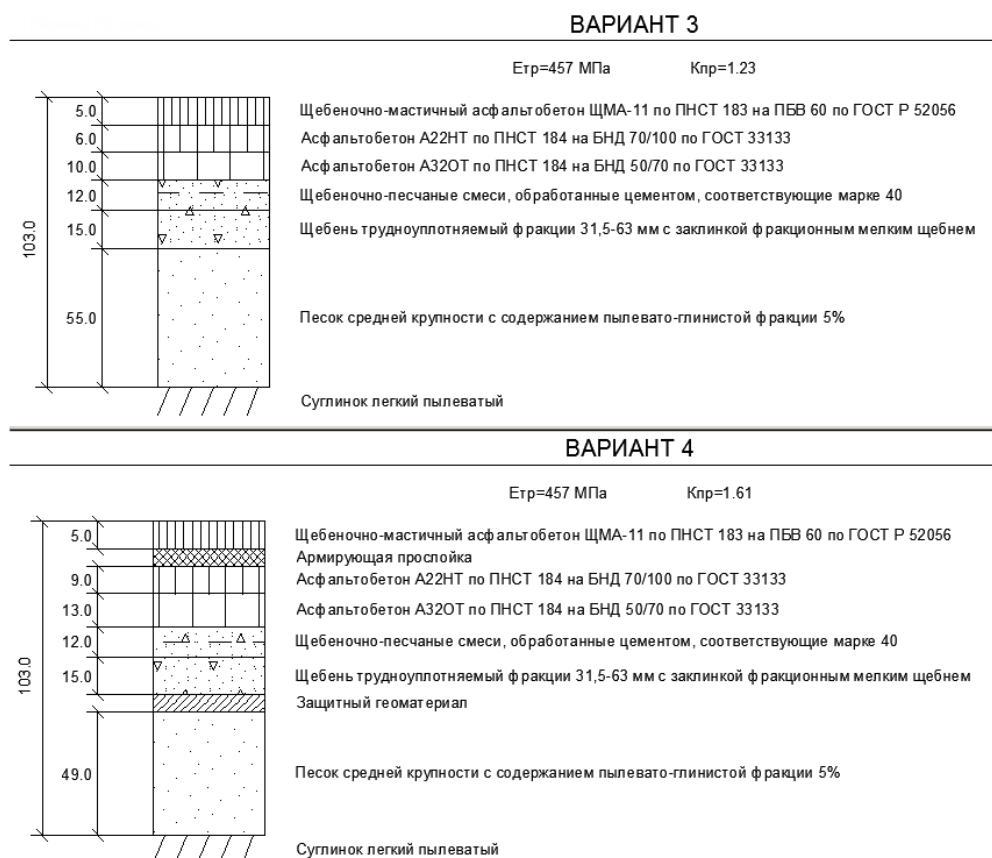


Рисунок 8 – Схемы вариантов конструкций дорожной одежды в программе ТИМ КРЕДО РАДОН [15]

Вместе с тем, упоминая о специалистах, работающих в сфере проектирования дорожных одежд с учетом климатических условий, необходимо отметить, что они должны постоянно стремиться к разработке и использованию как новых материалов для дорожного полотна, так и к улучшению технологий и техники. Только с учётом всех ключевых факторов, влияющих на долговечность и надёжность дорожного покрытия, можно достичь максимальной эффективности от применения современных разработок и достижений в строительстве автомобильных дорог.

Список использованной литературы

1. Бабков, В. Ф. Проектирование автомобильных дорог: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автомобильные дороги» / В. Ф. Бабков. – М. : Техиздат. – 2021. – 368 с.
2. Болгов, А. Д. Дороги с применением цементно-бетонных покрытий – перспективное направление в дорожном строительстве / А. Д. Болгов, Т. Л. Лазарева // Материалы секционных заседаний 59-й студенческой научно-практической конференции ТОГУ. – 2019. – С. 12-16.
3. Москвитина, Т. В. Автомобильные дороги с цементобетонным покрытием / Т. В. Москвитина, Н. В. Боковикова, Е. А. Степанова // Инженерные и социальные системы. – 2019. – С. 154-159.
4. Иванова, Н. В. Цементобетонные покрытия в дорожном строительстве / Н. В. Иванова, Д. В. Целищев // Вестник современных исследований. – 2017. – № 12-1(15). – С. 155-157.
5. Удальцов, И. Э. Современные методы расчета дорожных одежд. Часть 1. Обзор и анализ / И. Э. Удальцов // Молодой ученый. – 2016. – № 12 (116). – С. 403-406. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/116/31398/> (дата обращения: 23.05.2025).
6. ГОСТ Р 59120-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Общие требования, (утв. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 05.03.2021 № 121-ст), введ. 05.03.2021. – Режим доступа: https://rosghos.ru/file/gost/93/080/gost_r_59120-2021.pdf (дата обращения 29.05.2025).
7. Алексеев, С. В. Воздействие природных факторов на состояние дорог в различных регионах России / С. В. Алексеев, Д. Л. Симонов, А. С. Катинова // ИТСТ. – 2022. – №4. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/voz-deystvie-prirodnih-faktorov-na-sostoyanie-dorog-v-razlichnyh-regionah-rossii> (дата обращения: 31.05.2025).
8. Ефименко, С. В. Назначение границ таксонов, объединяющих однородные территории по признакам геокомплекса при дорожно-климатическом районировании / С. В. Ефименко, В. Н. Ефименко, М. В. Бадина, И. А. Баширова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2024. – Т. 26. – № 5. – С. 212–224.

9. Афиногенов, О. П. Совершенствование методов проектирования автомобильных дорог на основе дифференциации районирования / О. П. Афиногенов, С. В. Ефименко, А. О. Афиногенов. – Кемерово : ООО «Офсет». – 2016. – 364 с.
10. Ефименко, С. В. Формирование информационной базы для целей дорожно-климатического районирования территорий / С. В. Ефименко, В. Н. Ефименко, А. В. Сухоруков // Сборник ФГУП «РОСДОРНИИ». Дороги и мосты. – 2015. – № 1 (33). – С. 24–44.
11. Бадина, М. В. Обеспечение качества проектирования дорожных конструкций на основе учёта региональных природно-климатических условий (на примере Западной Сибири) : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Омск. – 2009. – 25 с.
12. Волкова, Е. В. Использование программной системы РАДОН RU для конструирования и расчета дорожной одежды нежесткого типа / Е. В. Волкова, А. И. Солоненко // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2015. – №2 (13). – С. 28-33.
13. Сайт компании «Кредо-Диалог». – Режим доступа: <https://credo-dialogue.ru/> (дата обращения: 01.06.2025).
14. Программные продукты и технологии КРЕДО. – Режим доступа: <https://credo-dat.ru/> (дата обращения: 01.06.2025).
15. Программа для расчета и автоматизированного проектирования дорожных одежд ТИМ КРЕДО РАДОН. – Режим доступа: <https://credo-dat.ru/credo.prod/credo-radon/> (дата обращения: 01.06.2025).

MODERN METHODS OF PAVEMENT DESIGN TAKING INTO ACCOUNT CLIMATIC CONDITIONS

Valieva Nazgul Azatovna, Khamitova Liliya Kamilevna, Naumova Anastasia Vladimirovna, undergraduate students, 2nd year
Poyarkova Ekaterina Vasilievna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines
Orenburg State University

Abstract: *this article considers modern methods of road pavement design taking into account climatic conditions of Russia, which causes specialized requirements in the process of selecting road pavement materials and technologies of highway construction. Within the framework of the article the main most suitable materials are considered, as well as the peculiarities of materials, taking into account their advantages and disadvantages.*

Key words: *climatic zones of Russia, cement concrete mixtures, road pavements, performance characteristics.*

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ТЕРМОДИФФУЗИОННОГО СИЛИЦИРОВАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЗМЕЕВИКОВ РЕАКЦИОННОЙ ПЕЧИ ИЗ СТАЛИ 10X23H18

Шерматов Джамшед Наимджонович, канд. техн. наук, доцент

Тазетдинов Руслан Муслимович, аспирант, 1 курс

Хисамов Марс Хамитович, доцент

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Аннотация. В работе представлены результаты исследования термодиффузионного силицирования сварных соединений змеевиков реакционной печи из жаростойкой стали 10X23H18. Исследования проводились при температуре 1000 °С с различной продолжительностью выдержки. Установлено, что термодиффузионный защитный слой на основе кремния, начинает формироваться при выдержке не менее 8 часов. Наибольшая толщина покрытия (до 109 мкм) зафиксирована в зоне термического влияния с внутренней стороны трубы. При увеличении времени до 10 часов зафиксировано уменьшение толщины силицированного слоя во всех исследованных зонах. Этот эффект интерпретируется как результат изменения условий диффузии кремния: по мере уплотнения структуры сформированного слоя его способность к дальнейшему насыщению снижается, что ограничивает рост защитного покрытия. Выделен оптимальный режим силицирования, обеспечивающий эффективное защитное покрытие без перерасхода времени и ресурсов.

Ключевые слова: термодиффузионное силицирование, сварной шов, змеевик реакционной печи, аустенитная сталь, защитный слой, время выдержки, толцинометрия

Код и рубрика: 55.00.00. Машиностроение.

Змеевики реакционных печей пиролиза этилена работают при температурах, достигающих 1050 °С, в агрессивной среде углеводородов. Наиболее уязвимой зоной при этом являются сварные соединения труб, подверженные интенсивному науглероживанию и осаждению кокса. Это вызывает преждевременное выгорание металла, снижение прочности и внеплановые остановки оборудования [1-3].

Одним из перспективных методов повышения стойкости сварных соединений к углеродной диффузии и коксообразованию является термодиффузионное силицирование – насыщение поверхности кремнием с образованием защитного слоя на основе силицидов. Кремний снижает скорость науглероживания за счёт низкого химического сродства к углероду и образования стабильных фаз [4].

Настоящая работа направлена на изучение влияния времени термообработки на толщину силицированного слоя в сварных соединениях

змеевиков реакционных печей из стали 10X23H18 после длительной эксплуатации. Целью является, определение оптимального режима силицирования, обеспечивающего максимальную толщину и равномерность защитного слоя.

Для экспериментов использовались фрагменты труб змеевиков реакционной печи из стали 10X23H18. Из зоны сварных соединений были вырезаны прямоугольные образцы размером 38×10×9 мм, включающие валик, корень шва и прилегающие зоны термического влияния (рисунок 1) [5].

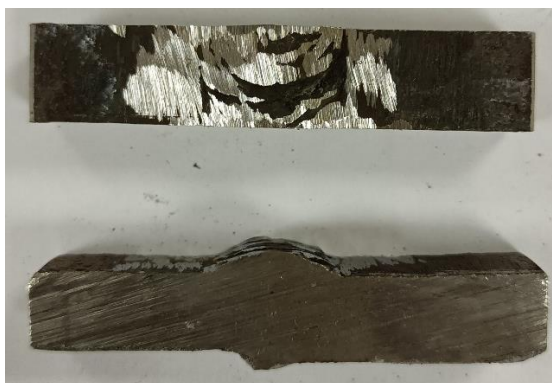


Рисунок 1 – Образец со сварным швом

Образцы помещались в герметичный контейнер, заполненный силицирующей смесью на основе карбида кремния, оксида кремния, фтористого аммония и оксида марганца. Для герметизации использовалось измельчённое стекло [5].

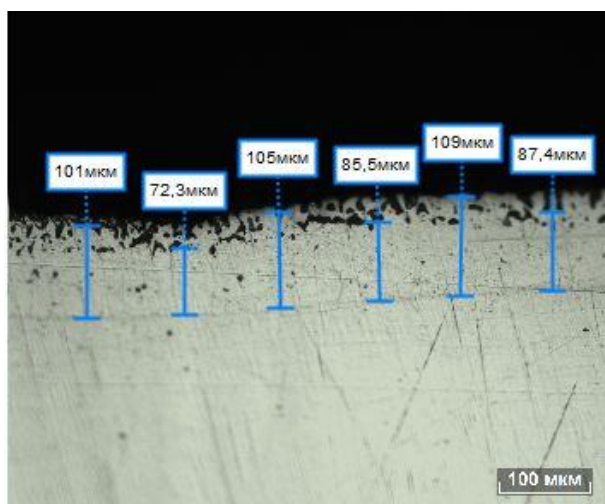
Термодиффузионная обработка проводилась в муфельной печи ЭП-6/12 при 1000 °С. Образцы выдерживались в течение 6, 8 и 10 часов. После обработки они очищались, шлифовались и полировались [5].

Измерения толщины силицированного слоя проводились на микроскопе Axio Scope.A1 (Carl Zeiss) с использованием Thixomet Pro при увеличении 100×, 200× и 500×. Оценка проводилась по пяти точкам в каждой зоне: валик шва, корень шва, зона термического влияния (внутри и снаружи) [5].

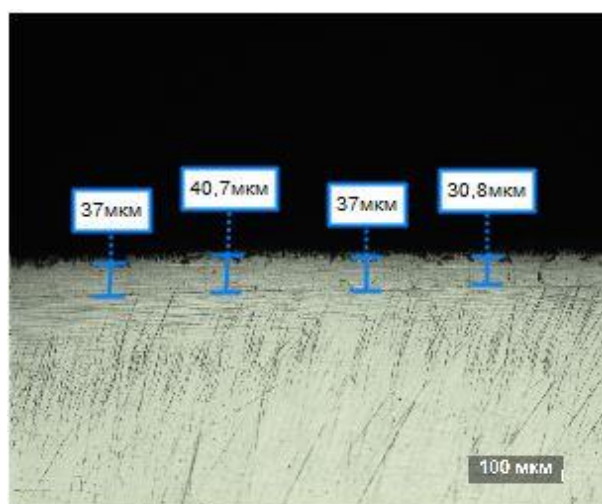
Образцы, обработанные 6 часов, не имели защитного слоя. При 8-часовой обработке фиксировалась максимальная толщина слоя, особенно в зоне термического влияния с внутренней стороны (до 109 мкм). Увеличение времени до 10 часов приводило к снижению толщины во всех зонах (табл. 1).

Таблица 1 – Толщина силицированного слоя, мкм

Зона	8 ч	10 ч
Валик шва (наружная поверхность)	30,8–40,7	15,5–23,0
Корень шва (внутренняя поверхность)	72,3–78,0	10,2–17,5
ЗТВ (наружная сторона)	41,1–49,7	15,4–20,2
ЗТВ (внутренняя сторона)	72,3–109,0	27,1–30,4



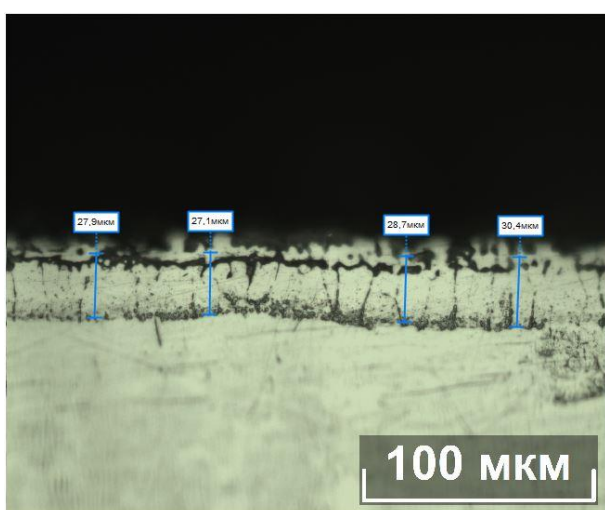
а)



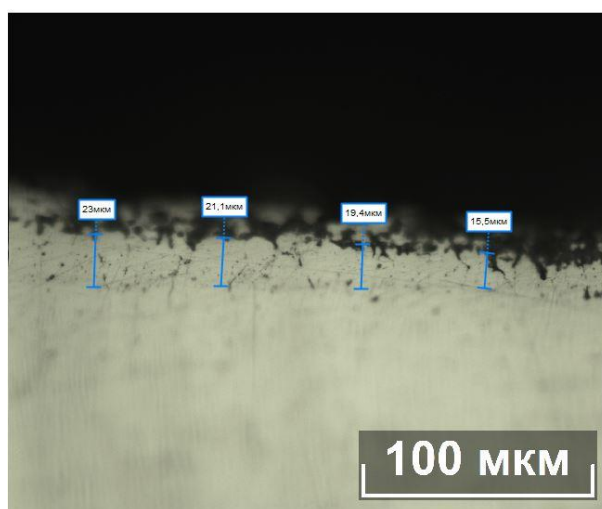
б)

а) зона термического влияния (внутренняя поверхность),
б) поперечное сечение валика сварного шва.

Рисунок 2 – Образец, выдержанный при температуре 1000 °С
в течении 8 часов



а)



б)

а) зона термического влияния при нагревании 10 часов,
б) поверхность валика сварного шва при нагревании 10 часов

Рисунок 3 – Фото участков с силицированными слоями в зоне сварного шва фрагмента змеевика реакционной печи

Такое поведение свидетельствует о переходе процесса в стадию ограниченного массопереноса. Уплотнение слоя, снижение его проницаемости и возможное образование пассивных фаз препятствуют поступлению активных компонентов к подложке [6]. В пределах исследованных условий оптимальной

является выдержка 8 часов, обеспечивающая равномерное и протяжённое покрытие (рисунки 4-7) [5].

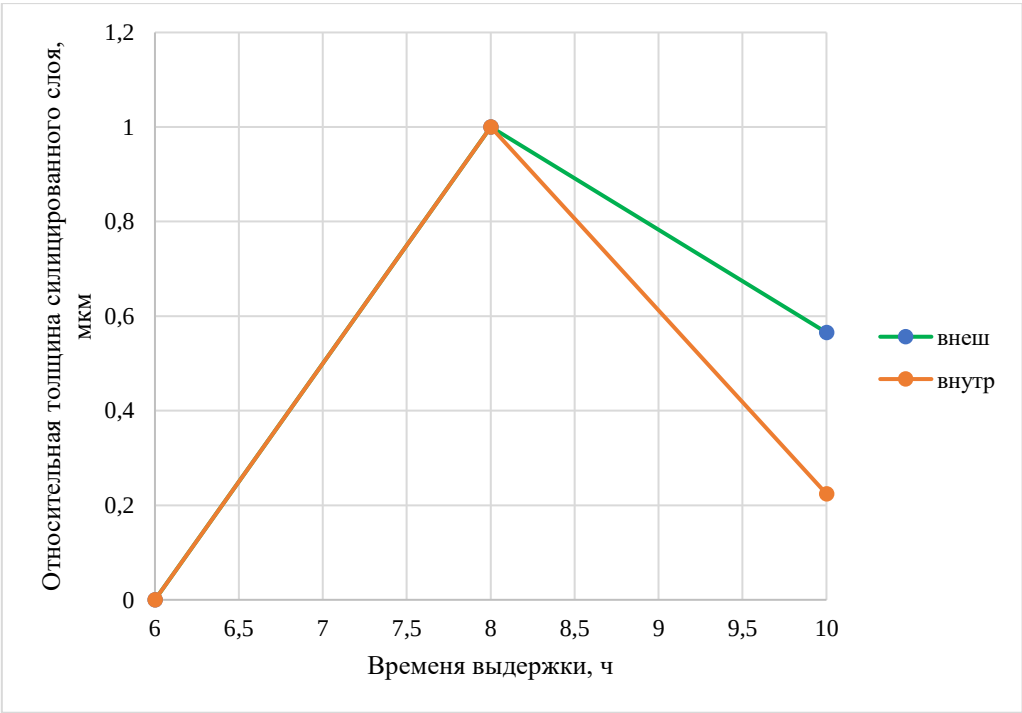


Рисунок 4 – Наибольшая толщина силицированного слоя на поверхности сварного шва

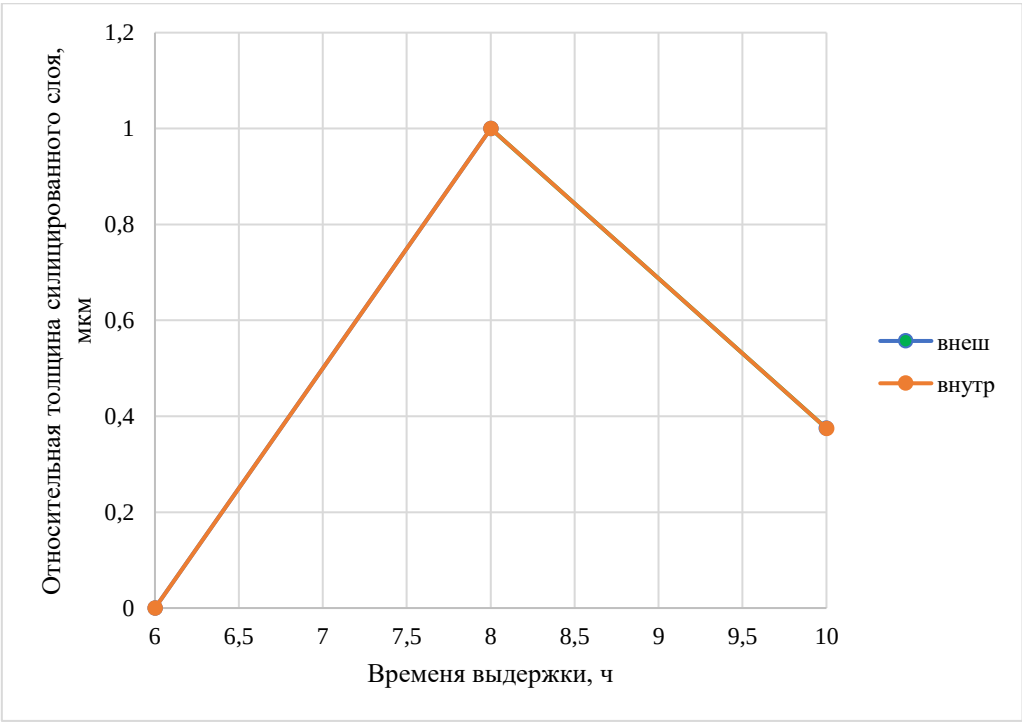


Рисунок 5 – Наименьшая толщина силицированного слоя на поверхности сварного шва

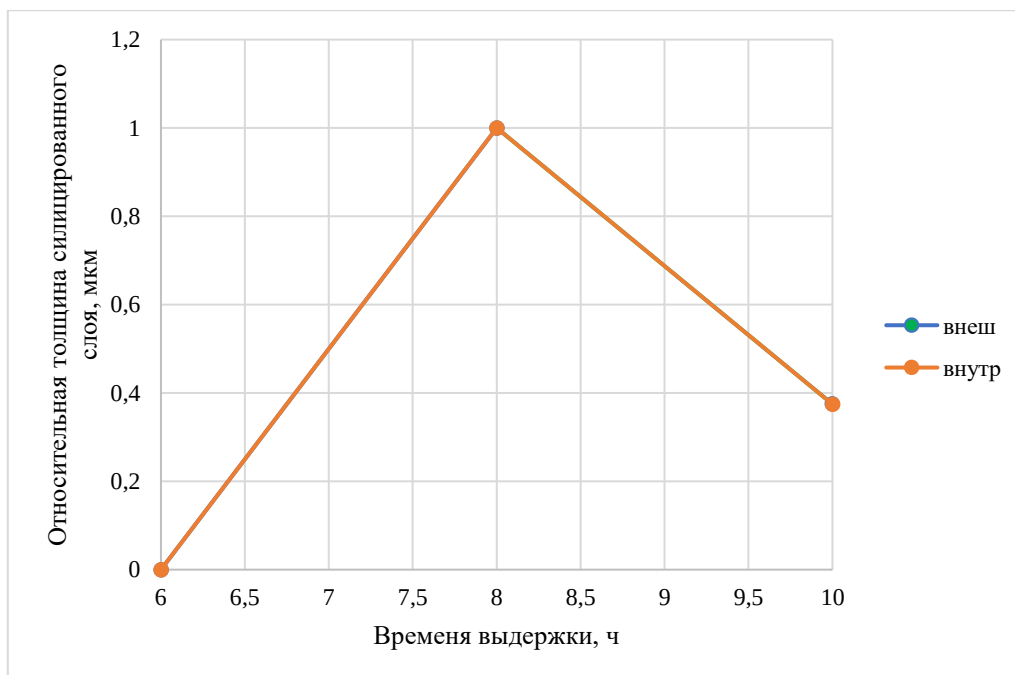


Рисунок 6 – Наибольшая толщина силицированного слоя на поверхности зоны термического влияния

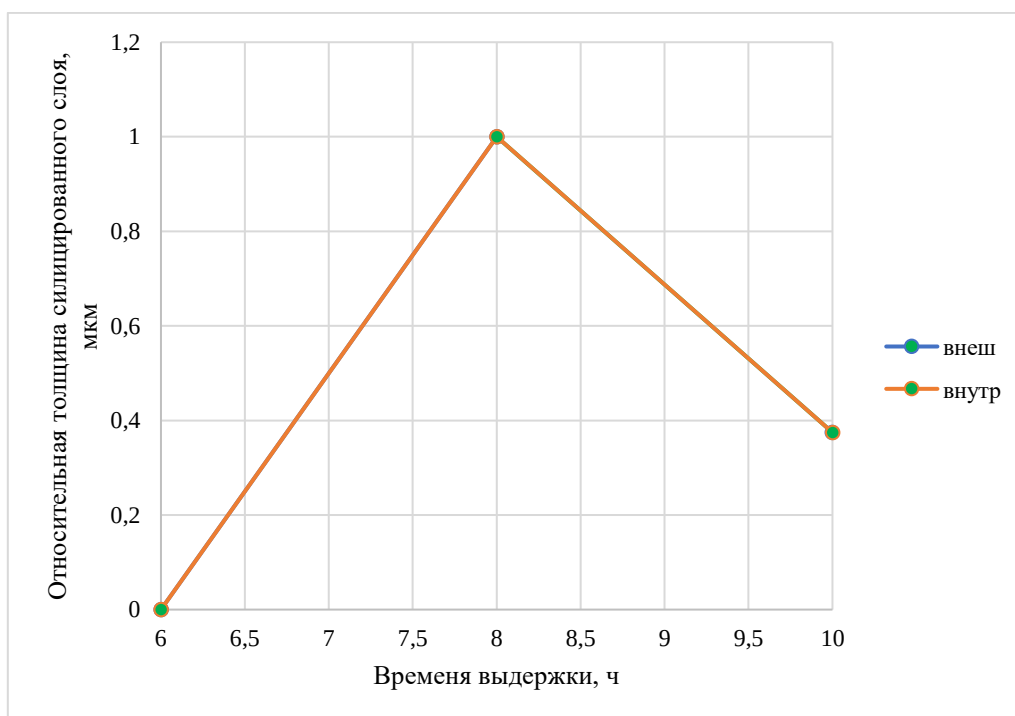


Рисунок 7 – Наименьшая толщина силицированного слоя на поверхности зоны термического влияния

Проведённое исследование подтвердило эффективность термодиффузионного силицирования в качестве способа формирования защитного покрытия на сварных соединениях змеевиков реакционной печи из стали 10Х23Н18. Установлено, что начало образования силицированного слоя происходит при выдержке не менее 8 часов при температуре 1000 °С. При этом

наибольшая толщина слоя достигается именно при такой продолжительности обработки: в зоне термического влияния с внутренней стороны трубы она составляет до 109 мкм. При увеличении времени термообработки до 10 часов наблюдается снижение толщины слоя во всех зонах, включая валик шва, корень и прилегающие участки основного металла.

Выявленная особенность объясняется переходом процесса в стадию ограниченного массопереноса, обусловленного уплотнением структуры силицированного слоя и снижением его проницаемости для активных компонентов кремнийсодержащей среды. Таким образом, в рамках изученных условий выдержка 8 часов может быть рекомендована в качестве оптимального режима термодиффузионной обработки, обеспечивающего формирование равномерного и достаточного по толщине защитного покрытия.

Список использованной литературы

1. Rubtsov, A. V. Features of siliconizing of pipe steel X12CrNi25-20 with various term of operation in the conditions of the reactionary furnace / A. V. Rubtsov, D. N. Shermatov, B. S. Seitzhaparov, U. Yu. Strokina, D. L. Konkova // Journal of Physics: Conference Series. III International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III-2022). Krasnoyarsk. – 2022. – С. 32001.
2. Lemeshko, N. V. Features of silicon saturation of austenite pipe steel samples with different operating time / N. V. Lemeshko, A. V. Rubtsov, J. N. Shermatov, S. V. Chertovskikh, R. M. Tazetdinov // E3S Web of Conferences 548 (AGRITECH-X 2024). – 2024. – С. 05002.
3. Шерматов, Д. Н. Изменение скорости распространения ультразвуковых волн в материале змеевика реакционной печи в процессе эксплуатации / Д. Н. Шерматов, Е. А. Наумкин, И. Р. Кузеев, А. В. Рубцов // Нефтегазовое дело. – 2019. – Т. 17. – № 5. – С. 81-88.
4. Tazetdinov, R. M. Production of silicon-based thermodiffusion layer in tube furnace coil weld after long-term operation / R. M. Tazetdinov, A. V. Rubtsov, J. N. Shermatov, S. V. Chertovskikh, N. V. Lemeshko // EPJ Web of Conferences (AAPM-III 2025). – 2025. – С. 01007.
5. Тазетдинов, Р. М. Науглероживание поверхностного слоя сварного шва и основного металла змеевиков реакционных печей и предлагаемый метод защиты / Р. М. Тазетдинов, А. В. Рубцов, Д. Н. Шерматов, Е. А. Наумкин // Актуальные проблемы науки и техники. Сборник материалов конференции. – 2023. – Т. 2. – С. 81-83.
6. Paul, A. Diffusion-Controlled Growth and Microstructural Evolution of Aluminide Coatings on Superalloys and Steel. // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2017. – Vol. 38, No. 4. – P. 419–437. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/DF.13.167.

OPTIMIZATION OF THERMODIFFUSION SILICIDING MODE OF WELDED JOINTS OF REACTION FURNACE COILS MADE OF 10X23N18 STEEL

Shermatov N. Dzhamshed, candidate of technical sciences

Tazetdinov M. Ruslan, postgraduate student, 1st year

Khisamov Kh. Mars, associate professor

Ufa State Petroleum Technological University

Abstract. *The paper presents the results of a study of thermal diffusion siliconizing of welded joints of reaction furnace coils made of heat-resistant steel 10X23N18. The studies were conducted at a temperature of 1000°C with different holding times. It was found that a thermal diffusion protective layer based on silicon begins to form when held for at least 8 hours. The greatest coating thickness (up to 109 μm) was recorded in the heat-affected zone on the inner side of the pipe. With an increase in time to 10 hours, a decrease in the thickness of the siliconized layer was recorded in all studied zones. This effect is interpreted as a result of changes in the diffusion conditions of silicon: as the structure of the formed layer is compacted, its ability to further saturation decreases, which limits the growth of the protective coating. An optimal siliconizing mode is identified that provides an effective protective coating without wasting time and resources.*

Key words: *thermal diffusion siliconizing, weld seam, reaction furnace coil, austenitic steel, protective layer, holding time, thickness measurement.*



СЕКЦИЯ 4

«ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИНЖЕНЕРНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ»

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Богодухова Ангелина Сергеевна, студент специалитета, 2 курс
Ишмуратов Ильмир Ринатович, студент магистратуры, 1 курс

Оренбургский государственный университет

Аннотация. В статье представлена методология проектирования интеллектуальной системы поддержки решений (ИСПР) для прогнозирования отказов оборудования на промышленных предприятиях. Описывается архитектура системы, включающая ключевой компонент – функцию прогнозирования отказов, смоделированную с использованием методологии IDEF0. Рассматриваются входные данные, управляющие воздействия, механизмы реализации и выходные параметры системы, интегрирующей данные датчиков, SCADA и ERP систем.

Ключевые слова: интеллектуальная система поддержки решений, прогнозирование отказов, техническое обслуживание, промышленные предприятия, прогнозная аналитика, IDEF0.

Код и рубрика: 50.00.00 Автоматика. Вычислительная техника.

Современные промышленные предприятия нуждаются в оптимизации процессов технического обслуживания оборудования, поскольку традиционные методы демонстрируют низкую эффективность. В новых условиях актуальны системы, способные точно прогнозировать выход оборудования из строя. Исследование предлагает метод создания интеллектуальных систем, объединяющий данные сенсоров, архивные записи ремонтов и корпоративную информацию [1, 2].

Современные алгоритмы позволяют выявлять скрытые взаимосвязи в работе оборудования и оценивать его остаточный срок службы. Методология IDEF0 используется для формализации процессов прогнозирования и принятия решений. Этот подход обеспечивает целостное представление о структуре системы и взаимозависимостях ее элементов. Результаты исследования могут повысить эффективность управления техническим обслуживанием на промышленных предприятиях.

Разработанное решение обладает уникальной гибкостью, позволяя адаптироваться к различным видам промышленного оборудования и специфическим условиям его эксплуатации. Эффективность предложенных методов подтверждена в ходе испытаний на действующих производственных площадках. Реализация системы дает возможность сократить расходы на ТО за счет перехода от плановых регламентных работ к обслуживанию по фактическому состоянию [3].

В работе анализируются принципы построения системы и ее интеграции в производственную среду. Особое внимание уделено сравнению эффективности вычислительных алгоритмов для прогнозирования неисправностей оборудования. Основная функция системы (ИСПР) обрабатывает данные от датчиков, SCADA, ERP-систем и производственных регламентов. Управляющими факторами выступают стандарты обслуживания, нормативные требования и внутренние регламенты предприятия. Реализация функции обеспечивается модулями интеллектуального анализа данных и взаимодействием с техническим персоналом [4].

Результатом работы системы являются рекомендации по ремонту, замене компонентов или корректировке графика обслуживания. Предложенный подход позволяет повысить точность планирования технического обслуживания промышленного оборудования.

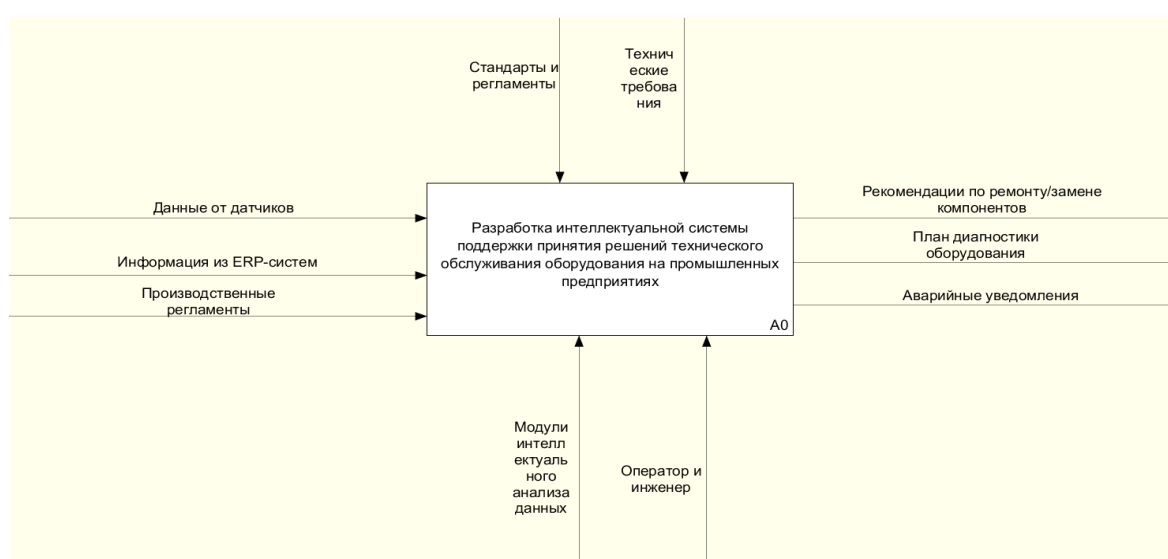


Рисунок 1 – Функциональная модель интеллектуальной системы прогнозирования отказов

Функция прогнозирования отказов оборудования является ключевым элементом интеллектуальной системы поддержки решений, предотвращая критические поломки за счет своевременного планирования ТО. Она обрабатывает данные датчиков (вибрация, температура, давление), историю ремонтов и параметры эксплуатационных режимов. Управление функцией осуществляется через диагностические регламенты, модели ресурса оборудования и нормативные требования. Для реализации используются алгоритмы машинного обучения, системы прогнозной аналитики и экспертные базы знаний. Результатом работы функции становится прогноз вероятности отказов конкретных узлов с указанием временных интервалов.

Система формирует рекомендации по необходимым действиям: диагностике, обслуживанию или замене компонентов. Эти данные поступают в подсистему планирования, позволяя принимать обоснованные решения для повышения надежности и снижения эксплуатационных затрат.

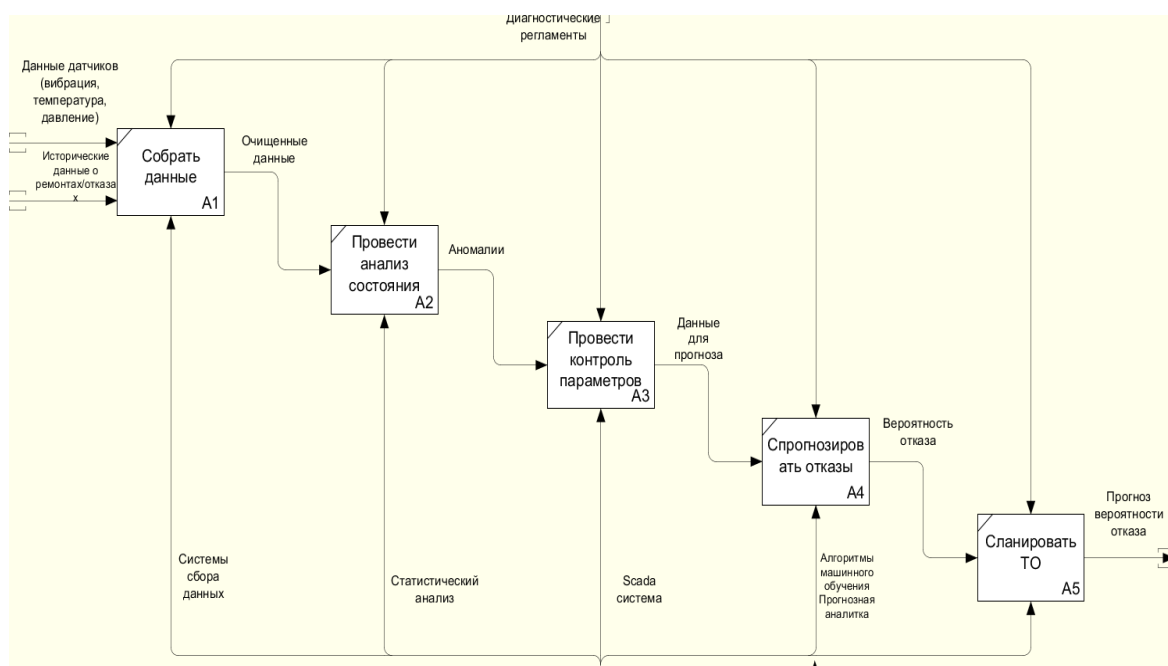


Рисунок 2 – Диаграмма декомпозиции «Прогнозирование отказов»

Функция прогнозирования отказов моделируется в рамках IDEF0 с учетом всех взаимодействующих элементов, что позволяет обеспечить целостность модели, выявить критические зависимости и интегрировать её в общую архитектуру интеллектуальной системы технического обслуживания.

Методология проектирования интеллектуальной системы поддержки решений (ИСПР) направлена на прогнозирование отказов оборудования, сокращение простоев и оптимизацию затрат на техническое обслуживание. Она основана на анализе больших данных, выявлении скрытых закономерностей и применении алгоритмов машинного обучения для точного предсказания сбоев. Использование методологии IDEF0 обеспечивает системный подход, выявляя взаимосвязи между элементами и оптимизируя их взаимодействие. Внедрение ИСПР повышает надежность оборудования за счет раннего обнаружения неисправностей и профилактического обслуживания, а также снижает затраты за счет оптимизации графиков и ресурсов [5].

Система сокращает простои, улучшает планирование и распределение ресурсов благодаря прогнозам отказов. Для успешной реализации требуется анализ специфики оборудования, выбор подходящих алгоритмов и интеграция с существующими системами. Несмотря на сложность внедрения, методология является эффективным инструментом повышения конкурентоспособности промышленных предприятий.

Список использованной литературы

1. Архапчева, М. В. Интеллектуальная система поддержки принятия решений в управлении производственными ресурсам [Электронный ресурс] / М. В. Архапчева, С. С. Акимов, В. А. Трипкош // Инновационное развитие

современной науки: новые подходы и актуальные исследования (ШИФР - МКИРСН) : сб. материалов XI Междунар.науч.-практ. конф., Москва, 09 дек. 2024 г. – М.: Центр развития образования и науки. – 2024. –С. 98-102. – 5 с.

2. Кузьмин В. В. Система прогнозирования отказов оборудования промышленных предприятий / В. В. Кузьмин, Д. С. Косов, А. Л. Новиков, А. В. Иващенко // 2015. – №3 (11). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-prognozirovaniya-otkazov-oborudovaniya-promyshlennyh-predpriyatiy> (дата обращения: 02.06.2025).

3. Шаханов, Н. И. Прогнозирование отказов оборудования в условиях малого количества поломок / Н. И. Шаханов, И. А. Варфоломеев, Е. В. Ершов, О. В. Юдина // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2016. №6 (75). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-otkazov-oborudovaniya-v-usloviyah-malogo-kolichestva-polomok> (дата обращения: 02.06.2025).

4. Кизим, А. В. Обоснование необходимости автоматизации работ по ремонту и техническому обслуживанию оборудования / А. В. Кизим // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2009. – № 6(54). – С. 118-121. – EDN KUАНVV.

5. Архапчева, М. В. Основные факторы обеспечения надежности оборудования на промышленном предприятии [Электронный ресурс] / М. В. Архапчева, Н. А. Бочарова // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии : материалы XI Всерос. конф., Оренбург, нояб. 2023 г. / Оренбург. гос. ун-т ; гл. ред. А. И. Сергеев. – Оренбург : ОГУ. – 2023. – С. 432-435. – 4 с.

METHODOLOGY FOR DESIGNING AN INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM FOR PREDICTING EQUIPMENT FAILURES AT INDUSTRIAL ENTERPRISES

Bogodukhova Angelina Sergeevna, specialist, 2nd year
Ishmuratov Ilmir Rinatovich, master's degree, 1st year

Orenburg State University

Abstract. *The article presents a methodology for designing an intelligent decision support system (ISPS) for predicting equipment failures at industrial enterprises. The system architecture is described, including a key component - the failure prediction function, modeled using the IDEF0 methodology. Input data, control actions, implementation mechanisms and output parameters of the system integrating sensor data, SCADA and ERP systems are considered.*

Keywords: *intelligent decision support system, failure prediction, maintenance, industrial enterprises, predictive analytics, IDEF0.*

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА БАЗЕ КАРТЫ ПОТОКА СОЗДАНИЯ ЦЕННОСТИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

**Жумашева Бибигуль Капуовна, старший преподаватель
Сафонова Мария Владимировна, бакалавриат 1 курс**

Оренбургский государственный университет

Аннотация. *Статья посвящена разработке системы поддержки принятия решений (СППР) на базе карты потока создания ценности (КПСЦ) для промышленных предприятий. Рассматривается подход к интеграции традиционного Lean-инструментария с современными цифровыми технологиями, включая IoT, аналитику данных и предиктивную аналитику. Использование КПСЦ в качестве основы для СППР позволяет предприятиям перейти от ручного анализа к автоматизированному управлению производственными потоками, повышая эффективность и снижая затраты.*

Ключевые слова: *СППР, КПСЦ, бережливое производство, цифровизация, IoT.*

Код и рубрика: *50.00.00 Автоматика. Вычислительная техника.*

Карта потока создания ценности (КПСЦ) – ключевой инструмент бережливого производства, который визуализирует материальные и информационные потоки предприятия.

Обзор литературы по применению карт потока создания ценностей (КПСЦ) в российском контексте за последние пять лет показывает рост интереса к внедрению бережливого производства и оптимизации процессов в различных отраслях экономики [1]. Согласно анализу публикаций в российских журналах, практическое применение КПСЦ сосредоточено на промышленном производстве, логистике и сервисных сферах [2].

Некоторые исследования подчеркивают эффективность использования КПСЦ для выявления узких мест в производственных цепочках, что способствует снижению затрат и повышению эффективности. В частности, в статье [3] рассматривается методика адаптации классической карты потока создания ценностей под условия российских предприятий с учетом специфики российского рынка и культурных особенностей. Также отмечается важность внедрения систем автоматизации и информационных технологий для повышения точности и полноты карт.

Еще одним аспектом является исследование кейсов российских предприятий, успешно внедривших КПСЦ, что демонстрирует возможность значимых улучшений при правильной адаптации методики. Кроме того, представители бизнеса подчеркивают необходимость обучения и развития кадрового потенциала для эффективного применения карт потока [4].

Ключевыми тенденциями являются внедрение КПСЦ в малом и среднем бизнесе, а также в государственных организациях, где автоматизация и

цифровизация процессов требуют новых подходов к анализу потоков создания ценностей. В целом, исследования подтверждают эффективность инструментов КПСЦ в повышении конкурентоспособности и эффективности предприятий при реализации локальных условий и вызовов [5].

Интеграция КПСЦ в систему поддержки принятия решений (СППР) позволяет перевести статичную карту в динамический цифровой инструмент для анализа и оптимизации процессов в реальном времени.

Классическая КПСЦ включает следующие этапы:

- этапы обработки сырья/продукта;
- время цикла и простоев;
- потоки информации между отделами.

Цифровая КПСЦ в СППР может добавить следующие основные элементы:

- датчики IoT, с целью фиксации времени, процента брака и простоев;
- интеграцию с ERP/MES для актуальных данных о заказах и запасах;
- динамическое обновление (например, автоматическое выделение «узких мест» на карте при росте времени обработки).

Архитектура СППР с цифровой КПСЦ имеет следующий вид (рисунок 1).

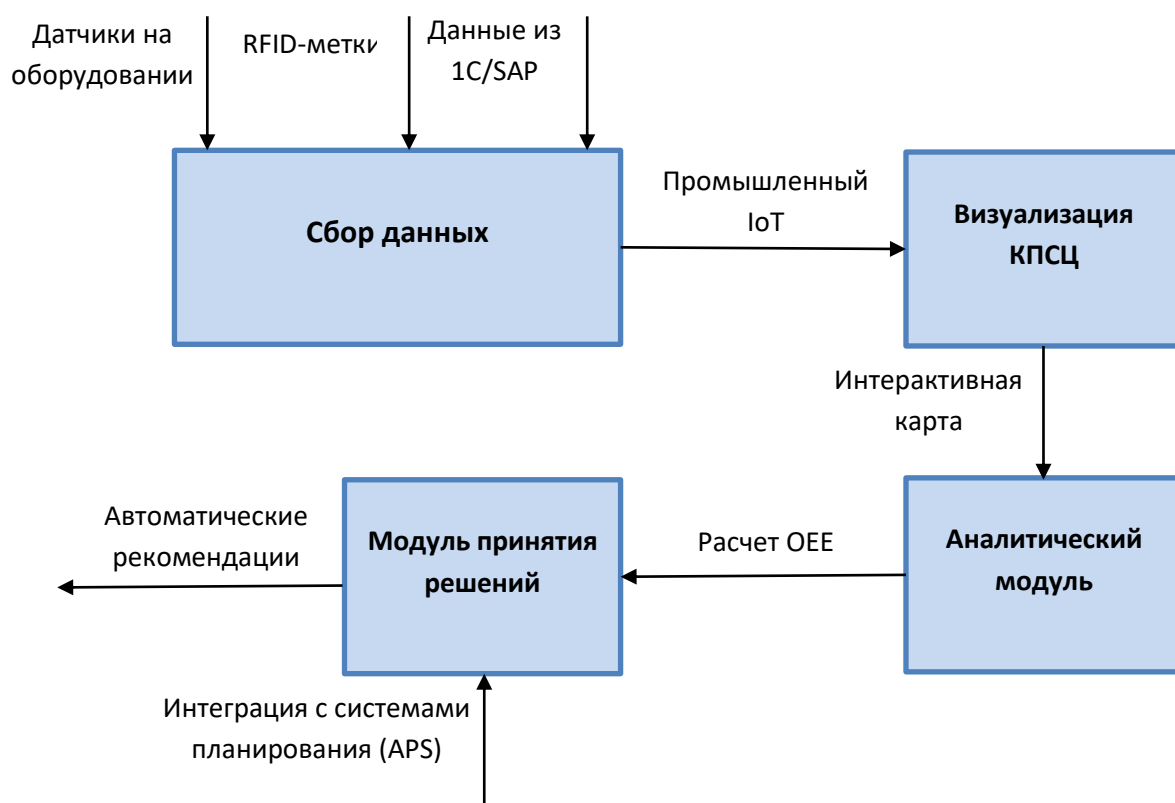


Рисунок 1 – Архитектура СППР с цифровой КПСЦ

Представленная архитектура предполагает интеграцию различных модулей и технологических компонентов, обеспечивающих сбор, обработку и анализ данных в реальном времени. Основные элементы включают базы данных, аналитические модули, интерфейсы взаимодействия и системы обработки информации, все объединённые в единую цифровую платформу. Это позволяет

повысить скорость и качество принятия решений, а также обеспечить большую гибкость и масштабируемость системы.

В результате внедрения такой архитектуры организация получает эффективный инструмент для поддержки управленческих решений, основанный на актуальных данных и автоматизированных процессах. Важно отметить, что успешная реализация требует продуманного моделирования процессов и интеграции с существующими информационными системами организации.

Завершающим этапом является разработка прототипа системы поддержки принятия решений, которая включала бы в себя рекомендации определенных шагов, определенные в результате выполнения последовательного анализа производства с точки зрения процессного подхода.

С целью реализации прототипа СППР на основе карт потоков разработана UML-диаграмма компонентов, согласно которой СППР использует динамически подключаемую библиотеку DLL, включает в себя базу данных о производственных потоках и обращается к системе ERP предприятия с целью внедрения решений в производственный процесс.

UML-диаграмма компонентов разрабатываемой системы поддержки принятия решений приведена на рисунке 2.

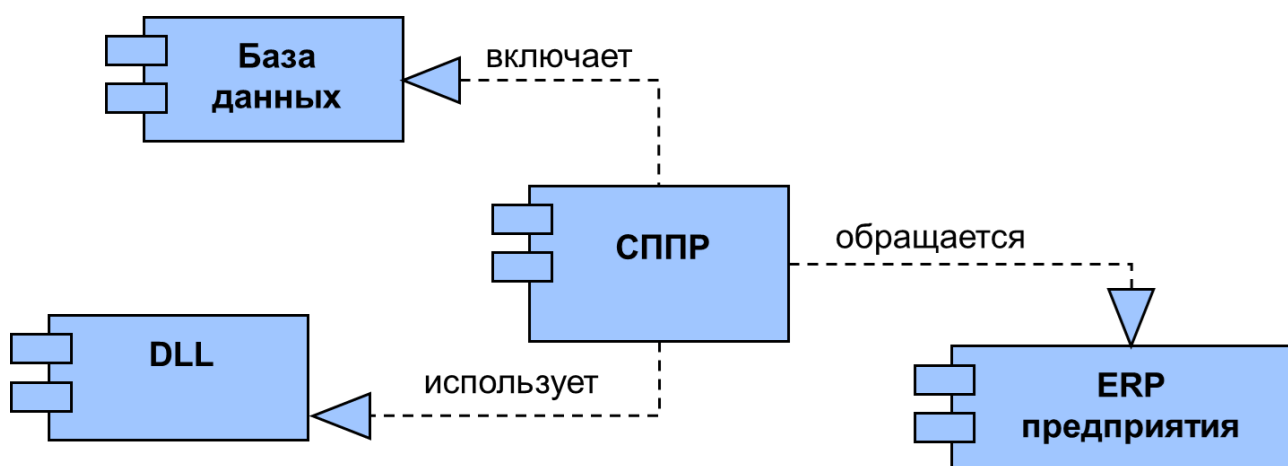


Рисунок 2 – UML-диаграмма компонентов разрабатываемой системы поддержки принятия решений

Таким образом, для реализуемого прототипа СППР разработана UML-диаграмма компонентов, состоящую из БД, DLL и ERP предприятия; применение данной диаграммы позволяет понять источники информации для работы создаваемой СППР.

Список использованной литературы

1. Гуньков, С. А. Построение карты потока создания ценностей в системе бережливого производства предприятия / С. А. Гуньков, С. С. Акимов //

Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всероссийской научно-методической конференции, Оренбург, 31 января – 02 февраля 2018 года / Министерство образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет». – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2018. – С. 654-657.

2. Акимов, С. С. Минимизация временных потерь на производстве при построении карт потока создания ценности / С. С. Акимов, Б. К. Жумашева // Научно-технический вестник Поволжья. – 2021. – № 6. – С. 83-85.

3. Акимов, С. С. Построение карт потока создания ценности на основе онтологического подхода / С. С. Акимов, Б. К. Жумашева // Онтология проектирования. – 2022. – Т. 12, № 3(45). – С. 405-417.

4. Жумашева, Б. К. Развитие и применение карт потока создания ценностей / Б. К. Жумашева, С. С. Акимов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 44. – С. 118-150.

5. Трипкош, В. А. Применение инструментов бережливого производства на основе байесовского алгоритма распознавания / В. А. Трипкош, С. С. Акимов // Современные наукоемкие технологии. – 2023. – № 3. – С. 40-44.

DEVELOPMENT OF A DECISION SUPPORT SYSTEM BASED ON A VALUE STREAM MAP FOR AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

Zhumasheva Bibigul Kapuovna, senior teacher
Safonova Maria Vladimirovna, bachelor's degree 1st year

Orenburg State University, Orenburg

Annotation. *The article is devoted to the development of a decision support system (DSS) based on a value stream map (VSM) for industrial enterprises. The approach to integrating traditional Lean tools with modern digital technologies, including IoT, data analytics, and predictive analytics, is considered. Using VSM as a basis for DSS allows enterprises to move from manual analysis to automated management of production flows, increasing efficiency and reducing costs.*

Keywords: *DSS, VSM, lean manufacturing, digitalization, IoT.*

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ

Воропаева Полина Владимировна, Инсебаева Алина Мухамбеткалиевна,
студенты бакалавриата, 2 курс

Пояркова Екатерина Васильевна, доктор техн. наук, доцент, заведующий
кафедрой механики материалов, конструкций и машин

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

Аннотация: Современные технологии играют решающую роль в архитектурном проектировании, значительно повышая эффективность и взаимодействие участников процесса. В статье представлены ключевые сферы применения цифровых инструментов в разработке зданий.

В работе рассматривается роль инноваций в проектировании и строительстве высотных зданий, анализируется применение современных технологий и материалов, таких как композиты, автоматизация и цифровое моделирование, для повышения устойчивости, безопасности и эффективности строительных процессов. Приводятся примеры успешного внедрения и обсуждаются перспективы развития отрасли в направлении устойчивого и энергоэффективного строительства.

Ключевые слова: строительство, проектирование, высотные здания, искусственный интеллект, BIM-моделирование, сейсмостойкость, безопасность, строительные материалы

Код и рубрика: 67.01.00 Общие вопросы строительства.

Строительство высотных зданий – это самый сложный инженерный вызов, требующий переосмысления традиционных подходов к проектированию и строительству. Просто увеличение масштаба низкоэтажной постройки не работает. Необходимо принципиально новый подход, учитывающий специфику высотных сооружений на всех этапах, от концепции до эксплуатации. Это означает совершенствование строительных технологий, оптимизацию логистических цепочек, ведь доставка материалов и оборудования на большую высоту – задача непростая и дорогостоящая. Более того, современные экологические требования предъявляют к высоткам особые жесткие условия.

Современные методы проектирования высотных зданий существенно изменили подход к архитектуре и строительству. Одним из основных инструментов в этой области является BIM (моделирование информации о здании), который позволяет создавать цифровые модели, содержащие всю необходимую информацию о проекте [1].

История возникновения BIM (Building Information Modeling) началась в конце 20-го века, когда появились первые идеи о цифровом моделировании строительных объектов. В 1980-х годах начали разрабатываться первые программные продукты, позволяющие создавать цифровые модели зданий. В

1990-х годах термин «Building Information Model» стал широко использоваться, а программные системы, такие как ArchiCAD (созданный в 1984 году) и Autodesk Revit (выпущенный в 2000 году), способствовали развитию техно-логии [2]. BIM приобрел популярность благодаря возможностям совместной работы, точности информации и автоматизации процессов проектирования, строительства и эксплуатации зданий. Сегодня BIM – это стандартный инструмент в архитектуре, инженерии и строительстве, повышающий эффективность и качество проектов. Характеристики BIM-технологий представлены в таблице 1, а примеры применения BIM-технологий в различных странах представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Характеристика BIM-технологий

Основная характеристика	Пояснение
Целостность данных	BIM обеспечивает интеграцию информации о проекте на всех этапах – от начального дизайна до эксплуатации
Координация команд	Разные специалисты (архитекторы, инженеры, строители) могут совместно работать над одной моделью, что уменьшает вероятность ошибок и улучшает взаимодействие
Симуляция и анализ	Возможность проводить анализ энергопотребления, освещения и других параметров на стадии проектирования
Управление жизненным циклом	BIM способствует управлению зданием на протяжении всего его жизненного цикла, включая техническое обслуживание и реконструкцию

Таблица 2 – Применение BIM-технологий (примеры)

Страна	Организация (компания)	Решения/применение
Сингапур	TÜV SÜD PSB, SGS Singapore, Aptiv8 IT Solutions Pte Ltd	Введено обязательное использование BIM для всех государственных строительных проектов, что способствует улучшению качества и снижению расходов
США	Skanska; Turner Construction	Многие крупные строительные и архитектурные компании используют BIM для управления проектами, например Turner Construction управляет центром обработки данных конфиденциальных клиентов в Джохор-Бару
Россия	«Гипроруда»	Источниками данных для 3D-макетов стали программные продукты AutoCAD, AutoCAD Civil 3D, AutoCAD Revit, Robur, а также ПО Micromine, специализированное решение 3D САПР «Карьер» разработки Института «Гипроруда» и другое ПО, используемое субподрядчиками института

Продолжение таблицы 2

Россия	Строительная компания «ПИК»	Компания «ПИК» использует технологию BIM (информационное моделирование зданий) для оптимизации процессов проектирования и контроля в строительстве. В 2024 году ПИК представил линейку продуктов BIMTeam, включающую платформу для работы с библиотеками BIM-компонентов, САПР и т.д.

В 2019 году в России была утверждена концепция цифровой экономики, в рамках которой предусмотрено развитие BIM-технологий. Одной из задач является интеграция BIM в государственные строительные проекты.

Многие ведущие проектные компании, такие как «Стройгазмонтаж» и «Институт Гипроречтранс», начали применять BIM для создания комплексных моделей зданий и сооружений.

Крупные строительные компании, такие как «Мостотрест» и «Сибур», внедряют BIM для оптимизации строительных процессов, что позволяет сократить сроки выполнения работ и улучшить качество. Программное обеспечение для BIM представлены ниже, в таблице 3.

Данная таблица представляет сравнительный анализ ключевых программных продуктов, применяемых в области BIM-технологий для проектирования высотных зданий. Каждый из рассмотренных инструментов обладает уникальными преимуществами, способствующими повышению эффективности и качества проектной документации: Autodesk Revit выделяется широкой функциональностью и поддержкой командной работы, Graphisoft ArchiCAD предлагает интуитивно понятный интерфейс и русифицированную среду, а NanoCAD отличается доступностью и адаптацией под российские стандарты. Вместе с тем выявлены существенные ограничения, такие как высокая системная требовательность, ограниченное количество параметрических объектов и недостаточная развитость специализированных функций, что требует тщательного выбора программного обеспечения с учётом специфики проекта и ресурсов пользователя. Особое внимание уделено возможностям лицензирования, что является важным фактором для образовательных учреждений и организаций: наличие бесплатных или льготных студенческих версий способствует внедрению современных BIM-технологий в учебный процесс и профессиональную практику. Экспертная оценка подтверждает, что эффективное использование данных программных продуктов требует комплексного подхода, учитывающего как технические характеристики, так и организационные аспекты внедрения, что является ключевым условием успешного проектирования и строительства высотных зданий в современных условиях.

Таблица 3 – Примеры программного обеспечения BIM

Название	Преимущества	Недостатки	Возможности установки и лицензии для студентов и организаций
Autodesk Revit	✓ Один из ведущих продуктов для проектирования зданий и сооружений; ✓ Поддержка многопользовательской работы и совместной работы проектировщиков; ✓ Большая база семейств и библиотек элементов.	✓ Требует мощного процессора и большого объема ОЗУ; ✓ Доступен только для Windows, нет версии для MAC.	✓ Студенческая лицензия бесплатна на 3 года; ✓ Корпоративные лицензии с подпиской.
ArchiCAD	✓ Интуитивно понятная программа для архитекторов и проектировщиков; ✓ Русифицированная, подробная справочная система и учебные пособия; ✓ Поддержка IFC, открыт для междисциплинарного взаимодействия.	✓ Ограниченное количество параметрических объектов; ✓ Нет гибкой работы в инженерных сетях.	✓ Возможна установка для учебных учреждений с образовательной лицензией; ✓ Корпоративные лицензии с технической поддержкой
NanoCAD	✓ Российская CAD-система с поддержкой DWG, удобный интерфейс; ✓ Поддержка аннотирования и технической документации, регулярные обновления; ✓ Возможность использования скриптов для автоматизации работы.	✓ Ограниченный функционал по сравнению с профессиональными CAD-системами; ✓ Меньшее количество специализированных инструментов.	✓ Бесплатная базовая версия для студентов; ✓ Корпоративные лицензии с разными уровнями поддержки.

Современные строительные материалы играют важную роль в эволюции высотного строительства, обеспечивая не только прочность и долговечность сооружений, но и улучшая их эксплуатационные характеристики. Рассмотрим подробнее три категории современных материалов: композиты, легкие бетоны и стеклопластики, преимущества и недостатки которых представлены в таблице 4 [3].

Таблица 4 – Современные строительные материалы

Название материала	Преимущества	Применение
Композиты	✓ высокая прочность на сжатие и растяжение при малом весе; ✓ устойчивость к коррозии, что позволяет увеличить срок службы конструкций; ✓ гибкость в проектировании, возможность формирования сложных геометрических форм.	✓ в несущих элементах зданий, таких как балки и колонны; ✓ в фасадных системах и кровлях, обеспечивая тем самым легкость и эстетическую привлекательность здания.
Легкие бетоны	✓ уменьшение веса конструкций, что облегчает нагрузку на фундамент; ✓ экологичность и изготовление из переработанных материалов.	✓ в конструкциях стен, перекрытий и кровель; ✓ для создания легких перегородок и внутренних стен.
Стеклопластики	✓ высокая прочность и жесткость, обусловленные отличными механическими свойствами; ✓ устойчивость к воздействию окружающей среды; ✓ легкость и простота монтажа.	✓ используются в фасадах зданий, а также в конструкциях мостов и других инженерных сооружений; ✓ применяются для создания декоративных элементов и архитектурных форм.

Повышение безопасности и устойчивости высотных зданий к экстремальным погодным явлениям, таким как разрушительные землетрясения и ураганы, представляет собой одну из наиболее актуальных и сложных задач современного градостроительства. Рассмотрим подробнее основные методы и технологии, используемые в сейсмостойком и ветроустойчивом проектировании высотных зданий.

1. Сейсмостойкое проектирование (защита от землетрясений)

Сейсмостойкое проектирование – это комплексный подход, направленный на создание зданий, способных выдерживать значительные сейсмические нагрузки без обрушения или получения критических повреждений [6]. Эффективность этого подхода зависит от множества факторов, включая геологические особенности строительной площадки, характеристики грунта,

высоту здания и его архитектурные особенности. Ключевыми методами сейсмостойкого проектирования являются:

- арматурные системы повышенной прочности. Применение арматурных каркасов с увеличенным сечением, использованием высокопрочной стали и сложных пространственных конфигураций является основой обеспечения несущей способности здания при землетрясении. Особое внимание уделяется соединениям арматуры, которые должны обладать высокой надежностью и способностью воспринимать значительные усилия. Жесткие стены из железобетона, расположенные в стратегически важных местах, играют роль «стержней жесткости», препятствующих деформации здания. Проектирование таких стен требует тщательного анализа распределения напряжений и деформаций в конструкции под воздействием сейсмической нагрузки;

- сейсмические изоляторы. Данная технология представляет собой установку специальных устройств между фундаментом и надземной частью здания. Эти изоляторы, часто изготовленные из высокопрочной резины, тефлона или других материалов с высокой демпфирующей способностью, значительно уменьшают передачу сейсмических колебаний от грунта к зданию. Суть метода заключается в «развязке» здания от грунта, позволяя ему «плавно качаться» во время землетрясения, минимально воспринимая разрушительные колебания. Выбранный тип изолятора и его параметры зависят от многих факторов, включая характеристики грунта, интенсивность ожидаемых землетрясений и особенности конструкции здания.

2. Устойчивость к ураганам (противостояние сильным ветрам)

Защита высотных зданий от ураганного ветра требует применения специальных мер, направленных на снижение аэродинамического сопротивления и повышение прочности конструкции:

- жесткие каркасные системы. Надежность высотного здания при воздействии ураганного ветра во многом зависит от жесткости его каркаса. Применение высокопрочных стальных или железобетонных конструкций, обеспечивающих высокую жесткость и прочность, является неотъемлемой частью ветроустойчивого проектирования. Особое внимание уделяется соединениям элементов каркаса, которые должны обеспечивать надежное перераспределение нагрузок;

- усиление фасадов. Фасады высотных зданий являются слабым звеном при воздействии ураганного ветра. Для защиты фасадов используются прочные материалы, способные выдерживать высокие нагрузки. Это могут быть специальные закаленные стекла, усиленные панели из композитных материалов или другие высокопрочные материалы. Крепление элементов фасада также должно быть высокопрочным и надежным, обеспечивающим их сохранность при значительных ветровых нагрузках.

Ниже представлены успешные примеры строительства и эксплуатации высотных зданий, демонстрирующие передовые решения в области безопасности и устойчивости, и проанализируем их влияние на мировую строительную индустрию.

В качестве примера рассмотрим башню «Восток» в Москве, один из небоскребов делового центра «Москва-Сити». Эта 373-метровая башня представляет собой впечатляющий образец современного российского высотного строительства. При ее проектировании особое внимание уделялось сейсмостойкости, учитывая сейсмическую активность региона. Использование высокопрочных бетонов и стальных конструкций позволило создать надежный и устойчивый каркас, способный выдерживать значительные нагрузки. Появление башни «Восток» стало важным этапом развития высотного строительства в России, задав новые стандарты проектирования и строительства, стимулируя внедрение инновационных технологий и материалов, и повышая общие требования к безопасности высотных зданий. Проект послужил катализатором для развития отечественных строительных компаний и привлечения иностранных инвестиций в данную область.

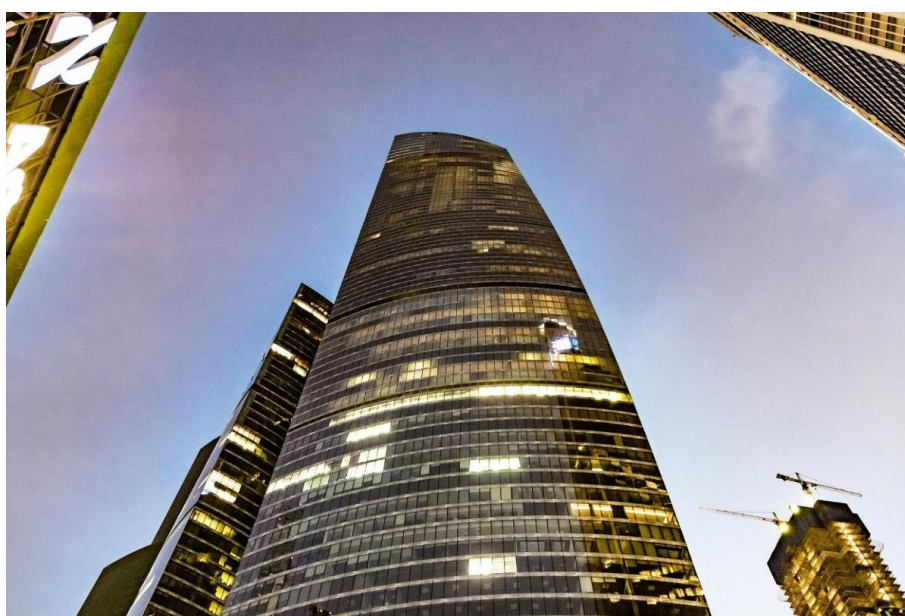


Рисунок 1 – Башня «Восток», г. Москва [7]

Вторым примером является Шанхайская башня, второй по высоте небоскреб в мире (632 метра). Этот проект демонстрирует впечатляющий уровень интеграции устойчивых технологий и инновационных решений в высотном строительстве. Уникальная спиралевидная форма башни, помимо эстетической привлекательности, играет важную роль в снижении ветровых нагрузок, что критически важно для столь высоких сооружений. Для обеспечения сейсмостойкости использовались передовые технологии, включая сейсмические изоляторы и демпферы, которые поглощают энергию сейсмических волн, защищая здание от разрушения. Шанхайская башня является образцом устойчивого строительства, демонстрируя эффективные системы отопления и вентиляции, а также использование солнечных панелей для выработки возобновляемой энергии. Опыт Китая в области высотного строительства, включая инновационные методы проектирования и

строительства, активно изучается и используется в других странах, способствуя развитию глобальных стандартов безопасности и устойчивости.

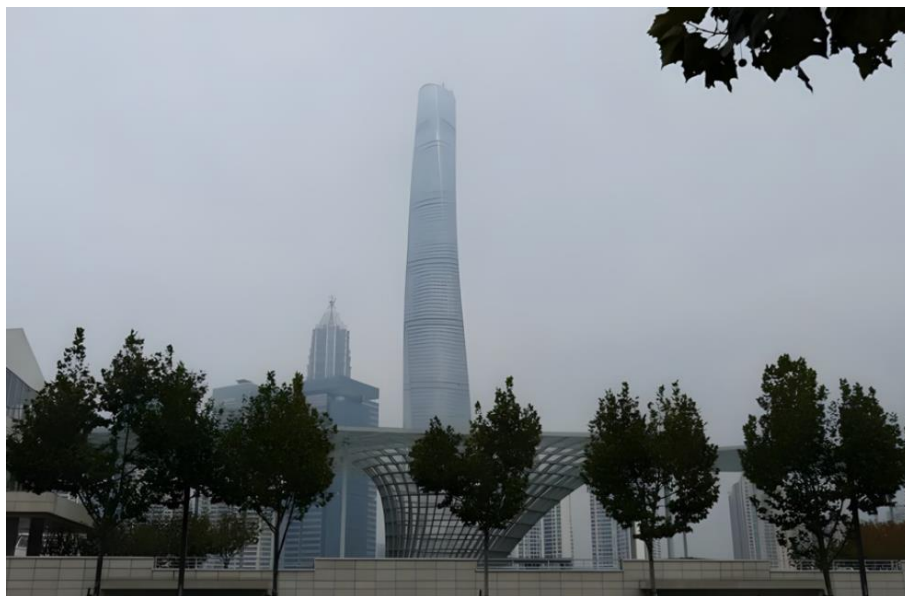


Рисунок 2 – Шанхайская башня, г. Шанхай [8]

В заключение, стоит отметить, что создание высотных сооружений в наши дни – задача комплексная, требующая применения передовых технологий и новейших материалов. В связи с повышением требований к надежности, экологичности и экономии энергии, проектировщики и строители должны внедрять революционные подходы, позволяющие возводить не только монументальные конструкции, но и безопасные, удобные и экологически безвредные здания. Современные направления в проектировании и строительстве высотных зданий открывают новые возможности для развития архитектуры и инженерной мысли. Они обязывают профессионалов непрерывно совершенствовать свои знания и приспосабливаться к технологическим новшествам и запросам социума, что, в конечном счете, приводит к формированию безопасной, долговечной и эстетически привлекательной городской среды.

Список использованной литературы

1. Газаров, А. Р. Преимущества использования искусственного интеллекта в сфере строительства [Электронный ресурс] / А. Р. Газаров // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2020. – Вып. 4. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/preimuschestva-ispolzovaniya-iskusstvennogo-intellekta-v-sfere-stroitelstva> (дата обращения 20.04.2025).
2. Шеина, С. Г. Исследование этапов развития BIM-технологий в мировой практике и России / С. Г. Шеина, К. С. Петров, А. А. Федоров // Строительство и

техногенная безопасность. – 2019. – № 14(66). – С. 7-14. – EDN QJNHWP (дата обращения 20.04.2025).

3. Кожаева, С. А. Углеволокно как композитный материал в строительстве / С. А. Кожаева // Вопросы устойчивого развития общества. – 2022. – № 8. – С. 1059-1062. – EDN UWZDUR (дата обращения 23.04.2025).

4. Веряскина, А. В. Перспективы применения легких высокопрочных бетонов в монолитном строительстве / А. В. Веряскина // Актуальная наука. – 2019. – № 4(21). – С. 19-23. – EDN JTJMYG (дата обращения 23.04.2025).

5. Хорхорина, Е. С. Применение стеклопластика в строительстве / Е. С. Хорхорина, А. С. Ляхова // Синергия Наук. – 2018. – № 21. – С. 541-546. – EDN YUDYSJ (дата обращения 25.04.2025).

6. Мкртычев, О. В. Расчет и проектирование сейсмостойких зданий / О. В. Мкртычев, М. И. Андреев, С. В. Булушев. – Москва : Издательство АСВ, 2023. – 214 с. – ISBN 978-5-4323-0485-8. – EDN ZUONXN.

7. МФК Башня Федерация Восток (Federation Tower East). – Режим доступа: <https://moscow-city.guide/towers/mfk-bashnya-federatsiya-vostok/?ysclid=mbfl1di096115587275> (Дата обращения 03.06.25)

8. Шанхайская башня – Режим доступа: https://www.votpusk.ru/article/attractions/kitai/shanghai/shanhaiskaya_bashnya-a (дата обращения 25.04.2025).

FEATURES OF THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF HIGH-RISE BUILDINGS: MODERN TECHNOLOGIES AND MATERIALS

Polina V. Voropaeva, Alina M. Insebaeva, undergraduate students, 2nd year
Ekaterina V. Poyarkova, Doctor of Technical Sciences, Associate
Professor, Head of the Department of Mechanics of Materials, Structures and
Machines

Orenburg State University

Abstract: *Modern technologies play a crucial role in architectural design, significantly increasing the efficiency and interaction of process participants. The article presents key areas of application of digital tools in building development. The paper examines the role of innovations in the design and construction of high-rise buildings, analyzes the use of modern technologies and materials, such as composites, automation and digital modeling, to improve the sustainability, safety and efficiency of construction processes. Examples of successful implementation are given and the prospects for the development of the industry in the direction of sustainable and energy-efficient construction are discussed..*

Keywords: *construction, design, high-rise buildings, artificial intelligence, BIM modeling, earthquake resistance, safety, building materials.*

РОЛЬ И ВЛИЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Архапчева Мария Владимировна, ассистент кафедры управления и
информатики в технических системах,
Лихацкий Андрей Дмитриевич, специалитет, 1 курс

Оренбургский государственный университет, Оренбург

Аннотация. В статье рассматривается роль информационных технологий в сфере промышленного производства. Раскрывается значение цифровизации как фактора повышения эффективности предприятий. Приведены примеры современных ИТ-систем (ERP, MES, PLM) и анализируется их влияние на производственные процессы. Описаны ключевые преимущества внедрения цифровых решений и основные вызовы, включая потребность в обучении персонала и обеспечение кибербезопасности. Работа выполнена на кафедре управления и информатики в технических системах, Оренбургский государственный университет под руководством Архапчевой Марии Владимировны, ассистента кафедры управления и информатики в технических системах.

Ключевые слова: информационные технологии, промышленное производство, цифровизация, ERP, MES, PLM, автоматизация

Код и рубрика: 50.00.00 Автоматика. Вычислительная техника.

Актуальность применения информационных технологий (ИТ) в промышленности обуславливает решение стратегических задач: повышение производительности, снижение себестоимости, оптимизация использования ресурсов и увеличение гибкости производственных процессов. Внедрение цифровых решений открывает предприятиям доступ к новым моделям управления, взаимодействие с клиентами и выход на новые рынки.

Целью исследования является анализ следствий применения ИТ в промышленности, выявление их в производственных процессах, а также систематизация основных вызовов, возникающих в условиях цифровой трансформации.

Научная новизна работы заключается в обобщении современного опыта использования ИТ в промышленной сфере. Практическая инновационность исследования заключается в возможности повышения эффективности производственной деятельности с учетом цифровых технологий.

Информационные технологии (ИТ) – процессы, методы поиска, сбора, хранения, обработки, предоставления, распространения информации и способы осуществления таких процессов и методов, приёмы, способы и методы применения средств вычислительной техники при выполнении функций сбора, хранения, обработки, передачи и использования данных; ресурсы, необходимые для сбора, обработки, хранения и распространения [1].

Отрасль информационных технологий занимается созданием, развитием и эксплуатацией информационных систем. Информационные технологии призваны, основываясь и рационально используя современные достижения в области компьютерной техники и иных высоких технологий, новейших средств коммуникации, программного обеспечения и практического опыта, решать задачи по эффективной организации информационного процесса для снижения затрат времени, труда, энергии и материальных ресурсов во всех сферах человеческой жизни и современного общества.

Информационные технологии быстро интегрируются, играя ключевую роль в сфере услуг, управления и производства. Все ресурсы компьютерной индустрии на данном этапе развития мирового сообщества направлены на автоматизацию традиционных экономических процессов. Активное применение электронных технологий, предусмотренных информационной экономикой, ведет к распределению и потреблению общественных благ, общественного производства в более доступной форме [2].

Процесс внедрения информационных технологий в сферу промышленного производства неизбежно сопряжён с рядом сложностей, которые необходимо учитывать ещё на этапе подготовки и реализации цифровых инициатив. Одной из наиболее значимых проблем выступает необходимость сопряжения новых ИТ-решений с уже функционирующими системами предприятия. Такая интеграция требует не только значительных технических ресурсов, но и тщательной организационной проработки. Ещё одним важным аспектом является подготовка кадров: персонал должен овладеть новыми цифровыми инструментами, а это предполагает обучение, что, в свою очередь, влечёт за собой временные и финансовые затраты.

Дополнительной сложностью становится рост угроз в области кибербезопасности. По мере увеличения объёмов цифровой информации и количества подключённых систем возрастает риск утечки данных и сбоев в производственных процессах. Хотя цифровая трансформация промышленности сулит значительные преимущества, её успешное внедрение зависит от решения ряда проблем. Ключевая из них – защита данных. Предприятиям необходимо разрабатывать гибкие стратегии информационной безопасности, адаптируя их под конкретные угрозы и технологические изменения [3, 5].

Современные информационные технологии становятся ключевым фактором модернизации промышленного производства. Они создают основу для перехода к новым моделям управления и организации производственных процессов. Внедрение специализированных программных комплексов обеспечивает принципиально иной уровень контроля над технологическими операциями, способствуя созданию единого информационного пространства предприятия [4].

Использование цифровых решений позволяет переосмыслить традиционные подходы к планированию и управлению производством. Эти системы обеспечивают сквозную видимость всех этапов создания продукции, начиная от проектирования и заканчивая логистикой. При этом достигается

синергетический эффект – оптимизируются не только отдельные операции, но и вся цепочка создания стоимости.

Таблица 1 – Сравнительный анализ функциональности промышленных ИТ-платформ [2]

Критерии	ERP-системы	MES-системы	PLM-системы
Описание	Интегрируют данные и процессы всех подразделений (финансы, склад, производство, продажи).	Контролируют и оптимизируют производственные процессы в реальном времени.	Управляют информацией о продукте на всех этапах его жизненного цикла.
Основные преимущества	Централизация, скорость, прозрачность	Производительность, качество, сокращение цикла	Ускоренная обработка данных, экономия ресурсов
Примеры функций	Производство, закупки, склад, финансы	Контроль, данные, аналитика	Конструкции, проекты, документация

Однако переход на цифровые платформы требует тщательной методологической проработки. Необходимо учитывать взаимосвязь технологических, организационных и кадровых аспектов. Особое значение приобретает вопрос адаптации существующих бизнес-процессов к новым цифровым реалиям. Параллельно требуется решение задач, связанных с обеспечением информационной безопасности и защитой критически важных данных.

Таким образом, цифровая трансформация промышленности представляет собой сложный многоаспектный процесс. Его успешная реализация зависит от способности предприятия выстроить сбалансированную стратегию, учитывающую как технологические возможности, так и организационные требования современного производства.

Список использованной литературы

1. Пономарева, Е. С. Совершенствование процедур казначейского контроля в рамках механизма управления ликвидностью ОАО «РЖД» / Е. С. Пономарева // Корпоративное управление экономической и финансовой деятельностью на железнодорожном транспорте : Сборник трудов по результатам VII Международной научно-практической конференции, Москва, 14–15 декабря 2022 года. Том Выпуск 21. – Москва: Российский университет транспорта, 2023. – С. 208-216. – EDN KVYPSJ.

2. Трипкош, В. А. Место и роль технологий распознавания ситуаций при разработке и принятии управленческих решений в информационно-управляющих системах предприятий и организаций [Электронный ресурс] / Трипкош В. А., Акимов С. С. // Актуальные проблемы экономической деятельности и образования в современных условиях : сб. науч. тр. Тринадцатой

Междунар. науч.-практ. конф., 25 апр. 2018 г., Оренбург / М-во образования и науки Рос. Федерации, Оренбург. фил. федер. гос. бюджет. образоват. учреждения высш. образования «Рос. экон. ун-т им. Г. В. Плеханова» ; отв. ред. Ю. Г. Мишучкова. – Электрон. дан. – Красноярск : Науч.-инновац. центр, 2018. – С. 310-315. – 6 с.

3. Архапчева, М. В. Основные факторы обеспечения надежности оборудования на промышленном предприятии [Электронный ресурс] / М. В. Архапчева, Н. А. Бочарова // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии : материалы XI Всерос. конф., Оренбург, нояб. 2023 г. / Оренбург. гос. ун-т ; гл. ред. А. И. Сергеев. – Оренбург : ОГУ, 2023. – С. 432-435. – 4 с.

4. Чернявская, С. А. Информационный рынок и понятие информационно-коммуникационных технологий, эволюция рынка информационных технологий / С. А. Чернявская, М. Д. Назримадова // Экономические возможности России в условиях вызовов мировой экономики: подходы и решения : Материалы международной научно-практической конференции, Краснодар, 25 мая 2022 года. – Краснодар: Краснодарский кооперативный институт (филиал), 2022. – С. 322-327. – EDN GVZZFG.

5. Алферьев, Д. А. Место современных информационных компьютерных технологий в управлении инновационной деятельностью промышленных предприятий / Д. А. Алферьев, Д. Г. Родионов // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2020. – № 9-2. – С. 199-203. – DOI 10.17513/vaael.1321. – EDN АНАНTR.

THE ROLE AND IMPACT OF INFORMATION TECHNOLOGY ON INDUSTRIAL PRODUCTION

**Maria Vladimirovna Arkhapcheva, Assistant Professor of the Department of Management and Computer Science in Technical Systems,
Likhatsky Andrey Dmitrievich, specialist, 1st year**

Orenburg State University

Annotation. *The article considers the role of information technology in industrial production. The importance of digitalization as a factor in increasing the efficiency of enterprises is revealed. Examples of modern IT systems (ERP, MES, PLM) are given and their impact on production processes is analyzed. The key benefits of implementing digital solutions and the main challenges, including the need for personnel training and ensuring cybersecurity, are described. The work was carried out at the Department of Management and Informatics in Technical Systems, Orenburg State University under the supervision of Maria Vladimirovna Arkhapcheva, assistant of the Department of Management and Informatics in Technical Systems.*

Keywords: *information technology, industrial production, digitalization, ERP, MES, PLM, automation.*

ЦИФРОВИЗАЦИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: BIM-ТЕХНОЛОГИИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО

**Передереев Михаил Андреевич, Кагарманов Ильгиз Русланович, Рубанов
Александр Андреевич, Прихода Владислав Александрович, студенты
бакалавриата 2 курса**

Оренбургский государственный университет

Аннотация. *Строительная отрасль постоянно эволюционирует, внедряя новые технологии, инновационные материалы и совершенствуя имеемые механизмы и оборудование. Одним из ключевых инструментов в области строительства и проектирования являются BIM-технологии (моделирование информации о здании). BIM представляет собой процесс, в ходе которого создается информационная модель здания или сооружения. На каждом этапе разработки существует модель, предоставляющая данные о текущем объеме обработанной информации, включая архитектурные, конструктивные, технологические и экономические аспекты. Развитие BIM не останавливается, а наоборот, происходит быстрыми темпами. Существующие программные решения регулярно улучшаются, и разработчики постоянно выпускают обновления. В настоящее время BIM применяется не только для проектирования сложных и уникальных объектов (таких как заводы и специализированные здания), но также активно используется для проектирования многоэтажных комплексов, что обеспечивает ряд значительных преимуществ.*

*Работа выполнена на кафедре механики материалов, конструкций и машин под руководством **Поярковой Екатерины Васильевны**, заведующего кафедрой, доктора технических наук, доцента.*

Ключевые слова: *технологии; сооружения; BIM; среда; модель; моделирование.*

Код и рубрика: 67.01.00 Общие вопросы строительства

BIM технологии (Building Information Model) представляют собой интегрированный подход к проектированию, строительству и управлению зданиями и инфраструктурой, основанный на создании цифровых трехмерных моделей, которые содержат не только геометрическую информацию, но и данные о материалах, или иная информация о каждом объекте. Эти технологии способствуют улучшению координации между всеми участниками процесса – архитекторами, инженерами, строителями и владельцами, позволяя всем работать с одной обновляемой моделью, что снижает вероятность ошибок, экономит время и ресурсы. Кроме того, благодаря возможностям анализа и визуализации, BIM помогает принимать более обоснованные решения на этапе проектирования, что в свою очередь способствует созданию более устойчивых и эффективных объектов. В итоге, BIM технологии нацелены упростить и укоротить проектирование и строительство зданий.

Главная разница между проектированием с использованием BIM технологий и традиционными методами заключается в уровне сотрудничества и интеграции информации. В BIM проектировании создается детализированная 3D модель, которая объединяет данные о всех элементах объекта, включая архитектурные, инженерные и строительные аспекты. Это позволяет всем участникам проекта – архитекторам, инженерам, строителям и заказчикам – работать с одной актуальной моделью, что способствует более эффективному взаимодействию, уменьшению ошибок и недоразумений. В противовес этому, традиционные методы часто подразумевают работу с двумерными чертежами и отдельными документами, что затрудняет координацию и может приводить к несоответствиям и перерасходу ресурсов. Кроме того, BIM технологии позволяют проводить анализ на ранних этапах проектирования, что повышает качество решений и уменьшает стоимость и сроки строительства.

Существует множество программ, использующих BIM моделирование. Вот некоторые из самых популярных:

1. Autodesk Revit – одна из самых распространенных программ для архитектурного и строительного проектирования [1].

Общее описание: Revit – это программное обеспечение для информационного моделирования зданий (BIM), разработанное Autodesk. Программа используется для проектирования архитектуры, структурных систем и инженерных сетей, а её ключевые функции можно систематизировать в табличном виде (таблица 1)

Таблица 1 – Ключевые функции, характеристики, преимущества ПО Revit

Функция	Характеристика	Преимущества
3D-Моделирование	Позволяет создавать точные 3D модели, которые можно легко редактировать	Возможность анализа конструкций
Совместная работа	Упрощает работу команды, позволяя нескольким пользователям одновременно работать над одним проектом	Совместимость с Autodesk Civil 3D, Navisworks, AutoCAD
Документация	Автоматически генерирует чертежи и документацию из 3D модели, что уменьшает вероятность ошибок и упрощает обновления	Динамические таблицы автоматически ведут подсчет объемов материалов

На рисунке 1 в качестве примера приведен скриншот интерфейса.

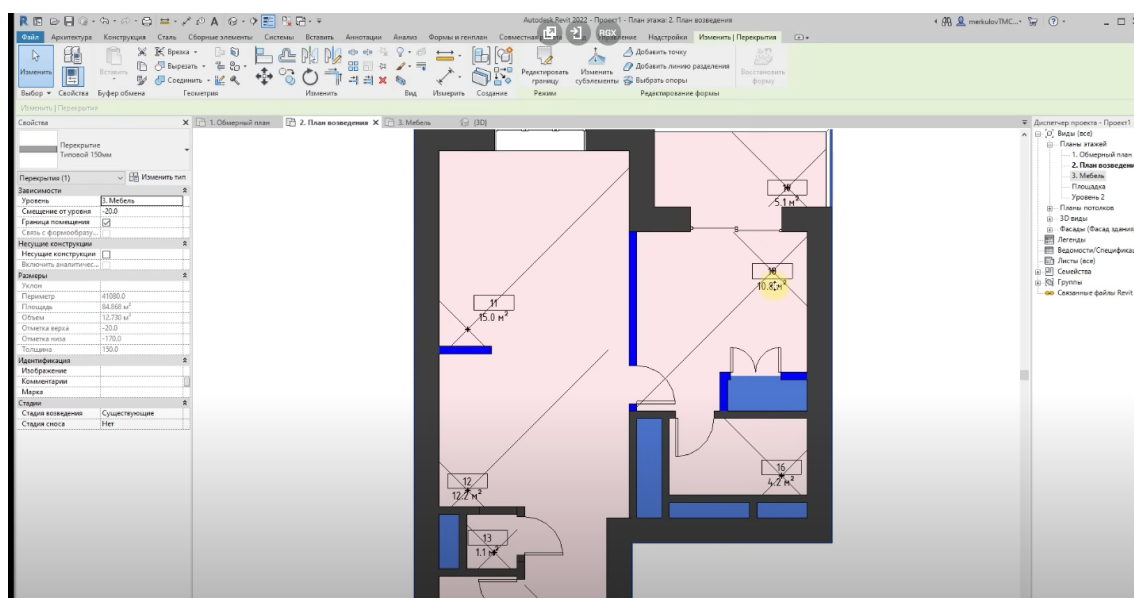


Рисунок 1 – Пример интерфейса Revit

2. Graphisoft Archicad [2] – программа, ориентированная на архитекторов, предлагающая мощные функции для проектирования.

Общее описание: Archicad - это тоже программа для BIM, разработанная компанией Graphisoft. Она была одной из первых, предлагающих архитектурное моделирование с использованием BIM технологий.

Таблица 2 – Ключевые функции, характеристики, преимущества ПО Archicad

Функции	Характеристика	Преимущества
3D-Моделирование	Позволяет создавать точные 3D модели, которые можно легко редактировать	Интуитивно понятный интерфейс
Совместная работа	Система BIMcloud позволяет командам работать совместно и синхронизировать изменения в реальном времени	Несколько пользователей могут одновременно работать над одним проектом без конфликтов версий.
Параметрическое проектирование с помощью Grasshopper	Прямая двусторонняя связь между Archicad и Grasshopper (визуальное программирование в Rhino)	Позволяет создавать сложные адаптивные формы и сразу интегрировать их в BIM-модель

На рисунке 2 в качестве примера приведен скриншот интерфейса ПО Archicad.

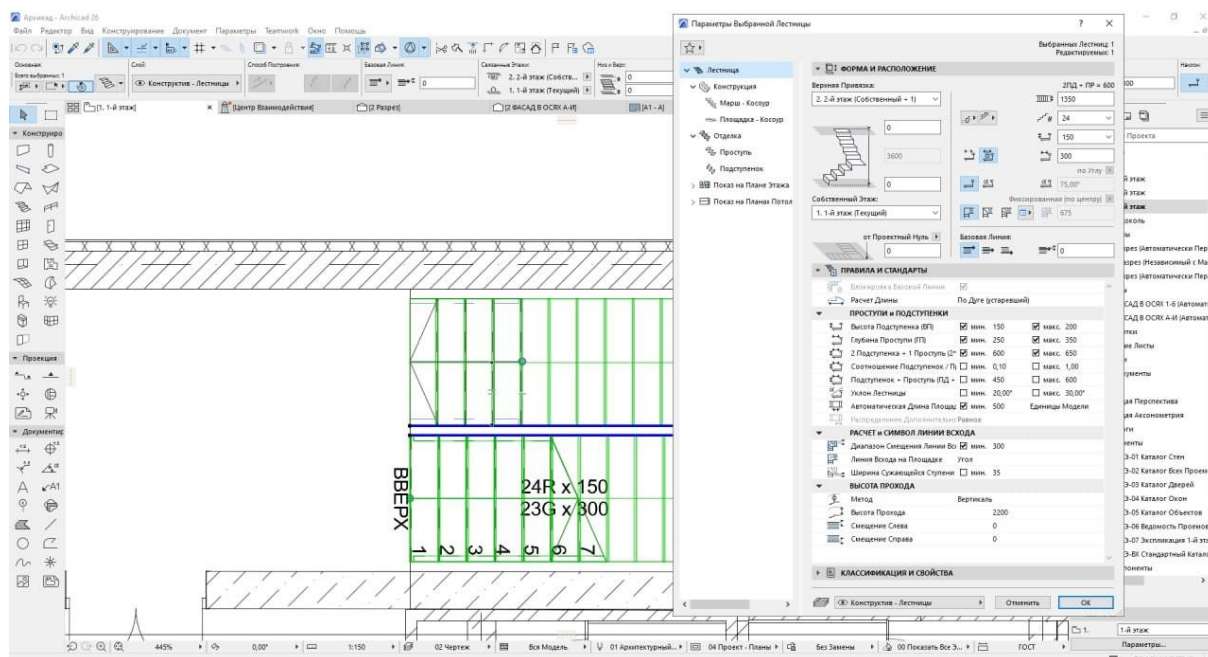


Рисунок 2 – Пример интерфейса Archicad

ВМ-технологии совершили революцию в архитектурно-строительной отрасли, кардинально изменив традиционные подходы к созданию проектов. Одним из ключевых преимуществ стало радикальное улучшение командного взаимодействия. Благодаря ВМ-средам несколько специалистов – архитекторы, инженеры, конструкторы и подрядчики – могут одновременно работать над единым проектом в режиме реального времени. Все внесенные изменения автоматически синхронизируются для всех участников, что практически исключает риск возникновения ошибок из-за недопонимания или работы с устаревшими данными.

Точность проектирования достигла принципиально нового уровня благодаря переходу от 2D-чертежей к интеллектуальным 3D-моделям. Трехмерное моделирование позволяет наглядно визуализировать все элементы здания, существенно снижая вероятность проектных ошибок. При этом автоматическая генерация документации непосредственно из ВМ-модели минимизирует необходимость последующих доработок и исправлений.

ВМ-инструменты значительно повысили эффективность планирования строительных процессов. Они позволяют прогнозировать и устранять потенциальные проблемы еще на этапе проектирования, что сокращает количество дорогостоящих изменений во время строительства. Возможность проведения комплексных анализов (энергоэффективности, конструктивных решений, инженерных систем) на ранних стадиях дает возможность оптимизировать проект до начала его реализации.

Важным экономическим преимуществом ВМ стало существенное сокращение затрат. Совершенствование процессов проектирования и планирования позволяет уменьшить сроки строительства и оптимизировать

использование ресурсов. Значительно снижаются непредвиденные расходы, связанные с переделками и исправлением ошибок.

Кроме практических преимуществ, BIM-технологии открыли новые творческие возможности для архитекторов. Современные инструменты моделирования и визуализации позволяют экспериментировать с самыми смелыми формами и конструктивными решениями, что способствует появлению инновационных архитектурных концепций и принципиально новых подходов к проектированию.

Таким образом, внедрение BIM-технологий трансформировало всю отрасль, сделав процесс проектирования более согласованным, точным, экономически эффективным и творчески свободным.

Переход от рассмотрения общих преимуществ BIM-технологий к их конкретному экономическому воздействию особенно важен в контексте управления затратами в строительстве. BIM не просто оптимизирует проектные процессы – он становится мощным финансовым инструментом, позволяющим контролировать бюджет на всех этапах строительного цикла. Давайте проанализируем, как именно BIM-технологии влияют на стоимостные показатели и помогают минимизировать финансовые риски в реализации проектов.

Применение BIM-технологий позволяет значительно уменьшить затраты на проектирование и строительство за счет высокой точности моделирования и координации между участниками проекта. Одним из главных факторов, влияющих на снижение затрат, является возможность заранее выявлять ошибки и недочеты на этапе проектирования, что позволяет избежать дорогостоящих исправлений в процессе строительства. Кроме того, BIM позволяет оптимизировать использование строительных материалов. Цифровая модель здания дает точное представление о количестве материалов, что способствует исключению перерасхода и минимизации отходов. Это не только сокращает затраты, но и оказывает положительное влияние на экологию, снижая углеродный след строительства.

Говоря о влиянии BIM на управление затратами, важно подкрепить теорию реальными примерами. В России уже есть ряд масштабных проектов, где внедрение BIM-технологий позволило не только оптимизировать бюджет, но и ускорить сроки строительства, минимизировать ошибки и улучшить качество реализации. Рассмотрим несколько успешных кейсов применения BIM в российских строительных проектах. Ярким примером стал терминал В московского аэропорта «Шереметьево», генеральным проектировщиком проекта была компания «Моспроект», в проекте использование информационного моделирования позволило скоординировать работу более 50 подрядчиков и полностью исключить коллизии при прокладке сложных инженерных коммуникаций. Благодаря точному моделированию узлов и автоматизации документооборота сроки строительства удалось сократить на впечатляющие 15%. Не менее показательным стал опыт строительства стадиона «Зенит-Арена» в Санкт-Петербурге проектированием занималась компания "Ингеоком". Здесь, BIM-моделирование сыграло ключевую роль в оптимизации

металлоконструкций, что позволило значительно сократить перерасход материалов. Особенно ценным оказалось использование BIM для визуализации таких сложных элементов, как раздвижная крыша и фасады, что существенно ускорило процесс принятия технических решений. В инфраструктурных проектах BIM также демонстрирует выдающиеся результаты. При строительстве Большой кольцевой линии московского метро технологии BIM-интегратор выступала компания «Питер Софт», информационного моделирования использовались для трехмерного планирования тоннелей и станций, что позволило минимизировать риски при проходке. Интеграция BIM-моделей с геопространственными данными помогла избежать столкновений с существующими подземными коммуникациями, предотвратив возможные аварийные ситуации и связанные с ними финансовые потери.

Хотя столичные компании лидируют во внедрении BIM, регионы постепенно перенимают этот опыт. Оренбург – один из городов, где строительный сектор начинает активно осваивать информационное моделирование. Локальные подрядчики, девелоперы и проектные институты внедряют BIM как для участия в крупных государственных заказах, так и для повышения эффективности коммерческих проектов. Рассмотрим ключевые строительные организации Оренбурга, успешно применяющие технологии информационного моделирования в своей работе.

Спортивно-концертный комплекс «Оренбуржье» спроектирован «Оренбурггражданпроект» с применением BIM-технологий. Это позволило оптимизировать проектирование, точно координировать инженерные системы и создать функциональное пространство для мероприятий. Проект демонстрирует возможности региональных компаний в работе с современными цифровыми технологиями.

Продолжая тему внедрения BIM-технологий в оренбургском строительстве, стоит отметить жилой комплекс «Времена года» — еще один яркий пример цифровой трансформации местной строительной отрасли. В отличие от спортивно-концертного комплекса, где акцент делался на общественные пространства, в этом проекте компания «Оренбургстрой» продемонстрировала эффективность информационного моделирования при создании комфортной жилой среды. Применение BIM позволило не только оптимизировать инженерные коммуникации, но и тщательно проработать планировочные решения, что в итоге воплотилось в гармоничном сочетании эстетики и функциональности жилого пространства.

Список использованной литературы

1. Сайт компании Autodesk. – Режим доступа: <https://www.autodesk.com/products/revit/overview> (дата обращения: 21.05.2022)
2. Сайт компании Archicad. – Режим доступа: <https://www.graphisoft.com/ru/solutions/archicad> (дата обращения: 21.05.2022)

3. Карта строительных проектов. – Режим доступа: <https://investprojects.info/project-base> (дата обращения: 21.05.2022)
4. Сайт компании «Оренбурггражданпроект». – Режим доступа: <https://ogp56.ru/proekty> (дата обращения: 21.05.2022)
5. Сайт компании «Оренбургстрой». – Режим доступа: <https://orenburg-stroy.ru> (дата обращения: 21.05.2022).

DIGITALIZATION IN CONSTRUCTION: BIM TECHNOLOGIES AND THEIR IMPACT ON DESIGN AND CONSTRUCTION

Peredereev Mikhail Andreevich, Kagarmanov Ilgiz Ruslanovich, Rubanov Alexander Andreevich, Prikhoda Vladislav Alexandrovich, 2nd year undergraduate students

Orenburg State University

Abstract. *The construction industry is constantly evolving, introducing new technologies, innovative materials and improving existing mechanisms and equipment. One of the key tools in the field of construction and design is BIM technologies (building information modeling). BIM is a process during which an information model of a building or structure is created. At each stage of development, there is a model that provides data on the current volume of processed information, including architectural, structural, technological and economic aspects. The development of BIM does not stop, but on the contrary, occurs at a rapid pace. Existing software solutions are regularly improved, and developers constantly release updates. Currently, BIM is used not only for designing complex and unique objects (such as factories and specialized buildings), but is also actively used for designing multi-story complexes, which provides a number of significant advantages.*

*The work was carried out at the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines **under the supervision of Ekaterina Vasilievna Poyarkova**, Head of the Department, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor.*

Keywords: *technologies; structures; BIM; environment; model; simulation.*

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ И ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ

Поярков Климент Никитич, Архипенко Татьяна Викторовна, Едыгеева Альбина Темирбулатовна, Рябова Анастасия Александровна, Труфанова Полина Сергеевна, студенты бакалавриата, 3 курс

Оренбургский государственный университет

Аннотация: В статье рассмотрено применение цифровых двойников сварочных процессов как перспективного инструмента для оптимизации контроля качества и повышения надёжности сварных конструкций. Традиционные методы контроля сварных соединений часто оказываются недостаточно эффективными для своевременного выявления скрытых дефектов и требуют значительных затрат времени и ресурсов. Цифровые двойники позволяют создавать виртуальные модели сварочного процесса, интегрирующие данные с физических объектов, что обеспечивает возможность проведения виртуальных экспериментов, прогнозирования возникновения дефектов и оптимизации параметров сварки до начала реального производства.

В работе проанализированы современные подходы к построению цифровых двойников с учётом тепловых, механических и микроструктурных процессов, а также рассмотрены методы интеграции с системами мониторинга и управления производством. Особое внимание уделено вызовам, связанным с повышением точности моделей, валидацией на основе реальных данных. Результаты исследования подтверждают, что внедрение цифровых двойников способствует повышению качества сварных соединений, снижению производственных затрат и увеличению надёжности конструкций, что имеет важное значение для различных отраслей промышленности.

Работа выполнена на кафедре механики материалов, конструкций и машин Оренбургского государственного университета **под руководством Поярковой Екатерины Васильевны**, доктора технических наук, доцента, заведующим кафедрой механики материалов, конструкций и машин.

Ключевые слова: цифровой двойник, сварочные процессы, контроль качества, надёжность конструкций, виртуальное моделирование, прогнозирование дефектов, мониторинг сварки, оптимизация параметров

Код и рубрика: 81.35.00 Сварка

Сварка является критически важным процессом в производстве широкого спектра конструкций, от небольших деталей до масштабных инфраструктурных объектов, таких как мосты, трубопроводы, суда и аэрокосмическая техника. Качество сварных соединений напрямую влияет на прочность, долговечность и безопасность этих конструкций. Традиционные методы контроля качества

сварки, такие как визуальный осмотр, ультразвуковой контроль и радиографический контроль, являются трудоемкими, дорогостоящими и не всегда позволяют выявить скрытые дефекты, возникающие в процессе сварки. Более того, они зачастую проводятся постфактум, когда исправление дефектов сопряжено со значительными затратами времени и ресурсов.

В условиях возрастающих требований к качеству, снижению затрат и повышению эффективности производства, назрела необходимость во внедрении новых, более эффективных и проактивных методов контроля и оптимизации сварочных процессов. Цифровые двойники (ЦД) сварочных процессов представляют собой перспективное решение этой задачи. Они позволяют моделировать, анализировать и оптимизировать процессы сварки в виртуальной среде, прогнозируя поведение сварного соединения, выявляя потенциальные дефекты и предлагая оптимальные параметры сварки до начала реального процесса.

Также могут быть смоделированы и минимизированы различные промышленные риски. Для технологически сложных процессов, таких как сварка, могут быть смоделированы и оптимизированы многие технологические параметры (траектории сварных швов, температурные режимы, расход сварочных материалов и многое другое). На рисунке 1 представлен пример оптимизации процессов сварки при офлайн программировании в цифровом двойнике.

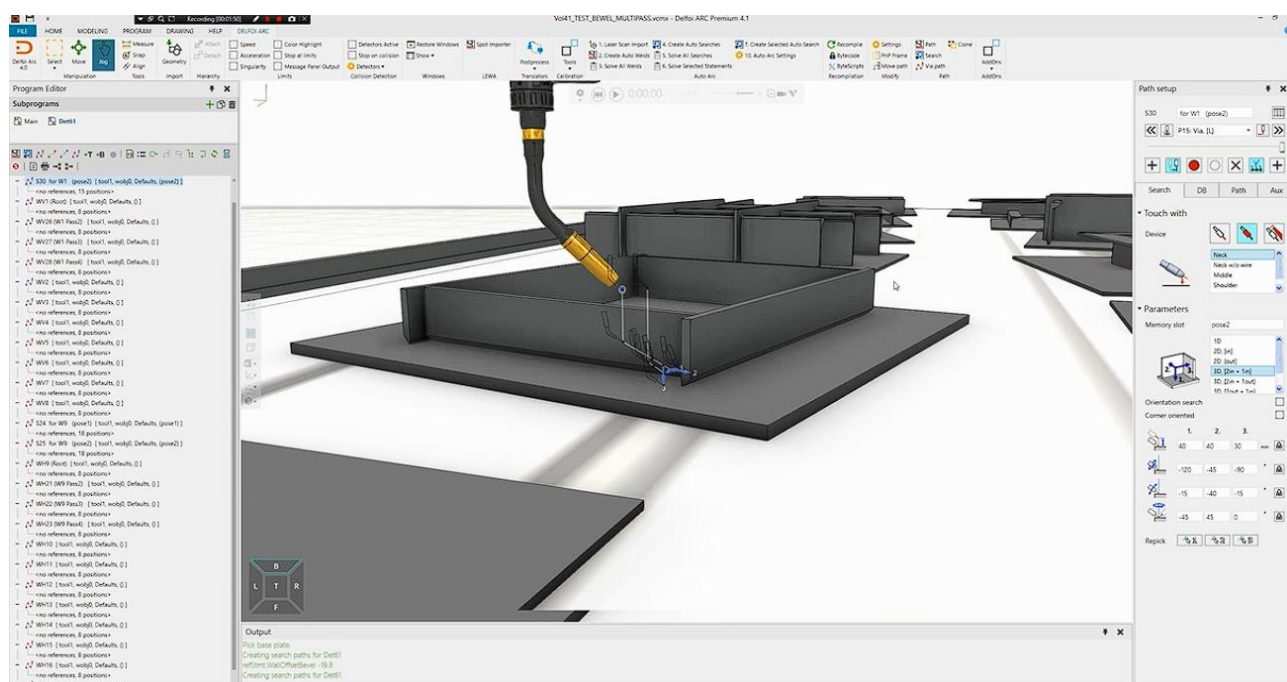


Рисунок 1 – Оптимизация процессов сварки при офлайн программировании в цифровом двойнике [1]

Цифровые двойники предоставляют эффективные возможности для офлайн-программирования и отладки промышленных роботов и оборудования с цифровым интеллектуальным управлением. Использование ЦД позволяет

перенести процессы программирования и отладки из реального производства в офлайн-среду. Это означает, что оператор может создавать и тестировать программы вне производственного цеха, что способствует более рациональному использованию оборудования (оно продолжает работать в штатном режиме, не подвергаясь простоям). После завершения офлайн-программирования готовая программа загружается непосредственно в систему управления роботом.

Данный подход исключает необходимость проведения натурных испытаний и отладки на реальном оборудовании, что зачастую связано с использованием заготовок, которые после тестов идут в брак или отходы. Все испытания и оптимизация производятся в цифровой модели, что значительно снижает издержки и повышает качество производственных процессов. Офлайн-программирование способствует улучшению точности и качества выполнения производственных операций, а также увеличению скорости их выполнения, что положительно сказывается на потребительских свойствах конечной продукции. Таким образом, использование ЦД для офлайн-программирования является важным инструментом повышения эффективности и надёжности современных промышленных систем.

В целом, применение цифровых двойников сварочных процессов позволяет:

1. снизить затраты на натурные эксперименты. Цифровые двойники позволяют проводить виртуальные эксперименты с различными параметрами сварки, материалами и конструкциями, существенно сокращая потребность в дорогостоящих натурных испытаниях.

2. оптимизировать параметры сварки. Цифровые двойники позволяют подбирать оптимальные параметры сварки, такие как ток, напряжение, скорость сварки и состав защитного газа, для достижения требуемого качества сварного соединения.

3. прогнозировать образование дефектов. Цифровые двойники позволяют выявлять потенциальные дефекты, такие как поры, трещины, непровары и коробления, на ранних стадиях процесса сварки, позволяя предпринять корректирующие меры.

4. оптимизировать конструкцию. Цифровые двойники позволяют оценивать влияние сварки на деформации и напряжения в конструкции, что дает возможность оптимизировать конструкцию для минимизации негативных последствий сварки.

5. обеспечить прослеживаемость. Цифровые двойники позволяют отслеживать историю сварки каждого соединения, включая параметры сварки, результаты моделирования и данные контроля качества, что обеспечивает полную прослеживаемость и повышает надежность конструкции.

6. улучшить обучение и квалификацию сварщиков. Цифровые двойники могут быть использованы для обучения сварщиков и повышения их квалификации в виртуальной среде, что позволяет снизить количество ошибок и повысить качество сварки.

Таким образом, внедрение ЦД сварочных процессов является актуальной и перспективной задачей, способствующей повышению качества, надежности и эффективности производства сварных конструкций.

Обычно цифровой двойник используется, когда точные виртуальные модели реальных систем необходимы для улучшения понимания, анализа и оптимизации сложных систем пользователями. Усталостные трещины в области остаточных напряжений сварки – это сложный стохастический процесс, на который влияет множество неопределенностей, таких как микроструктура материала, условия испытаний, размер образца и окружающая среда. Создание структуры цифрового двойника для усталостных трещин в области остаточных напряжений сварки может предоставить новый метод для мониторинга трещин, прогнозирования срока службы, оценки показателей безопасности конструкций [2].

Вместе с тем, в работе [3] показано, что концепция цифрового двойника обладает значительным потенциалом для объединения моделирования методом конечных элементов с кристаллографической структурой и испытаний на усталость, что способствует повышению универсальности и надёжности вероятностных прогнозов появления микротрещин. ЦД включает четыре ключевых компонента:

1. моделирование виртуального объекта;
2. получение информации из физического объекта;
3. слияние физических и виртуальных объектов;
4. предоставление соответствующих услуг.

Несмотря на многочисленные усилия по построению цифровых двойников и различные методы слияния физических и виртуальных объектов, обновление параметров высокоточной модели методом конечных элементов на основе тестовых данных остаётся ресурсозатратным процессом.

В качестве альтернативы применяется построение суррогатных моделей, которые повышают вычислительную эффективность, однако при моделировании сложных микроструктур их точность не всегда гарантируется [3].

Классические динамические байесовские сети представляют собой эффективный инструмент для интеграции физических и виртуальных сущностей, обеспечивая оценку состояния системы с учётом временных изменений и позволяя корректировать ключевые параметры на основе данных испытаний на усталость. Такая методика даёт возможность получать точные прогнозы развития микротрещин и распространения макротрещин, что особенно важно для отслеживания усталостных повреждений. Для разработки цифровых двойников, направленных на прогнозирование микротрещин за счет моделирования методом конечных элементов пластичности кристаллов, необходимы оценки разброса факторов усталостной прочности (УП), однако из-за высокой чувствительности УП к микроструктуре и сложности наблюдений за возникновением микротрещин основные усилия сосредоточены на интеграции выше обозначенного моделирования с экспериментальными данными по усталости.

Часть опубликованных исследований сосредоточены на сочетании модели конечного элемента и алгоритма анализа для улучшения эффектов моделирования [5], в то время как некоторые исследования сосредоточены на новых методах мониторинга для обновления моделей конечных элементов с данными в реальном времени [5], а другие на эффектах применения метода конечных элементов, где преимущества модели конечного элемента представлены в виде эффективной вычислительной мощности, интуитивно понятных отображений результатов и высокой механической точности.

Объединяя модель цифрового двойника с данными мониторинга в реальном времени, свойства модели могут обновляться быстро, благодаря чему важность технологии цифровых двойников проявляется в управлении состоянием конструкции [4].

Вместе с тем, в основе всё же проплавление сварного шва является ключом к определению качества сварки [7, 8]. Однако отсутствие сенсорной технологии затрудняет прогнозирование проплавления сварного шва, что создает серьезную проблему для стабильности процесса и качества сварки. Для решения этой проблемы в [7] предлагается цифровой метод с двойным управлением для характеристики морфологии ванны расплава и прогнозирования проникновения расплава. Для достижения этого сначала выводится аналитическая модель ванны расплава с изменяющейся во времени скоростью сварки под действием двойного эллипсоидального кругового источника тепла. Аналитическая модель решается с использованием метода численного интегрирования. Прогнозирование глубины и ширины расплава достигается путем извлечения изотерм. Между тем, цифровая реконструкция сцены сварки была достигнута путем внедрения метода Neural Radiance Fields (NeRF), который описан в [7]. Метод позволяет в реальном времени моделировать различные условия сварки и сочетания параметров перед сваркой, оценивая их влияние на результаты сварки, чтобы найти оптимальную конфигурацию параметров процесса. Его также можно дистанционно реализовать для мониторинга и управления проникновением расплава в реальном времени во время процесса сварки. Результаты показывают, что во временном интервале от 0 до 4 секунд ошибка проникновения контролируется в пределах 7%. На этапе от 4 до 16 секунд, когда изменяется скорость, максимальная ошибка проникновения составляет 16,59 %.

В [8] был предложен эффективный метод прогнозирования проплавления сварного шва на основе глубокого обучения для контроля качества сварки в процессе. Была построена модель прогнозирования глубины проплавления с использованием изображения верхней сварочной ванны. Изображения сварочной ванны содержали несколько объектов, каждый из которых влиял на точность прогнозирования [9]. Затем на полученном изображении сварочной ванны была выполнена семантическая сегментация на основе остаточной нейронной сети. Кроме того, была построена модель регрессии проплавления на основе нейронной сети обратного распространения. Наконец, глубина проплавления (соответствующая форме сварочной ванны) была извлечена с

помощью сегментации. Модели сегментации и регрессии были объединены для создания модели прогнозирования проплавления [8].

В [9] показано, что с помощью предложенного метода оптимизированная модель могла количественно предсказать глубину проплавления; средняя абсолютная ошибка составила 0,0516 мм, со значением $R^2=0,998$. Точный прогноз глубины проплавления может использоваться при контроле качества сварки в реальном времени для обеспечения надежного обратного шва.

Также, по мнению авторов [10] тепловые данные в сочетании с искусственным интеллектом оказались многообещающей технологией для распознавания изображений сварки. Среди моделей глубокого обучения выделяется You Only Look Once (YOLO) благодаря своей быстрой способности распознавания, умеренным или низким вычислительным затратам и простоте по сравнению с другими методами. Тепловые изображения были получены в четырех различных положениях сварки при тех же настройках параметров, от начала сварки до точки в фазе установившегося состояния. Тепловое поле контролировалось с обратной стороны полностью проваренных сварных швов. Подмножество изображений, выбранное на основе характеристик распределения теплового поля, наблюдаемых в экспериментах, использовалось для обучения модели. Была подчеркнута значимость теплового поля как ценного источника данных и продемонстрирован потенциал искусственного интеллекта для извлечения значимых идей [10].

В работе [11] была предложена модель определения качества сварного шва на основе алгоритма YOLOX-s, которая извлекает признаки с помощью сети CSPDarknet и выполняет их обнаружение. При тестировании модели отслеживания среднее абсолютное значение ошибки отслеживания предложенной модели составило 0,08 мм, в то время как предыдущие версии (модели DSST и MOSSE) показали ошибки 0,155 и 0,163 мм соответственно. При сравнении качества отслеживания предложенная модель продемонстрировала среднюю степень соответствия 96,65 %, в то время как MOSSE и DSST показали 80,35 % и 86,67 % соответственно. По точности обнаружения сварного шва предлагаемая модель превосходит другие модели с точностью 97,35 % и минимальной потерей производительности 0,023. Отмечается, что предложенная модель обладает отличной производительностью и соответствует требованиям к разработке сварочных роботов-автоматов. Результаты исследования окажут важную техническую поддержку в разработке и внедрении «Индустрии 4.0». Однако, несмотря на то, что технология, представленная в этом исследовании, показывает отличные результаты при определении качества сварных швов, остаются проблемы с выявлением таких дефектов, как наплывы и задиры [11].

Российскими исследователями в [12] предложен достаточно точный аналитический метод моделирования тепловых полей в процессе технической сварки, учитывающий ряд реальных физических особенностей процесса. В этой же работе показано, что новый расчетный метод гораздо лучше описывает температурное поле в области сварного шва, размер и форму сварочной ванны, чем модель одиночного источника в [13]. Предлагаемая модель удовлетворяет

как требованиям достоверности, так и вычислительной быстроты, необходимым для использования в качестве элемента при разработке цифровых двойников процесса промышленной сварки. Использование данной аналитической модели позволяет легко проанализировать зависимость скорости охлаждения от температуры в различных точках стали вблизи трубных швов.

В [14] представлено исследование технологии контроля качества процесса многослойной сварки плетением для V-образных канавок средних и толстых пластин. Экспериментально подтверждено, что скорость распознавания ванны расплава с использованием алгоритма, предложенного в данной статье, достигает 98,85 %, а средняя ошибка прогнозирования размера сварного шва составляет менее 5 %, что может соответствовать требованиям точности контроля проникновения боковой стенки и оценки качества [14].

Работа [15] посвящена исследованию свойств сварных соединений трубных заготовок с целью создания цифрового двойника сварной цилиндрической оболочки. Особое внимание уделено неоднородному распределению свойств в разных зонах сварного шва, изученному методом анализа вторичной акустической эмиссии. В работе проведён численный анализ акустических характеристик звуковых волн, прошедших через сварное соединение, с учётом зависимости параметров от расстояния между датчиком Либб и микрофоном. В исследовании выявлены характерные изменения свойств сварных оболочек по всей поверхности конструкции и особенности распределения интегрального параметра, позволившие количественно и качественно оценить неоднородности сварных соединений [15].

Однако, несмотря на значительный прогресс в области разработки цифровых двойников сварочных процессов, остаются нерешённые задачи, требующие дальнейшего внимания и исследований. В первую очередь необходимо повысить точность и надёжность моделей, что требует улучшения методов моделирования физических процессов, происходящих при сварке, особенно в случае сложных и многопроходных сварных соединений. Также важным направлением является разработка эффективных методов валидации моделей, основанных на использовании данных, полученных в реальном времени с датчиков и систем мониторинга, что позволит повысить достоверность прогнозов цифровых двойников.

Кроме того, стоит уделить внимание интеграции цифровых двойников с существующими системами управления производством [16], такими как MES и ERP, для обеспечения бесшовного обмена данными и автоматизации производственных процессов. Немаловажно разработать специализированные цифровые двойники, адаптированные под различные типы сварки, материалы и конструкции, что позволит учесть особенности конкретных технологических задач. Наконец, одной из ключевых проблем остаётся обработка больших объёмов данных (Big Data), которые формируются в процессе мониторинга сварочных операций; для эффективного анализа и использования этих данных необходимы современные методы их обработки и интерпретации. Решение

перечисленных задач значительно повысит эффективность и надёжность применения цифровых двойников в сварочных процессах.

Мировой задел в области исследования, посвященной применению цифровых двойников сварочных процессов для оптимизации контроля и повышения надежности конструкций, велик, однако остаются нерешенные задачи, требующие дальнейших исследований и разработок. Решение этих задач позволит значительно повысить качество, надежность и эффективность производства сварных конструкций, а также снизить затраты и повысить конкурентоспособность предприятий.

Список использованной литературы

1. Ключевые функциональность и преимущества использования цифровых двойников в промышленности. – Режим доступа: https://www.r-p-c.ru/articles/key_benefits_using_digital_twins (дата обращения 22.05.2025).
2. Anyin, Peng Digital twin-driven framework for fatigue life prediction of welded structures considering residual stress / Peng Anyin, Ma Yafei, Huang Ke, Wang Lei // International Journal of Fatigue. – 2024. – Volume 181. – 108144. – <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108144>. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112324000021> (дата обращения 23.05.2025).
3. Wulve, Lao Digital twin-based probabilistic prediction of microcrack initiation and propagation in the weld zone of orthotropic steel deck / Wulve Lao, You-Lin Xu, Yang Ye, Chuang Cui, Qinghua Zhang // International Journal of Fatigue. – 2024. – Volume 186. – 108407. – <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108407>. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112324002652> (дата обращения 23.05.2025).
4. Linze, Shi Development and Application of Digital Twin Technique in Steel Structures / Linze Shi, Yong Ding, Bin Cheng // Applied Sciences. – 2024. – Volume 14. – Issue 24. – 11685. – <https://doi.org/10.3390/app142411685>. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/24/11685> (дата обращения 23.05.2025).
5. Velázquez de la Hoz J. L., Cheng K. Investigation on the modeling and simulation of hydrodynamics in asymmetric conduction laser micro-welding of austenitic stainless steel and its process optimization // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2025. – T. 239. – №. 4. – С. 530-543.
6. Tervo J. et al. Hybrid methodology development for lubrication regimes identification based on measurements, simulation, and data clustering // Tribology International. – 2024. – T. 195. – С. 109631.
7. Qu, H., Chen, J., Cai, Y. A digital twin approach for weld penetration prediction of tig welding with dual ellipsoid heat source // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2024. – <https://doi.org/10.1007/s10845-024-02431-1>. – Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10845-024-02431-1#citeas> (дата обращения 29.05.2025).

8. Baek, Daehyun In-process prediction of weld penetration depth using machine learning-based molten pool extraction technique in tungsten arc welding / Daehyun Baek, Hyeong Soon Moon, Sang-Hu Park // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2024. – Volume 35. – pages 129–145. – <https://doi.org/10.1007/s10845-022-02013-z>. – Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10845-022-02013-z> (дата обращения 29.05.2025).
9. Baek, Daehyun Optimization of weld penetration prediction based on weld pool image and deep learning approach in gas tungsten arc welding / Daehyun Baek, Hyeong Soon Moon, Sang-Hu Park // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Volume 130. – pages 2617–2633. – <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12855-3>. – Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-023-12855-3?fromPaywallRec=true> (дата обращения 29.05.2025).
10. Jorge, V. L. Deep learning-based YOLO for semantic segmentation and classification of weld pool thermal images / Vinicius Lemes Jorge, Issam Bendaoud, Fabien Soulié, Cyril Bordreuil // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – Volume 137. – pages 3573–3585. – <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15378-1>. – Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-025-15378-1?fromPaywallRec=true> (дата обращения 29.05.2025).
11. Kang Y and Chen R Welding robot automation technology based on digital twin // Frontiers in Mechanical Engineering. – 2024. – Volume 10. – 1367690. – <https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1367690>. – Режим доступа: <https://translated.turbopages.org/journals/mechanical-engineering/articles/10.3389/fmech.2024.1367690/full> (дата обращения 03.06.2025).
12. Мирзаев, Д. А. Простая аналитическая модель тепловых полей для разработки цифровых двойников процесса промышленной дуговой сварки / Д. А. Мирзаев, К. Ю. Окишев, А. А. Мирзоев // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2023. – Том 15. – № 1. – С. 76–86. – DOI: 10.14529/mmph230109.
13. Попков, А. М. Тепловые и энергетические расчеты при электрической дуговой сварке: учеб. пособие / А. М. Попков. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 74 с.
14. Wang, T. Extraction of Weld Pool Contours and Quality Prediction of Fillet Welds in Fillet Welding Based on Deep Learning with Welding Deviation Correction / Tianqi Wang, Jiaxin Hao, Junjie He, Lifeng Du // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2025. – <https://doi.org/10.1007/s12541-024-01143-z>. – Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12541-024-01143-z> (дата обращения 30.05.2025).
15. Гафарова, В. А. Разработка алгоритма создания цифрового двойника сварного соединения оболочковой конструкции (Часть 1) / В. А. Гафарова, Д. Н. Шерматов, М. И. Баязитов, А. Л. Арсланов // Нефтегазовое дело. – 2023. – Том 21. – № 5. – С. 198–211. – <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-5-198-211>.

16. Пояркова, Е. В. Искусственный интеллект как способ повышения эффективности промышленной безопасности на производственных объектах / Е. В. Пояркова, Е. Р. Батталов // Современная механика в цифровую эпоху: проблемы и перспективы [Электронный ресурс]: материалы III Всероссийской молодежной научно-практической конференции / под редакцией Е. В. Поярковой; Оренбург. гос. ун-т. – Электронные текстовые данные. – Оренбург: ОГУ, 2024. – С. 239-248.

APPLICATION OF DIGITAL DOUBLES OF WELDING PROCESSES TO OPTIMIZING CONTROL AND INCREASING RELIABILITY OF STRUCTURES

Poyarkov Kliment Nikitich, Arkhipenko Tatyana Viktorovna, Edygeva Albina Temirbulatovna, Ryabova Anastasia Aleksandrovna, Trufanova Polina Sergeevna, 3rd year undergraduate students

Orenburg State University

Abstract. *The article discusses the use of digital twins of welding processes as a promising tool for optimizing quality control and increasing the reliability of welded structures. Traditional methods of welded joint testing are often insufficiently effective for the timely detection of hidden defects and require significant time and resources. Digital twins allow creating virtual models of the welding process that integrate data from physical objects, which makes it possible to conduct virtual experiments, predict the occurrence of defects and optimize welding parameters before the start of real production. The paper analyzes modern approaches to building digital twins taking into account thermal, mechanical and microstructural processes, and also considers methods of integration with production monitoring and management systems. Particular attention is paid to the challenges associated with increasing the accuracy of models, validation based on real data and processing large volumes of information. The results of the study confirm that the introduction of digital twins helps to improve the quality of welded joints, reduce production costs and increase the reliability of structures, which is important for various industries.*

The work was carried out at the Department of Mechanics of Materials, Structures, and Machines of Orenburg State University under the guidance of Poyarkova Ekaterina Vasilyevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanics of Materials, Structures, and Machines.

Keywords: *digital twin, welding processes, quality control, reliability of structures, virtual modeling, defect prediction, welding monitoring, parameter optimization.*



СЕКЦИЯ 5

«СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ»

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ МЕТОДОВ И ИНСТРУМЕНТОВ ЗАЩИТЫ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Архипенко Татьяна Викторовна, Едыгеева Альбина Темирбулатовна,
Поярков Климент Никитич, студенты бакалавриата 3 курса

Оренбургский государственный университет

Аннотация: В статье рассматривается комплексный подход к анализу методов и инструментов обеспечения безопасности опасных производственных объектов. Особое внимание уделяется систематизации современных методов анализа рисков, мониторинга состояния объектов и управления промышленной безопасностью. Исследуются вопросы перехода от анализа рисков к их управлению через внедрение современных диагностических систем и информационных технологий. Представлены основные механизмы управления промышленной безопасностью.

Ключевые слова: промышленная безопасность, опасные производственные объекты, техногенная безопасность, анализ рисков, управление рисками, методы защиты

Код и рубрика: 81.93.21 Предупреждение возникновения чрезвычайных ситуаций, их развития и ликвидации их последствий

В современном мире безопасность опасных производственных объектов становится одной из ключевых приоритетов для организаций различных секторов. Учитывая увеличивающиеся угрозы со стороны как внешних факторов, так и внутренних рисков, становится очевидной необходимость внедрения комплексных мер безопасности. Промышленные предприятия сталкиваются с разнообразными рисками, такими как техногенные аварии, акты саботажа и киберпреступления, что делает стратегический подход к обеспечению безопасности неотъемлемой частью их успешного функционирования.

В данной работе были разобраны и проанализированы методы обеспечения комплексной безопасности на опасных производственных объектах.

Как известно, опасные производственные объекты – предприятия или их цехи, участки, площадки, а также иные производственные объекты [1], на которых:

1. Получаются, используются, перерабатываются, образуются, хранятся, транспортируются, уничтожаются в количествах, превышающих установленные законодательством Российской Федерации предельные количества, опасные вещества следующих видов:

- воспламеняющиеся вещества;
- окисляющие вещества;
- горючие вещества;

- взрывчатые вещества;
- токсичные вещества;
- высокотоксичные вещества;
- вещества, представляющие опасность для окружающей среды.

2. Используется оборудование, работающее под избыточным давлением более 0,07 МПа:

- пара;
- газа (в газообразном, сжиженном состоянии);
- воды при температуре более 115 °С;
- иных жидкостей при температуре, превышающей температуру их кипения под избыточным давлением 0,07 МПа;

3. Используются стационарно установленные грузоподъемные механизмы (за исключением лифтов, подъемных платформ для инвалидов);

4. Получаются, транспортируются, используются расплавы чёрных и цветных металлов, сплавы на основе этих расплавов с применением оборудования, рассчитанного на максимальное количество расплава 500 килограммов и более [2];

5. Ведутся горные работы (за исключением добычи общераспространённых полезных ископаемых и разработки россыпных месторождений полезных ископаемых, осуществляемых открытым способом без применения взрывных работ), работы по обогащению полезных ископаемых;

6. Осуществляется хранение или переработка растительного сырья, в процессе которых образуются взрывоопасные пылевоздушные смеси, способные самовозгораться, возгораться от источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления, а также осуществляется хранение зерна, продуктов его переработки и комбикормового сырья, склонных к самосогреванию и самовозгоранию.

Опасные производственные объекты в зависимости от уровня потенциальной опасности аварий на них для жизненно важных интересов личности и общества подразделяются в соответствии с критериями, указанными в приложении 2 к настоящему Федеральному закону, на четыре класса опасности [3]:

I класс опасности – опасные производственные объекты чрезвычайно высокой опасности;

II класс опасности – опасные производственные объекты высокой опасности;

III класс опасности – опасные производственные объекты средней опасности;

IV класс опасности – опасные производственные объекты низкой опасности.

Присвоение класса опасности опасному производственному объекту осуществляется при его регистрации в государственном реестре [4].

В современных условиях техногенные риски на опасных производственных объектах представляют собой серьезную угрозу для жизни и

здоровья людей, окружающей среды и экономики страны. Аварии и инциденты на ОПО приводят к значительным материальным потерям, экологическому ущербу и, что самое главное, человеческим жертвам. Обеспечение безопасности на ОПО является приоритетной задачей государства и требует комплексного подхода, включающего в себя применение различных методов и средств защиты.

Основным нормативным правовым актом в области промышленной безопасности является Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов». Указанный Федеральный закон определяет правовые, экономические и социальные основы обеспечения безопасной эксплуатации опасных производственных объектов и направлен на предупреждение аварий на опасных производственных объектах и обеспечение готовности эксплуатирующих опасные производственные объекты юридических лиц и индивидуальных предпринимателей к локализации и ликвидации последствий таких аварий.

Комплексный подход к обеспечению безопасности предполагает объединение различных систем и методов, основанных на детальном анализе рисков и угроз. Он охватывает не только физическую защиту объектов, но и информационную безопасность, экологическую безопасность, а также соблюдение нормативных требований и стандартов.

Промышленные объекты, играющие ключевую роль в экономике, подвержены множеству рисков, связанных с обеспечением безопасности. Эти риски могут возникать как из внешних факторов, так и из внутренних недостатков в системах управления безопасностью. В условиях современного производства, где автоматизация и автоматизированные системы становятся стандартом, комплексный подход к безопасности приобретает особую значимость.

Основные проблемы, с которыми сталкиваются промышленные предприятия в сфере безопасности, включают:

- устаревшие технологии (многие объекты продолжают использовать оборудование и технологии, не соответствующие современным требованиям безопасности);
- недостаток квалификации (работники часто имеют недостаточный уровень подготовки по вопросам безопасности, что повышает риск ошибок и аварий);
- неэффективное управление рисками (отсутствие системного подхода к выявлению и оценке рисков увеличивает вероятность инцидентов);
- киберугрозы (с ростом цифровизации увеличиваются риски кибератак, что требует внедрения новых защитных мер) [5].

В связи с этими проблемами, комплексная безопасность на опасных производственных объектах является важным условием для стабильной работы предприятий, охраны сотрудников и населения, а также снижения негативного влияния на окружающую среду [6]. Проанализировав все методы обеспечения комплексной безопасности на ОПО, была сформирована таблица 1.

Таблица 1 – Методы обеспечения комплексной безопасности на ОПО

Предупреждение аварий и инцидентов	Снижение масштаба последствий аварий	Обеспечение готовности к ликвидации последствий аварий	Физическая защита
Разработка и внедрение системы управления промышленной безопасностью	Установка систем аварийной защиты и блокировок	Создание аварийно-спасательных служб и формирований	Обеспечение охраны ОПО
Идентификация опасностей и оценка рисков	Использование средств коллективной и индивидуальной защиты	Разработка планов взаимодействия между различными службами и организациями	Установка систем видеонаблюдения и контроля доступа
Разработка планов локализации и ликвидации последствий аварий	Организация эвакуации персонала и населения	Проведение учений и тренировок по ликвидации последствий аварий	Проведение мероприятий по противодействию терроризму
Обучение персонала и проведение тренировок	Создание запасов материальных ресурсов для ликвидации последствий аварий	Создание систем оповещения и информирования населения	
Техническое обслуживание и ремонт оборудования		5. Разработка планов ликвидации аварий	

Проведенный анализ методов и инструментов защиты опасных производственных объектов позволяет сделать следующие выводы:

1. Риск-ориентированный подход является основополагающим принципом обеспечения промышленной безопасности на ОПО.

2. Комплексная система мониторинга позволяет эффективно контролировать состояние оборудования и своевременно выявлять потенциальные угрозы.

3. Современные методы анализа рисков обеспечивают качественную оценку возможных опасностей и помогают принимать обоснованные управленческие решения.

4. Диагностика оборудования на всех стадиях жизненного цикла является необходимым условием обеспечения безопасности.

5. Интегрированные системы защиты позволяют создать многоуровневую защиту объектов от возможных аварий и катастроф.

6. Автоматизированные системы контроля и управления обеспечивают оперативное реагирование на возникающие угрозы безопасности.

7. Информационное обеспечение играет ключевую роль в эффективном управлении промышленной безопасностью [7].

Для дальнейшего повышения уровня безопасности ОПО необходимо:

- развивать системы предиктивной диагностики;
- внедрять инновационные технологии мониторинга;
- совершенствовать нормативно-методическую базу;
- повышать квалификацию специалистов;

– создавать интегрированные системы управления безопасностью.

Реализация комплексного подхода к обеспечению безопасности позволит существенно снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций и повысить эффективность защитных мероприятий на опасных производственных объектах.

Список использованной литературы

1. Никитин, К. Д. Основы промышленной безопасности: учебное пособие / К. Д. Никитин. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т. – 2013. – 416 с.
2. Храмцов, Б. А. Промышленная безопасность опасных производственных объектов: учебное пособие / Б. А. Храмцов, А. П. Гаевой, И. В. Дивиченко. – Старый Оскол: ТНТ. – 2011. – 276 с.
3. Конституция Российской Федерации: официальный текст. – М.: Вече, 2008. – 48 с.
4. Опасные производственные объекты. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/3cc6edcf62c33ed74fd0d4636555b4996a2d468e/ (дата обращения 29.05.2025).
5. Обеспечение безопасности промышленных объектов – комплексный подход к защите и профилактике. – Режим доступа: <https://hanston.ru/press-centr/obespechenie-bezopasnosti-promyshlennyh-obektov-kompleksnyj-podhod-k-zaschite-i-profilaktike> (дата обращения 29.05.2025).
6. Положение об особенностях расследования несчастных случаев на производстве в отдельных отраслях и организациях: утв. постановлением Министерства труда и социального развития Российской Федерации № 73 от 24.10.2002 г. – М.: Стандартиформ. – 2015.
7. РД 04-355-00. Методические рекомендации по организации производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности на опасных производственных объектах: утв. приказом Госгортехнадзора России от 26.04.2000 № 49. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200005629> (дата обращения 29.05.2025).
8. Методы и средства для обеспечения комплексной безопасности на опасных производственных объектах [Электронный ресурс] : методические указания для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлению подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность / сост.: Е. В. Пояркова, О. А. Фролова; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбург. гос. ун-т", Каф. механики материалов, конструкций и машин. – Оренбург: ОГУ. – 2025. – 33 с. – Загл. с тит. экрана. – Режим доступа: http://artlib.osu.ru/web/books/metod_all/222419_20250604.pdf (дата обращения 29.05.2025).

INTEGRATED APPROACH TO ANALYSIS OF METHODS AND TOOLS FOR PROTECTION OF HAZARDOUS INDUSTRIAL FACILITIES

**Archipenko Tatyana Viktorovna, Edygeeva Albina Temirbulatovna,
Poyarkov Kliment Nikitich, 3rd year undergraduate students**

Orenburg State University

Abstract: *The article considers an integrated approach to the analysis of methods and tools for ensuring the safety of hazardous industrial facilities. Particular attention is paid to the systematization of modern methods of risk analysis, monitoring the state of facilities and industrial safety management. The issues of transition from risk analysis to risk management through the introduction of modern diagnostic systems and information technologies are studied. The main mechanisms for industrial safety management are presented.*

Keywords: *industrial safety, hazardous industrial facilities, technogenic safety, risk analysis, risk management, protection methods*

УСТОЙЧИВОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО: ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ БУДУЩЕГО

Алеманова Анна Михайловна, Загалко Эллина Вадимовна, студенты
бакалавриата, 2 курс

Пояркова Екатерина Васильевна, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой механики материалов, конструкций и машин

Оренбургский государственный университет

***Аннотация:** Статья посвящена теме устойчивого строительства с акцентом на экологически чистые материалы и технологии, которые способствуют более безопасному и эффективному использованию ресурсов в строительной отрасли. В условиях глобальных вызовов, таких как изменение климата и истощение природных ресурсов, устойчивое строительство становится необходимым подходом, направленным на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду.*

В работе рассматриваются ключевые аспекты устойчивого строительства, включая выбор экологически чистых материалов, переработку строительных отходов и внедрение энергоэффективных технологий. Проведен анализ как вредных, так и безопасных строительных материалов, а также приведены примеры экологически чистых альтернатив, таких как древесные и природные утеплители, а также переработанные материалы.

***Ключевые слова:** экологически чистые материалы, переработка строительных отходов, энергоэффективность зданий, устойчивое строительство.*

***Код и рубрика:** 67.00.00 Строительство. Архитектура*

Устойчивое строительство представляет собой комплексный подход в строительной отрасли, направленный на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду при одновременном улучшении экономических и социальных аспектов. Данная концепция возникла как ответ на растущие вызовы, связанные с изменением климата, истощением природных ресурсов и необходимостью достижения баланса между охраной окружающей среды, экономической жизнеспособностью и социальной справедливостью [1].

История устойчивого строительства восходит к энергетическим кризисам 1970-х годов, которые стимулировали переход к энергоэффективности зданий. Однако значительный импульс развитию концепции устойчивого строительства был дан в конце XX века под влиянием международных инициатив, таких как доклад комиссии Брундтланд «Наше общее будущее» (1987) [2]. Этот период ознаменовался появлением стандартов «зелёного» строительства.

Устойчивое строительство охватывает широкий спектр практик от выбора экологически чистых материалов до внедрения энергоэффективных технологий и стратегий сокращения отходов.

Строительные материалы могут существенно различаться по уровню безопасности для здоровья человека и окружающей среды. Экологически безопасные материалы, как правило, имеют природное происхождение и не выделяют вредных веществ. Их использование способствует формированию здорового микроклимата внутри помещений и снижает экологическую нагрузку.

В то же время существуют материалы, которые не только вредны, но и опасны для здоровья и окружающей среды. В процессе их производства применяются токсичные или канцерогенные добавки, которые выделяются в воздух и негативно влияют на здоровье людей. Обычно такие материалы не разлагаются естественным образом и при выбросе загрязняют почву, воду и воздух.

К числу вредных материалов относятся:

1. Утеплители на основе полиуретана, содержащие токсичные соединения;
2. Пенопласт, выделяющий стирол, способствующий развитию различных заболеваний;
3. Напольные покрытия, такие как линолеум и виниловые обои, выделяющие тяжелые металлы, накапливающиеся в организме и вызывающие заболевания;
4. Лакокрасочные материалы низкого качества, содержащие тяжелые металлы и токсичные вещества;
5. Бетон и железобетон, усиливающие электромагнитные поля и ухудшающие вентиляцию воздуха.

С другой стороны, существуют материалы, которые не оказывают вредного воздействия, а даже положительно влияют на состояние окружающей среды и здоровье человека. Экологически чистые материалы играют важную роль в устойчивом строительстве, способствуя снижению негативного воздействия и созданию здоровых жилых пространств.

В таблице 1 представлены примеры экологически чистых материалов, которые широко применяются в практике устойчивого строительства. Особое внимание уделено материалам, соответствующим актуальным нормативно-техническим документам, что обеспечивает их безопасность, качество и эффективность в строительных проектах. Включение ссылок на действующие стандарты и регламенты подтверждает соответствие этих материалов требованиям по экологической безопасности, теплоизоляции, прочности и долговечности. Представленные материалы способствуют снижению негативного воздействия строительной отрасли на окружающую среду, повышению энергоэффективности зданий и созданию комфортных условий для проживания.

Применение экологичных строительных материалов в сочетании с энергоэффективными технологиями, обеспечивает комплексный подход к устойчивому строительству. Переход на экологически чистые материалы, такие как древесные плиты, льняная вата и рециклированный металл, снижает углеродный след на этапе производства и эксплуатации зданий.

Таблица 1 – Экологичные материалы, применяемые в устойчивом строительстве

Материал		Описание	Нормативный документ
Древесные материалы	Древесно-стружечные плиты (ДСП)	Изготавливаются из древесных стружек, связанных смолой под высоким давлением. Легкие, прочные, обладают хорошим теплоизоляционными свойствами. Используются для стен, перегородок, мебели	[3], [4]
	Клееный брус	Конструкционные элементы из склеенных слоев древесины. Высокая прочность и стабильность. Используются в жилых и хозяйственных зданиях.	[4], [5]
Природные утеплители	Целлюлозная вата	Утеплитель из переработанных газет и картона. Отличные теплоизоляционные свойства, биоразлагаем. Используется для утепления стен и крыш	[6], [7]
	Льняная вата	Утеплитель из волокон льна. Хорошо сохраняет тепло, огнестойкий. Применяется в жилом строительстве.	[8], [9]
Материалы на основе цемента	Цементные панели	Панели из цемента, песка, волокон. Прочные, влагостойкие, подходят для наружных стен и крыш	[10], [11]
	Цементные блоки	Используются для несущих и заполняющих конструкций. Хорошая теплоизоляция и прочность.	[11], [12]
Материалы рециклинга	Переработанное стекло	Используется для производства изоляционных материалов и компонентов. Снижает нагрузку на природные ресурсы	[13], [14]
	Переработанный металл	Применяется для каркасов зданий, арматуры и конструктивных элементов. Снижает выбросы CO ₂ и способствует ресурсосбережению.	[15], [16]

Одновременно, внедрение энергоэффективных решений, например, многокамерных окон с энергосберегающими стеклопакетами, значительно уменьшает потребление энергии на отопление и охлаждение, дополнительно сокращая негативное воздействие на окружающую среду и повышая комфорт проживания. В итоге, синтез этих подходов способствует созданию не только экологически чистых, но и экономически выгодных, а также комфортных зданий, отвечающих требованиям устойчивого развития.

Энергоэффективные технологии также являются неотъемлемой частью устойчивого строительства. Они позволяют снизить энергопотребление зданий и, соответственно, снизить выбросы парниковых газов. К таким технологиям можно отнести:

1. Энергоэффективные окна и двери, так как установка многокамерных окон с энергосберегающими стеклопакетами позволяет минимизировать теплопотери и улучшить теплоизоляцию здания. Использование специальных утепляющих материалов в рамах окон и дверей помогает предотвратить проникновение холода в помещение и, таким образом, уменьшить потребление энергии на отопление.

2. Тепловые насосы, которые используют энергию из воздуха, почвы или воды для отопления помещений и подогрева воды. Они эффективно преобразуют энергию из окружающей среды в тепло, обеспечивая комфортный климат внутри здания при минимальных затратах электроэнергии.

3. Системы энергосбережения в виде установки солнечных панелей на крыше здания, позволяющих генерировать чистую энергию из солнечного света, снижая зависимость от традиционных источников энергии и уменьшая выбросы парниковых газов. Вместе с тем, ветряные генераторы могут быть использованы для производства электроэнергии из ветра, что является устойчивым источником энергии без выбросов вредных веществ.

4. Термоизоляцию и вентиляцию, потому как применение современных теплоизоляционных материалов для утепления стен и крыши здания помогает сохранить тепло внутри и снизить потребление энергии на отопление. Также к этой группе следует отнести системы вентиляции с рекуперацией тепла. Эти системы позволяют обменивать воздух в помещении, сохраняя при этом тепло, которое обычно теряется при выталкивании старого воздуха наружу, что помогает поддерживать свежий воздух внутри помещения, не увеличивая энергопотребление. Применение подобных энергоэффективных технологий не только способствует сокращению энергопотребления зданий, но и улучшает качество жизни его обитателей, обеспечивая комфортное проживание и снижая негативное воздействие на окружающую среду.

В итоге комплексный подход к устойчивому строительству, включающий как энергоэффективные технологии, так и «зелёные» материалы, является одним из наиболее эффективных способов минимизации экологического следа зданий. Энергоэффективность достигается за счёт использования тепловых насосов, солнечных панелей, улучшенной теплоизоляции и систем вентиляции с рекуперацией тепла, что сокращает потребление энергии и снижает выбросы парниковых газов. Вместе с тем применение «зелёных» технологий, ориентированных на возобновляемые источники энергии, сбор и повторное использование дождевой воды, а также улучшение качества воздуха и воды, поднимает устойчивое строительство на новый качественный уровень. Эти технологии обеспечивают минимальное воздействие на окружающую среду на всех этапах жизненного цикла здания. Особое внимание заслуживает использование систем фильтрации воздуха, методов водоочистки и инновационных решений, позволяющих сделать здание более эффективным с точки зрения ресурсопотребления.

Применение «зелёных» технологий и экологичных материалов, приведённых в таблице 2, позволяет существенно снизить негативное воздействие строительной отрасли на окружающую среду. Однако эффективность этих методов напрямую зависит от правильного управления отходами, поскольку несанкционированная утилизация строительных материалов приводит к серьёзным экологическим проблемам, включая загрязнение почвы и воды опасными веществами.

Таблица 2 — Экологически чистые материалы

Материал	Описание
Геотекстиль из возобновляемых материалов	Изготавливается из натуральных волокон (хлопок, лен, джут) и используется для укрепления почвы и предотвращения эрозии
Биокомпозитные материалы	Содержат природные волокна (конопля, бамбук) и биологические связующие. Они легкие, прочные и уменьшают использование нефтепродуктов
Рециклированный бетон	Получается из переработанных бетонных отходов, что снижает потребление ресурсов и количество отходов
Экологически чистые изоляционные материалы	Используют органические материалы (целлюлоза, гипс) вместо токсичных синтетических, обеспечивая безопасность и энергоэффективность

Переработка строительных отходов является неотъемлемой частью устойчивого строительства и требует пристального внимания к вопросам правильной утилизации и повторного использования [17]. Эффективное управление отходами способствует уменьшению объёмов несанкционированных свалок, предотвращает загрязнение почвы, воды и воздуха токсичными веществами и тяжелыми металлами, что подтверждается рядом исследований [18].

В таблице 3 представлены основные негативные последствия несанкционированной утилизации строительных отходов и их характеристика, что подчёркивает необходимость внедрения систем переработки и повторного использования отходов в строительной отрасли.

Таблица 3 — Негативные последствия утилизации строительных материалов

Негативные последствия	Характеристика последствий
Загрязнение почвы и воды	Отходы часто содержат тяжёлые металлы, которые делают землю непригодной для сельского хозяйства или промышленного использования. При контакте атмосферных осадков с отходами образуется свалочный фильтрат, который просачивается в подземные воды, а затем и в открытые водоёмы
Загрязнение воздуха	Некоторые строительные материалы, такие как бетон и кирпич, при разложении выделяют парниковые газы, которые приводят к респираторным проблемам и изменению климата
Пожары	Неправильно утилизированный мусор (жирные тряпки, легковоспламеняющиеся жидкости и другие) может стать причиной пожара
Влияние на животный и растительный мир	Несанкционированные свалки приводят к уничтожению естественных экосистем, потере среды обитания, загрязнению пищи для многих животных, насекомых и птиц
Визуальное загрязнение ландшафтов и городских районов	Свалки могут быть визуалью непривлекательными, снижать эстетическую ценность окружающих районов

Переработка строительных отходов позволяет повторно использовать до 80% отходов:

— бетон и кирпич перерабатываются в щебень для дорожного покрытия, фундаментов и нового бетона;

— металл (арматура, профили) направляется на повторную плавку и производство новых конструкций;

— стекло дробится и добавляется в производство нового стекла и строительных смесей;

— дерево измельчается для производства ориентированно-стружечных плит, древесно-стружечных плит, фанеры и биотоплива;

— пластик перерабатывается в теплоизоляционные материалы, трубы, композиты.

В России с 2025 года планируется реализация национального проекта «Экологическое благополучие» [19], который включает развитие переработки, снижение загрязнения и поддержку устойчивых строительных технологий.

Таким образом, эффективное управление ресурсами является ключом к созданию устойчивого будущего. Переход к циркулярной экономике, где отходы становятся ресурсами, позволяет минимизировать негативное воздействие на окружающую среду и создать более рациональные и эффективные системы. Приведём несколько примеров переработки строительных материалов, представленных в таблице 4.

Таблица 4 – Примеры переработок строительных материалов

Пример переработки	Характеристика
Рециклинг	Это процесс переработки строительных материалов в новые компоненты. Например: бетон может быть дроблен и использован в качестве вторичного щебня для дорожного строительства или в качестве заполнителя для новых бетонных смесей. Это позволяет значительно сократить объемы отходов и снизить потребность в новых ресурсах
Компостирование	Это метод переработки органических отходов, таких как древесина и растительные остатки. Эти материалы могут быть переработаны в компост, который используется в озеленении и сельском хозяйстве. Компостирование не только уменьшает объем отходов, но и создает полезное удобрение для почвы
Повторное использование строительных материалов	Это еще один эффективный способ переработки. Целые элементы, такие как кирпичи, доски и металлические конструкции, могут быть использованы в новых строительных проектах. Это позволяет сократить потребность в новых материалах и уменьшить количество отходов
Сортировка отходов	Сортировка строительных отходов на фракции позволяет направить каждый тип материала на специализированную переработку. Это увеличивает шансы на повторное использование и переработку. Например, металл может быть отправлен на переработку, а древесина — на компостирование

Таким образом, эффективные методы переработки, включающие рециклинг, компостирование, повторное использование и тщательную сортировку, являются основой устойчивого управления строительными отходами. Данные методы не только минимизируют негативное воздействие на окружающую среду, но и открывают новые возможности для экономии ресурсов и повышения эффективности строительной отрасли. Рассмотрим подробнее широкие экологические выгоды, которые достигаются благодаря этим инициативам.

Переработка строительных отходов приносит значительные экологические преимущества.

Во-первых, это снижение объемов свалок. Переработка уменьшает количество отходов, отправляемых на свалки, что снижает риск загрязнения почвы и водоемов.

Во-вторых, экономия природных ресурсов. Повторное использование переработанных материалов сокращает необходимость в добыче новых ресурсов, что помогает сохранить экосистемы.

В-третьих, снижение выбросов парниковых газов. Уменьшение производства новых строительных материалов приводит к снижению выбросов CO₂ и других парниковых газов.

В четвёртых, экономия энергии, процессы переработки часто требуют меньше энергии по сравнению с производством новых материалов, что способствует более устойчивому использованию ресурсов.

Ниже приведены примеры самых эффектных, современных экологически устойчивых зданий и объектов, демонстрирующих эффективное применение принципов устойчивого строительства и внедрения энергоэффективных технологий.

1. *Отель Баухофштрассе (Германия), архитектурная студия Von M.*

Отель Bauhofstrasse, построенный еще в 2014 году, является ярким примером интеграции принципов устойчивого строительства в современную архитектуру. Этот белоснежный отель, облицованный плиткой, стал первым углеродно-нейтральным зданием в городе Людвигсбург (рисунок 1). Фундамент выполнен из традиционного бетона, однако основная конструкция состоит из деревянных модулей. По утверждению архитекторов студии Von M., такое сочетание материалов позволяет нейтрализовать углеродный след, связанный с использованием бетонных конструкций.

В рамках «зелёной» повестки данный объект демонстрирует успешное сочетание экологически чистых материалов и энергоэффективных решений, направленных на снижение углеродного следа и минимизацию воздействия на окружающую среду. Использование деревянных модулей, которые были изготовлены из местного сырья и произведены в Австрии, вместо традиционных бетонных конструкций существенно сокращает выбросы парниковых газов, а применение местных возобновляемых ресурсов способствует поддержанию баланса между экономической эффективностью и экологической ответственностью. Таким образом, отель Bauhofstrasse не только отвечает

современным стандартам «зелёного» строительства, но и служит примером для будущих проектов, ориентированных на устойчивое развитие и заботу о природных ресурсах.



Рисунок 1 – Отель Баухофштрассе, Германия

2. Солнечная электростанция рядом с городом Севилья (Испания).

Данный объект представляет собой одну из первых крупных попыток человечества использовать энергию солнца для производства электроэнергии. Сердцем станции является гигантская бетонная башня высотой 115 метров, окружённая 624 зеркалами, которые фокусируют солнечный свет на вершине башни, где расположены солнечные приёмники и паровая турбина. Эта турбина управляет генератором, вырабатывающим электричество. Несмотря на высокую техническую сложность и определённые потери тепла, солнечная электростанция Planta Solar 10 демонстрирует перспективность технологий концентрированной солнечной энергии для масштабного производства экологически чистой электроэнергии. Солнечная электростанция Planta Solar 10 была введена в эксплуатацию в 2011 году и до сих пор остаётся одним из ключевых проектов в области возобновляемой энергетики. Её технологии концентрированной солнечной энергии продолжают играть важную роль в мировой «зелёной повестке», способствуя переходу к устойчивому и экологически чистому производству электроэнергии.

3. Офисное здание The Edge (Амстердам, Нидерланды).

The Edge – 15-этажное офисное здание, признанное одним из самых экологичных в мире. Построенное в 2015 году, оно использует энергоэффективное освещение, солнечные панели и системы сбора дождевой воды, что позволяет экономить около 500 000 литров воды ежегодно. Стекланный фасад здания максимально использует дневной свет, а солнечные батареи, расположенные на южной стороне, обеспечивают достаточный уровень энергии для климат-контроля и функционирования электромобилей сотрудников. Кроме того, здание оснащено инновационными системами автоматизации, позволяющими оптимизировать освещение и температуру в

соответствии с предпочтениями пользователей, что способствует снижению энергопотребления на 70–80 % по сравнению с аналогичными зданиями. Проект получил высшую оценку по методологии экологической сертификации BREEAM – 98,36 %, что делает его одним из самых экологически эффективных коммерческих зданий в мире [20].



Рисунок 2 – Солнечная электростанция рядом с городом Севилья, Испания

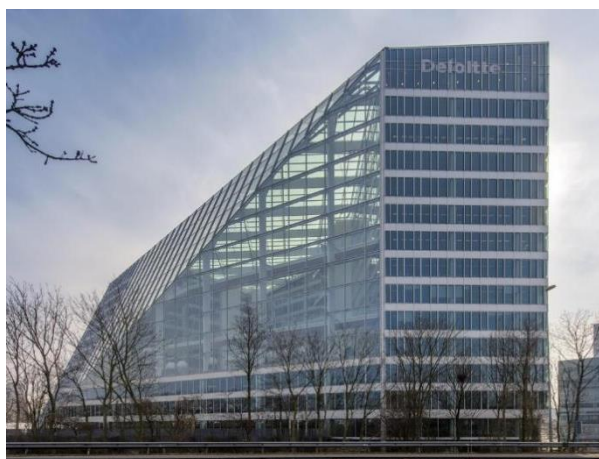


Рисунок 3 – The Edge – офисное здание в финансовом районе Zuidс в Амстердаме, Нидерланды

В современный период наблюдается значительный рост внимания со стороны строительных компаний и архитектурных бюро к вопросам экологической устойчивости и «зелёной» повестки. Всё больше организаций стремятся внедрять инновационные экологичные материалы и энергоэффективные технологии, понимая важность снижения негативного воздействия на окружающую среду и создания комфортной, безопасной среды для жизни и работы. Приведённые в статье примеры зданий, таких как отель

Bauhofstrasse, солнечная электростанция Planta Solar 10 и офисное здание The Edge, служат своеобразными основоположниками новой эры в строительстве, задавая стандарты и вдохновляя на дальнейшее развитие устойчивых практик.

Тема устойчивого строительства и экологически чистых технологий остаётся крайне актуальной и будет сохранять свою значимость в ближайшие десятилетия. Постоянное совершенствование нормативной базы, развитие инноваций и повышение общественного сознания обеспечивают устойчивый рост интереса к «зелёным» решениям, что способствует формированию более экологически ответственного строительного сектора и устойчивого развития общества в целом.

Список использованной литературы

1. Киберт Ч.Дж. Устойчивое строительство: Проектирование и доставка экологически чистых зданий // Ч. Дж. Киберт. – 4-е изд. – Wiley. – 2016. – 608 с.
2. Брундтланд, Г. Наше общее будущее / Г. Брундтланд. – ООН, 1987.
3. ГОСТ 10632-2014. Плиты древесностружечные для строительных и хозяйственных целей. Технические условия. – М.: Стандарт. – 2014. – 15 с.
4. СНиП 31-105-2002. Деревянные конструкции. – М.: Госстрой России, 2002. – 48 с.
5. ГОСТ 30974-2002. Древесина клееная строительная. – М.: Стандарт, 2002. – 20 с.
6. ГОСТ 31360-2007. Утеплители на основе целлюлозных волокон. – М.: Стандарт, 2007. – 12 с.
7. СанПиН 2.1.2.2645-10. Гигиенические требования к строительным материалам. — М., 2010.
8. ГОСТ Р 56734-2015. Материалы утеплительные. Общие технические условия. – М.: Стандарт, 2015. – 18 с.
9. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. – М.: Госстрой России, 2003. – 56 с.
10. ГОСТ 22950-90. Панели стеновые цементно-стружечные. – М.: Стандарт, 1990. – 25 с.
11. СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции. – М.: Госстрой СССР, 1987. – 70 с.
12. ГОСТ 6133-99. Блоки бетонные и железобетонные стеновые. – М.: Стандарт, 1999. – 30 с.
13. ГОСТ 111-2001. Стекло строительное. – М.: Стандарт, 2001. – 40с.
14. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. – М., 2012.
15. ГОСТ 5781-82. Арматура стальная для железобетонных конструкций. – М.: Стандарт, 1982. – 15 с.

16. СНиП II-23-81. Бетонные и железобетонные конструкции. – М.: Госстрой СССР, 1981. – 60 с.
17. Шпигель, Р. Зеленые строительные материалы: Руководство по выбору продукции и спецификации // Р. ШПИГЕЛЬ, Д. Медоуз. – 3-е изд. – Wiley. – 2017. – 400 с.
18. Международный кодекс экологического строительства (IgCC) // Международный совет по кодификации. – 2018. – ISBN: 978-1-60983-725-9. – Режим доступа: <https://codes.iccsafe.org/content/IGCC2018/preface> (дата обращения 31.05.2025).
19. Национальный проект «Экологическое благополучие». – Режим доступа: <http://government.ru/rugovclassifier/919/events/> (дата обращения 31.05.2025).
20. Технологии эcobудущего: 6 самых «зеленых» зданий в мире. – Режим доступа: <https://digital-build.ru/tehnologii-ekobudushhego-6-samyh-zelenyh-zdaniy-v-mire/> (дата обращения 29.05.2025).

SUSTAINABLE CONSTRUCTION: ENVIRONMENTALLY FRIENDLY MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR THE FUTURE

Alemanova Anna Mikhailovna, Zagalko Ellina Vadimovna,
undergraduate students, 2nd year

Poyarkova Ekaterina Vasilievna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines

Orenburg State University

Abstract: *The article is devoted to the topic of sustainable construction with an emphasis on environmentally friendly materials and technologies that contribute to a safer and more efficient use of resources in the construction industry. In the context of global challenges such as climate change and depletion of natural resources, sustainable construction is becoming a necessary approach aimed at minimizing the negative impact on the environment.*

The paper considers key aspects of sustainable construction, including the choice of environmentally friendly materials, recycling of construction waste and the introduction of energy-efficient technologies. An analysis of both harmful and safe building materials is carried out, and examples of environmentally friendly alternatives are given, such as wood and natural insulation, as well as recycled materials.

Keywords: *environmentally friendly materials, recycling of construction waste, energy efficiency of buildings, sustainable construction.*

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПАУНДЫ: СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ, МЕТОДЫ ПРОИЗВОДСТВА И ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Тимощенко Даниил Сергеевич, студент бакалавриата, 1 курс
Решетов Сергей Юрьевич, доцент кафедры механики материалов,
конструкций и машин, кандидат технических наук, доцент

Оренбургский государственный университет

Аннотация: В работе рассмотрены основные разновидности компаундных материалов, применяемых в различных отраслях промышленности от строительства до аэрокосмической отрасли. В статье освещается классификация и области применения компаундов в зависимости от химического состава, назначения и области применения в промышленности. Особое внимание уделено опыту использования компаундных материалов в электротехнической промышленности.

Ключевые слова: бетонит, полимеризация, термореактивный и термопластичный компаунды.

Код и рубрика: 45.09.37 Диэлектрические материалы.

Под компаундами понимают пропиточные или заливочные материалы, не содержащие летучих растворителей, предназначенные для заливки или герметизации электронного и электрического оборудования. Эти комплексные изоляционные материалы отличаются высокой влагостойкостью, виброустойчивостью, теплопроводностью и повышенным пробивным напряжением. Поэтому их используют как в качестве изоляционного материала, так и в качестве эффективного средства взрывозащиты.

Также компаундом называют материал для заполнения кабелей и вант в висячих и вантовых мостах, защищающий кабели (ванты) от воздействия агрессивных сред. Полимерные компаунды применяются для устранения резонансных колебаний электронных блоков, однако при этом существенно ухудшаются тепловые режимы и ремонтпригодность. Иногда это делается намеренно: чтобы усложнить реинжиниринг (ремонт) или стимулировать продажу запасных частей и/или конечной продукции. Компаунды – это заранее изготовленные сложные композиции, включающие в себя полимерную основу (связующее) и необходимый состав функциональных добавок, наполнителей и/или красителей [1].

В зависимости от типа полимерной основы (как и пластмассы) компаунды классифицируются следующим образом:

– *термопластичные* – полимерные материалы, твёрдые при комнатной температуре, которые размягчаются и приобретают пластичность при нагреве, а при охлаждении вновь затвердевают;

– *термореактивные* – изначально могут находиться в жидком или твёрдом состоянии; при воздействии температуры, влаги и/или отвердителей с

катализаторами происходит процесс сшивки (отверждения). Такие материалы применяются однократно, поскольку после отверждения их нельзя повторно расплавить или растворить [2].

В структуре компаунда все материалы, будут химически связаны с минералогической основой, природным На-бентонитом.

Термопластичные компаунды производятся на основе термопластичных полимеров и могут быть переработаны повторно. Термореактивные компаунды изначально могут находиться в жидком или твердом виде. Они подвергаются сшивке под воздействием температуры, влаги и/или отвердителей и катализаторов [3, 4].

Бентонит – натуральный минерал, основным компонентом которого является монтмориллонит. Материал формируется в результате изменения вулканического пепла под воздействием воды. Главное преимущество бентонита заключается в его способности поглощать влагу. При гидратации гранулы этого материала увеличиваются примерно в шестнадцать раз, преобразовываясь в плотный гель. Поэтому применение компаундов позволяет повысить эффективность дозирования компонентов в процедуре смесеприготовления, сократить конструкцию комплекса облегчить и упростить систему управления и контроля этапа приготовления смеси.

Кроме того, технология изготовления компаундов открывает возможность осуществлять предварительную обработку и настраивать характеристики связующего состава. Например, активировать бентонит, настраивать текучесть его связующего, равномерно распределять противозалипающие компоненты в объеме связующего, улучшать условия регенерации смесей за счет равномерного удаления дисперсных компонентов порошковой фракции с мелкими частицами. Использование компаундов позволяет решить одну из задач утечек порошкообразных веществ при вентиляции и улучшить санитарно-гигиенические условия труда.

Эпоксидные компаунды обладают особыми физико-химическими характеристиками, что делает их широко применяемыми в различных сферах. В затвердевшем виде они демонстрируют высокую стойкость к механическим воздействиям и химическим веществам, практически не дают усадки и не выделяют летучих веществ при использовании. Эпоксидные компаунды обладают отличными электропроводящими свойствами, что делает их незаменимыми в электротехнической сфере, где важна надежность и долговечность изоляционных материалов.

Полиуретановые компаунды находят применение в электротехнике для изоляционных целей и в промышленности для формовки. Особенно популярны составы для полов на разных основаниях, способные выдерживать температуры 100-110 °С и повышенную влажность. Полиуретановые материалы используются при сильных нагрузках и при необходимости высокого качества внешнего вида. Среди их преимуществ – высокая адгезия, прочность, устойчивость к вибрациям, отсутствие вредных компонентов и самовыравнивающаяся структура. Добавки, такие как стекловолокно, улучшают технические характеристики и снижают себестоимость. Двухкомпонентные

полиуретановые составы применяются для герметизации, заливки и изоляции электрооборудования, а также при изготовлении изделий методом свободной заливки.

Силиконовые смазочные компаунды, обладающие вязкой структурой и отличными диэлектрическими свойствами, являются высокоэффективными материалами для герметизации электрических соединений высоковольтных устройств [4, 5]. Эти материалы обеспечивают надежную защиту от влаги, агрессивных сред и коррозии, а также снижают риск коротких замыканий. Дополнительным преимуществом силиконовых смазок является их высокая термостойкость – они могут эксплуатироваться в диапазоне температур от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Полипропиленовые компаунды – это комбинированные материалы, созданные на базе полипропилена и дополненные различными наполнителями. В их состав могут входить стекловолокно, минеральные добавки, антипирены и другие функциональные компоненты. Такие материалы обеспечивают высокую электрическую изоляцию при широком диапазоне температур, что делает их подходящими для использования в условиях экстремальных температурных режимов. Полипропиленовые компаунды также обладают высокой стойкостью к агрессивным средам.

Виды и области применения компаундов по способу отверждения и назначению

Компаунды, которые затвердевают при обычной комнатной температуре, не требуют дополнительного нагрева для перехода в твердое состояние. Их используют для защиты электрооборудования. Процесс затвердевания у таких материалов занимает примерно четыре часа.

Термоотверждаемые компаунды твердеют в результате необратимой химической реакции, в результате которой формируется трёхмерная структура полимера. Такие материалы отличаются высокой механической прочностью, стойкостью к внешним воздействиям и долгим сроком службы.

УФ-отверждаемые для них быстрый и эффективный способ полимеризации – ультрафиолетовое (УФ) затверждение, когда материал застывает под действием УФ-лучей за считанные секунды. Такой метод широко применяется в микроэлектронике и изготовлении оптических элементов. Эти материалы отличаются высокой прозрачностью и хорошей стойкостью к химическим веществам.

Заливочные компаунды широко используются при производстве датчиков, формируя корпуса и обеспечивая необходимую изоляцию. Они обладают хорошей теплопроводностью, защищают от преждевременного износа и улучшают эксплуатационные характеристики систем.

Обволакивающие материалы применяются для заполнения и пропитки схем радиоэлектронных устройств, компонентов и элементов электрооборудования, а также деталей электронных приборов. Они обеспечивают долговечность и стабильность работы в различных условиях.

Клеевые и герметизирующие составы представляют собой универсальные материалы, предназначенные для соединения различных оснований, таких как

металлы и их сплавы, керамика, стекло, бетон, дерево и некоторые виды полимерных материалов. Они отличаются высокой термостойкостью и стойкостью к воздействию агрессивных веществ, таких как масла, бензин, вода, кислоты и щёлочи. Герметизирующие составы обеспечивают защиту электрооборудования от проникновения влаги, воздуха, конденсата и химических веществ. Некоторые из них используют при изготовлении электротехнических элементов, например, крышек, корпусов и разъемов [6].

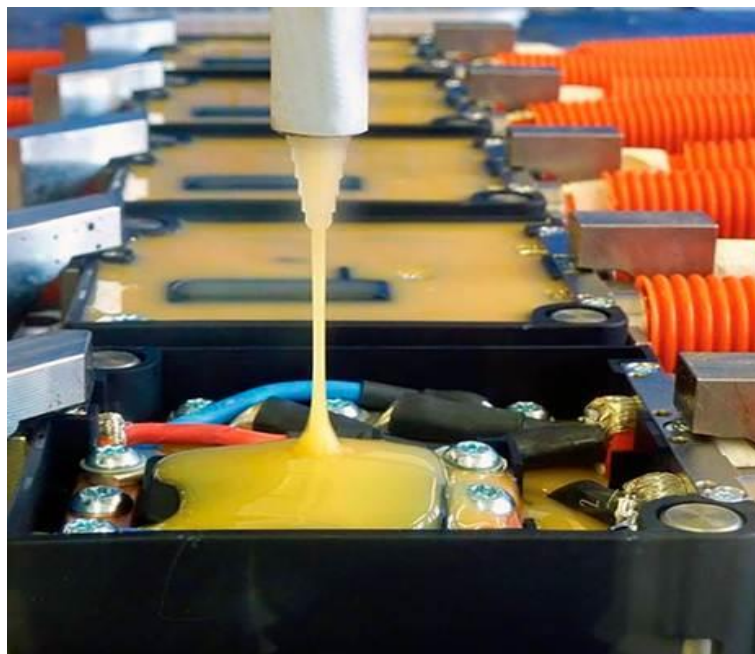


Рисунок 1 – Пример герметизации электрического оборудования [7]

Возможна тепловая активация процесса отверждения, но не выше $+60^{\circ}\text{C}$. Наблюдается нелинейная зависимость скорости отверждения от температуры. В зависимости от температуры и влажности можно изменять количество катализатора для увеличения или уменьшения жизнеспособности смеси. Использование гибких литевых форм, изготовленных из "Пентэласт-710", при температурах свыше $+200^{\circ}\text{C}$ может привести к постепенной утрате их эластичности. Нагрев выше $+250^{\circ}\text{C}$ не рекомендуется.

Важно отметить, что при работе с компаундами необходимо строго соблюдать технику безопасности. Нагревание выше $+200^{\circ}\text{C}$ может негативно сказаться на эластичности материалов, а превышение $+250^{\circ}\text{C}$ не рекомендуется. Работники должны быть обучены и обеспечены специальными средствами защиты, чтобы минимизировать риски, связанные с токсичными веществами, выделяемыми в процессе работы с незатвердевшими компаундами.

Компаунды широко используются для заливки и пропитки схем радиоаппаратуры, узлов и компонентов электроаппаратуры, а также деталей электронных устройств (см. рисунок 2). Данные компаунды делятся на несколько категорий: пропиточные, литевые, обволакивающие и заливочные. При выборе подходящего материала для выполнения конкретных задач важно учитывать, что различные типы компаундов могут затвердевать как при

комнатной температуре, так и с дополнительным нагревом. Промышленное производство материалов в соответствии с технологическими стандартами обеспечивает отличные эксплуатационные характеристики.



Рисунок 2 – Заливка компаунда [8]

Заливочный компаунд активно используется в радиоэлектронике для герметизации компонентов, электрической изоляции токосъемных устройств, трансформаторов и обмоток якорей. С его помощью осуществляется изоляция соединений и концевых муфт кабелей, полупроводниковых устройств и печатных плат. В отвержденном состоянии компаунды позволяют: формировать необходимые изделия, защищать изделия от воздействия агрессивной среды, пыли, влаги, растворителей и предохранять их от ударов и других механических воздействий, обеспечивать необходимый температурный режим эксплуатации и конструктивную целостность всего устройства. В настоящее время изоляция силовых кабелей может выполняться различными материалами в зависимости от конструктивных особенностей. Заливочный компаунд гарантирует отсутствие проводимости, сохраняет монолитность, форму и тепловой режим кабеля, защищая его от внешних воздействий. Герметизация с использованием этого материала возможна для изделий любой формы и конфигурации. Специалисты компаний, занимающихся производством и реализацией диэлектриков, помогут выбрать или разработать компаунд, наиболее подходящий для конкретного изделия с учетом комплекса необходимых свойств.

Расплавленный состав перемешивают с помощью нагретого металлического прута или ложки. Необходимо учитывать, что эпоксидные компаунды в жидком или незатвердевшем состоянии выделяют токсичные вещества. Работы могут выполнять только сотрудники, прошедшие соответствующий инструктаж. Рабочие обеспечиваются специальной одеждой и средствами индивидуальной защиты. Важно быть внимательным, избегать прямого контакта с веществом, поддерживать рабочее место в чистоте и

обеспечивать хорошую вентиляцию помещений. Загрязненный инструмент можно очистить с помощью ацетона, а руки следует мыть с мылом не только по окончании работ, но и во время перерывов. Эпоксидный компаунд помещают в специально предназначенные контейнеры для хранения в герметичном состоянии. Емкости маркируются соответствующими надписями. Жидкие электроизоляционные материалы, даже в запечатанных сосудах, необходимо размещать в помещениях с хорошей вентиляцией. В зависимости от типа материал обладает определенными особенностями применения. Однако соблюдение правил безопасности при работе с компаундом является неотъемлемой частью технологического процесса.

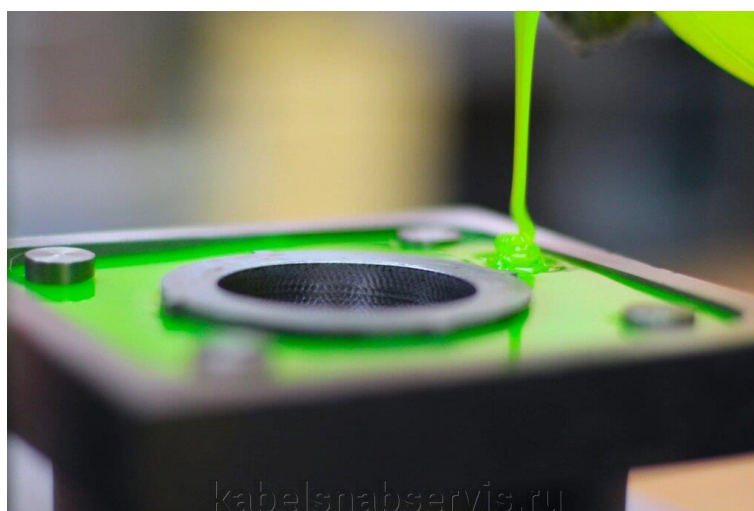


Рисунок 3 – Литье полиуретана [9]

Использование компаундов в промышленности, особенно в области радиоэлектроники и электроаппаратуры, играет ключевую роль в обеспечении надежности и долговечности электронных устройств. Эти полимерные материалы, включая пропиточные, литьевые, обволакивающие и заливочные компаунды, обеспечивают защиту от внешних воздействий, электрическую изоляцию и сохранение необходимых эксплуатационных характеристик.

Таким образом, правильный выбор компаунда и соблюдение всех мер предосторожности являются основой успешной работы с этими материалами. Это гарантирует не только высокое качество конечного продукта, но и безопасность работников, что является приоритетом в любой производственной среде.

Основные требования техники безопасности при работе с компаундом

При использовании жидких электроизоляционных составов необходимо строго соблюдать правила охраны труда. Для нагрева кабельной массы используют профессиональную жаровню и специальную металлическую посуду. Процесс нагрева требует контроля, поскольку при кипении вещества возможно воспламенение.

Разогретый компаунд заливают в брезентовые перчатки и защитные очки. Недопустимо попадание жидкости в смесь. Для перемешивания расплавленного

состава используют нагретый металлический стержень или ложку. Следует помнить, что эпоксидные составы в жидком или незатвердевшем виде выделяют токсичные пары.

Стоимость электроизоляционных материалов остается доступной для любого бюджета, а высокое качество достигается точным соблюдением технологии и правил техники безопасности:

- к работе допускаются только сотрудники, прошедшие инструктаж;
- работники обеспечиваются специальной рабочей формой и средствами индивидуальной защиты;
- необходимо соблюдать осторожность, избегать прямого контакта с веществом, поддерживать чистоту рабочей зоны и обеспечивать хорошую вентиляцию помещений;
- загрязненный инструмент можно очистить с помощью ацетона, а руки следует мыть с мылом не только после завершения работы, но и во время перерывов.

Эпоксидный компаунд хранят в специально предназначенной для этого таре в герметичной упаковке. Ёмкости маркируют соответствующими надписями. Жидкие электроизоляционные материалы, даже в закрытом сосуде, рекомендуется хранить в помещениях с хорошей вентиляцией.

В зависимости от вида материала он имеет свои особенности применения. Однако соблюдение правил техники безопасности при работе с компаундом является неотъемлемой частью технологического процесса.

Современные инновации и перспективы развития рынка полимерных компаундов

Будущее развитие сферы полимерных компаундов во многом определяется возможностями импортозамещения, основанными на достижениях российских научных исследований [14, 15]. Особое значение при этом имеют инновационные разработки отечественных ученых, которые помогают не только заменить импортные материалы, но и создать конкурентоспособную продукцию российского производства.

Самыми крупными российскими производителями, по данным отраслевого портала переработчиков пластмасс PLASTINFO.RU [12], в настоящее время являются такие компании как НПП «ПОЛИПЛАСТИК» (Саратовская область), «МЕТАКЛЕЙ» (Брянская область), «Камский завод полимерных материалов» (Республика Татарстан).

Одним из примеров передовых инновационных решений является силиконовый компаунд «Пентэласт» (рисунок 4), разработанный группой российских специалистов, получивший общее название «ТРОСЛОК» [10].

Этот компаунд изготовлен из отечественного сырья и предназначен для надежной фиксации стальных канатов в муфтах с помощью холодной заливки. Он превосходит по своим характеристикам зарубежные аналоги, обеспечивая исключительную прочность соединения, длительный срок службы и устойчивость к механическим нагрузкам, что делает его особенно привлекательным для промышленного применения.



Рисунок 4 – Компаунд от производителя «ТРОСЛОК» [11]

Заключение

Полимерные компаунды, прошедшие путь от простых изоляционных материалов до передовых технологических решений, стали неотъемлемой частью современной промышленности [13]. Их уникальная способность сочетать электроизоляционные свойства, термостойкость и механическую прочность позволяет решать задачи в самых сложных сферах – от микроэлектроники до аэрокосмических систем.

В настоящее время рынок полимерных компаундов быстро растет и расширяется. Для широкого внедрения инновационных решений необходимы дополнительные исследования в области полимерных материалов, а также активное взаимодействие науки и производства. Современные разработки открывают новые перспективы и расширяют границы применения данных материалов, что способствует развитию новых технологий и повышению эффективности различных отраслей.

Кроме того, развитие экологически безопасных и устойчивых к воздействиям окружающей среды компаундов становится важной задачей научных и производственных коллективов. В условиях глобальных изменений и растущих требований к качеству и безопасности, использование инновационных полимерных компаундов приобретает стратегическое значение для будущего индустрии.

Список использованной литературы

1. Талицкий, Е.Н. Защита электронных средств от механических воздействий. Теоретические основы: Учеб. пособие / Владим. гос. ун-т., Владимир. – 2001. – 256 с. – ISBN 5-89368-232-7.
2. Бобрышев, А. Н. Полимерные композиционные материалы : учеб. пособие / А. Н. Бобрышев, В. Т. Ерофеев, В. Н. Козомазов. – Москва : Издательство АСВ. – 2013. – 480 с. – ISBN 978-5-93093-980-4. – Текст : электронный // ЭБС «Консультант студента». – Режим доступа (по подписке):

<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930939804.html> (дата обращения: 28.05.2025).

3. Кукуй, Д. М. Технология производства компаунда / Д. М. Кукуй, Ю. И. Леднев, И. Б. Одарченко // Литье и металлургия. – 2005. – № 4. – С. 44-46.

4. Григорьев, В. И. Технология полимеров: учебное пособие / В. И. Григорьев, Е. Н. Черезова, Е. С. Макарова. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ). – 2021. – 480 с.: ил. – ISBN: 978-5-7882-3070-2.

5. Гузитаева, М. Ф. Разработка силоксанового тиксотропного компаунда, предназначенного для защиты высоковольтных полупроводниковых приборов / М. Ф. Гузитаева ; Северо-Осетинский государственный университет им. К. Л. Хетагурова. – Владикавказ : б.и., 2020. – 53 с. : ил., табл., граф. – Режим доступа (по подписке): <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=597707> (дата обращения: 29.05.2025).

6. Костиков, В. И. Технология композиционных материалов : учебное пособие / В. И. Костиков, Ж. В. Еремеева. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 484 с. : ил., табл., схем., граф. – Режим доступа: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=617610> (дата обращения: 29.05.2025). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-9729-0520-1.

7. Пример герметизации электрического оборудования. – Режим доступа: <https://electrorashod.ru/image/catalog/news/05-11-24/materialy-dlya-izolyacii-13.jpg> (дата обращения: 29.05.2025).

8. Заливка компаунда. – Режим доступа: <https://smola20.ru/upload/medialibrary/ab0/ab07c11ea6fe7da3578c6ba02dc5d158.jpg> (дата обращения: 29.05.2025).

9. Литье полиуретана. – Режим доступа: <https://avatars.mds.yandex.net/i?id=97c867c3cbb8d35612a42fb8a56a9c9a05de2b7b-5524072-images-thumbs&n=13> (дата обращения: 29.05.2025).

10. Компаунд «ТРОСЛОК». – Режим доступа: <https://ropesystems.ru/news/troslok-polimernyy-kompaund-dlya-zalivki-stalnykh-kanatov> (дата обращения: 29.05.2025).

11. Компаунд от производителя «ТРОСЛОК». – Режим доступа: <https://penobetonsibir.ru/wp-content/uploads/2020/04/izgotovlenie-silikonovoj-formy.jpg> (дата обращения: 29.05.2025).

12. Отраслевой портал переработчиков пластмасс PLASTINFO.RU. – Режим доступа: <https://plastinfo.ru/> (дата обращения: 01.06.2025).

13. Аблеев, Р. И. Инновации в области полимерных материалов для кабельной индустрии / Р. И. Аблеев, Р. Н. Гимаев // Вестник Башкирского университета. – 2008. – №1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsii-v-oblasti-polimernyh-materialov-dlya-kabelnoy-industrii> (дата обращения: 28.05.2025).

14. Неёлова, О. В. Высокоочищенные кремнийорганические заливочные компаунды, предназначенные для применения в микроэлектронике / О. В. Неёлова // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2007. –

№11. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vysokochistye-kremniyorganicheskie-zalivochnye-kompaundy-prednaznachennye-dlya-primeneniya-v-mikroelektronike> (дата обращения: 28.05.2025).

15. Неёлова О. В. Кремнийорганические композиционные материалы, предназначенные для пассивации, защиты и герметизации изделий микро- и нанoeлектроники / О. В. Неёлова, Л. М. Кубалова, Д. Г. Шутов // Известия ДГПУ. Естественные и точные науки. – 2019. – №3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kremniyorganicheskie-kompozitsionnye-materialy-prednaznachennye-dlya-passivatsii-zaschity-i-germetizatsii-izdeliy-mikro-i> (дата обращения: 28.05.2025).

POLYMER COMPOUNDS: FIELDS OF APPLICATION, PRODUCTION METHODS AND AREAS OF USE

Timoshchenko Daniil Sergeevich, 1st year undergraduate student
Reshetov Sergey Yuryevich, Associate Professor of the Department of
Mechanics of Materials, Structures and Machines, Candidate of Technical
Sciences, Associate Professor

Orenburg State University

Abstract: *The paper considers the main types of compound materials used in various industries from construction to the aerospace industry. The article highlights the classification and applications of compounds depending on their chemical composition, purpose, and industrial applications. Special attention is paid to the experience of using compound materials in the electrical industry.*

Keywords: *betonite, polymerization, thermosetting and thermoplastic compounds*

ОБЗОР ВОЗМОЖНЫХ СПОСОБОВ ПЕРЕРАБОТКИ ШЛАМА ХРОМАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Орехова Александра Вячеславовна, аспирантка, 3 курс
Пояркова Екатерина Васильевна, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой механики материалов, конструкций и машин

Оренбургский государственный университет

Аннотация: *В настоящем обзоре были рассмотрены основные известные способы переработки и утилизации шлама хроматного производства. Особое внимание уделяется описанию способов получения из отбросного шлама товарных продуктов, таких как чугун, керамические пигменты и соединения магния. Представлено влияние соединений шестивалентного хрома на живые организмы.*

Работа выполнена на кафедре механики материалов, конструкции и машин Оренбургского государственного университета и исследовательской лаборатории АО «Новотроицкий завод хромовых соединений».

Ключевые слова: *соединения хрома, утилизация шлама, хроматное производство, хроматный шлам*

Код и рубрика: *81.13.13 Отдельные технологические процессы*

Шлам хроматного производства – это промышленный отход, образующийся при производстве хроматов из хромитовой руды. В хромитовой руде хром находится в трехвалентном состоянии в основном в виде хромшпинелидов железа и магния, которые не растворимы в воде [1].

Наиболее распространенная технология извлечения соединений хрома из руды основана на окислении трехвалентного хрома до шестивалентного состояния. Для этого руда измельчается до необходимого размера и смешивается с кальцинированной содой (бездоломитная технология) или с кальцинированной содой и известью или доломитом (доломитная технология). Полученная шихта обжигается во вращающейся печи при температуре от 1100 до 1200 °С. Образовавшийся спек выщелачивается водой для извлечения водорастворимого хромата натрия. Раствор хромата натрия поступает на следующие стадии производства соединений хрома, а твердый остаток после выщелачивания, содержащий некоторые количества шестивалентного хрома, является отходом переработки хромитовой руды.

Таким образом, использование рудного сырья неизбежно приводит к образованию техногенных отходов. В большинстве случаев они не используются, а их хранение ведет к загрязнению окружающей среды. Наибольшую опасность представляют техногенные отходы, содержащие токсичные и канцерогенные вещества. К ним в первую очередь и относятся

твердые хромсодержащие отходы [2, 3] за счет наличия водорастворимых форм шестивалентного хрома.

Таким образом, использование рудного сырья неизбежно приводит к образованию техногенных отходов. В большинстве случаев они не используются, а их хранение ведет к загрязнению окружающей среды. Наибольшую опасность представляют техногенные отходы, содержащие токсичные и канцерогенные вещества.

Шестивалентный хром является крайне токсичным загрязнителем, оказывающим серьезное негативное воздействие на все живые организмы. Его токсичность обусловлена высокой окислительной способностью, а также способностью легко проникать через клеточные мембраны. Соединения шестивалентного хрома признаны канцерогенами 1 группы Международным агентством по изучению рака (IARC). Основным путем воздействия на человека является вдыхание, приводящее к перфорации носовой перегородки, раку легких, носа или носовых пазух [4]. Контакт с соединениями шестивалентного хрома может вызвать дерматит, экзему, аллергические реакции и образование язв на коже. При попадании в желудочно-кишечный тракт соединения шестивалентного хрома могут вызывать тошноту, рвоту, боли в животе, диарею и язвы. Хроническое воздействие шестивалентного хрома может привести к повреждению печени и почек, нарушая их функцию. Соединения шестивалентного хрома относятся к мутагенным и генотоксичным канцерогенам. Из-за своего структурного сходства с сульфат-ионом хромат-ион может транспортироваться в клетки через сульфатные каналы, где в свою очередь восстанавливается сначала до пятивалентного состояния, а затем до трехвалентного. Образующиеся продукты трехвалентного хрома внутри клетки создают прочные комплексы с нуклеиновыми кислотами и белками, что вызывает разрывы цепей и аддукты Cr-ДНК, которые отвечают за мутагенные повреждения [5].

Аналогично человеку соединения шестивалентного хрома токсичны для животных и могут вызывать рак, дерматит, респираторные проблемы, поражение ЖКТ, печени и почек, нарушать репродуктивную функцию и вызывать пороки развития у потомства, а также могут влиять на иммунную систему, делая животных более восприимчивыми к инфекциям.

Наряду с животными и человеком соединения шестивалентного хрома оказывают значительное влияние на растения. В зависимости от концентраций и вида растений шестивалентный хром может стимулировать рост (при низких концентрациях) или ингибировать его (при высоких концентрациях); повреждать корни растений, нарушая поглощение воды и питательных веществ;

ингибировать фотосинтез, снижая продуктивность растений; снижать всхожесть семян и приводить к образованию дефектных проростков [6].

Основными источниками образования твердых хромсодержащих отходов являются заводы по производству стали и ферросплавов, предприятия химической промышленности по производству хромовых солей, предприятия, сжигающие нефть и уголь, а также теплоэлектростанции, которые работают на буром и каменном углях.

На мировом рынке крупнейшими производителями соединений хрома выступают такие страны как Китай, Казахстан, Россия, США. В России соединения хрома производят два предприятия – АО «Русский хром» г. Первоуральск (Свердловская область) и АО «Новотроицкий завод хромовых соединений» (НЗХС) г. Новотроицк (Оренбургская область). Оба предприятия имеют шламонакопители для складирования высокотоксичного отхода, получаемого при переработке хромитов.

В процессе извлечения растворимых соединений шестивалентного хрома из хромовой руды по бездоломитной технологии на предприятии АО «НЗХС» образуется порядка 0,8-1,1 тонны отбросного шлама на тонну хромата натрия. Химический состав шлама хроматного производства:

Cr_2O_3 – 5-12%;

CrO_3 – 0,1-0,5%;

Na_2O – 8-15%;

Al_2O_3 – 7-12%;

CaO – 0,3-0,6%;

Fe_2O_3 – 16-27%;

MgO – 25-34%;

SiO_2 – 7-15%;

рН водной вытяжки – 12,0.

Шлам из-за высокого значения рН водной вытяжки и наличия в нем некоторого количества водорастворимой формы шестивалентного хрома согласно Федеральному закону от 24.06.1998 № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» (ред. от 08.08.2024 https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/) относится ко второму классу опасности отходов. Основной задачей технологии переработки хромсодержащих шламов является получение продукта, безвредного в санитарном отношении, качественный состав и свойства которого обеспечивают возможность его утилизации или захоронения без ущерба для окружающей среды.

В связи с этим за время производства хромовых соединений предпринималось множество способов переработки отбросного шлама.

Так, в работе [7] описана возможность переработки шлама с получением металлов. Эксперимент по получению металла из шлама проводился на Орско-Халиловском металлургическом комбинате (в настоящий момент АО «Уральская сталь») в доменном производстве путем агломерации шлама с рудой Новокиевского месторождения и дальнейшей выплавкой из агломерата хромоникелевого чугуна. Было переработано 3000 тонн шлама. Получен хромоникелевый чугун, не соответствующий требованиям ГОСТ из-за повышенного содержания хрома в чугуне. Достигнута небольшая экономия кокса и известняка. Отрицательным моментом явилось высокое выделение паров натрия с возможным дальнейшим забиванием газоходов и повышенное содержание магния в шлаке. Для производства чугуна был использован шлак, полученный по доломитовой технологии.

Также известен патент [8], где хромсодержащий отход производства добавляется в аглошихту в количестве 21-31 % для дальнейшей выплавки чугуна вместо традиционных флюсующих добавок, таких как известняк. В данной работе в качестве хромсодержащего отхода использовался хроматный шлак, полученный по доломитной технологии, Кокшанского хромпикового завода, накопившийся за 75 лет.

Ряд работ АО «УНИХИМ с ОЗ» [9] посвящен получению из шлама хроматного производства шлакоситаллов – износоустойчивых стеклокристаллических материалов, используемых в различных отраслях промышленности.

Также известен способ [10] переработки шлама хроматного производства, включающий термическую обработку смеси шлама и базальтовой породы в соотношении, не превышающем 40-50 %. В описанном способе термическая обработка ведется в непрерывном режиме при температуре выше 1550 °С при электромагнитном перемешивании расплава с помощью поперечного магнитного поля. Полученный продукт выводится в виде непрерывной струи расплава и подвергается охлаждению водой. Данный способ позволяет перевести шестивалентный хром в трехвалентное «безопасное» состояние.

В работе [11] хроматный шлак, полученный при переработке южноафриканской руды, смешивается с углеродсодержащим соединением жидким в температурном интервале от 20 °С до 100 °С. Затем проводится обработка полученной смеси в атмосфере защитного газа в интервале температур от 700 до 1100 °С и охлаждается полученный продукт. Восстановленный таким образом оксидный твердый материал возможно использовать в качестве наполнителя при изготовлении строительных материалов на известковой, цементной основе или асфальта.

В ряде работ [12, 13, 14] были предложены термические методы восстановления остатков хромитовой руды, используя таким образом хроматный

шлам в качестве черных и коричневых пигментов при изготовлении керамических материалов и кровельной черепицы.

Утилизация и обезвреживание шламов в работах [15, 16, 17] связаны с обработкой суспензии шлама кислотными реагентами: угольная кислота, серная кислота, сульфат аммония или сульфаминовая кислота. После обработки растворы были отделены, очищены и переработаны с получением оксида магния. Хромосодержащие растворы предлагается направлять после очистки от соединений магния в основное производство хромата натрия, либо очищать от хрома путем обработки серосодержащим восстановителем и карбонатом натрия.

Кроме переработки шлама хроматного производства проводились исследования в области обезвреживания шестивалентного хрома в шламе и дальнейшего захоронения. Например, в работе [18] авторы предлагают предварительно доизвлекать хром из отбросного шлама путем обработки его водой с добавлением серной кислоты, последующим озонированием полученной суспензии и разделением ее на фильтре. Полученный в ходе работы вторичный шлам промывается водой, в которую добавляется восстанавливающий агент. Таким образом возможно повысить степень извлечения хрома из шлама и перевести шлам из 2-го класса опасности в 4-й. В качестве восстанавливающего агента предполагается использовать раствор сульфата или хлорида двухвалентного железа.

Несмотря на разнообразие предлагаемых способов переработки и утилизации хромосодержащих шламов в настоящее время экономически приемлемого способа полной переработки отбросного шлама хроматного производства в промышленности не существует.

Выше представленный комплексный обзор продемонстрировал разнообразие подходов к переработке шлама хроматного производства, начиная от традиционных методов, таких как обжиг и выщелачивание, и заканчивая инновационными технологиями, основанными на использовании электромагнитных полей и химических реагентов. Несмотря на многочисленные исследования и разработки, полная и экономически эффективная утилизация этого опасного отхода остается актуальной проблемой для промышленности.

Вместе с тем, будущие исследования будут направлены на разработку комплексных стратегий, сочетающих в себе различные методы переработки, с акцентом на минимизацию вторичного загрязнения и получение ценных побочных продуктов. Важным аспектом является разработка более экологичных и экономически выгодных технологий, которые позволят не только утилизировать шлам хроматного производства, но и сократить негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека.

Список использованных источников

1. Авербух, Т. Д. Технология соединений хрома / Т. Д. Авербух, П. Г. Павлов. – изд. 2 испр. – Л.: Химия – 1973.
2. Узбеков, В. А. Оценка опасности воздействия на людей соединений хрома при добыче хромосодержащих руд и получении феррохрома/ В. А. Узбеков, А. А. Мамырбаев, Е. Ж. Отаров, С. А. Ибраев, Н. З. Перепичко // Экология и гигиена. – 2014. – Вып. 70. – № 1. – С. 23–27.
3. Бессонова, В. П. Хром в окружающей среде / В. П. Бессонова, О. Е. Иванченко // Вопросы биоиндикации и экологии. – 2011. – Вып. 16. – № 6. – С. 13–29.
4. Сведения Международного агентства по изучению рака IARC – 2012 г. – Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20200317095517/https://publications.iarc.fr/publications/media/download/3026/50ed50733f7d1152d91b30a803619022ef098d59.pdf> (дата обращения 27.12.2023).
5. Сальников, К. Генетические и эпигенетические механизмы в канцерогенезе и коканцерогенезе металлов: никель, мышьяк и хром / К. Сальников, А. Житкович. – 2008. Режим доступа: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2602826/> (дата обращения 25.03.2025).
6. Пириев, И. Т. Изменения физиологических параметров растений тыквы при комплексном воздействии токсических уровней хрома и засоления / И. Т. Пириев, Г. Х. Бабаева, М. А. Аннагиева. – 2020. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmeneniya-fiziologicheskikh-parametrov-rasteniy-ykvy-pri-kompleksnom-vozdeystvii-toksicheskikh-urovney-hroma-i-zasoleniya/viewer> (дата обращения 15.06.2025).
7. Совместный отчет лабораторий АО «НЗХС» и АО «Уральская сталь».
8. Патент РФ № 2674209. Способ утилизации отходов хроматного производства методами черной металлургии / Н. Н. Сафронов – опубл. 22.05.2017.
9. Труды АО «УНИХИМ с ОЗ». – выпуск 47. – С. 58-63.
10. Патент Казахстан № 27146. Способ переработки шлама хроматного производства / С. Х. Акназаров, В. Г. Лукьященко, В. Е. Мессерле [и др.] – опубл. 25.06.2013.
11. Патент № 2646085. Способ восстановления шестивалентного хрома, содержащегося в оксидных твердых материалах/ Ортманн, Райнер Фридрих, Хольгер Лабушанье [и др.]. – опубл. 01.03.2018.
12. Патент JP № 62036061 А.
13. Патент JP № 58-225158 А.
14. Патент JP № 59-92968 А.
15. Заявка РФ № 2004 11387/15, МПК C01 G37/02. Способ переработки шлама хроматного производства. – опубл. 28.04.2004.
16. Патент РФ № 2281249. Способ переработки шлама хроматного производства / Ю. С. Плышевский, Н. В. Гаркунова, К. Н. Захаров и др. – опубл. 10.08.2006.

17. Патент РФ № 2083497. Способ переработки шлама хроматного производства / Б. П. Середа, О. В. Демидова, Б. А. Попов [и др.]. – опубл. 10.07.1997.

18. Патент РФ № 2652178. Способ переработки шлама хроматного производства / А. А. Циппер, В. Н. Басов, С. В. Островский и др. – опубл. 25.04.2018.

REVIEW OF POSSIBLE WAYS TO PROCESS CHROMATE PRODUCTION SLUDGE

**Orekhova Alexandra Vyacheslavovna, postgraduate student, 3rd year
Poyarkova Ekaterina Vasilievna, Doctor of Technical Sciences, Associate
Professor, Head of the Department of Mechanics of Materials, Structures and
Machines**

Orenburg State University

Abstract: *This review examines the main known methods of processing and recycling chromate production sludge. Particular attention is paid to the description of methods for obtaining commercial products such as cast iron, ceramic pigments and magnesium compounds from waste sludge. The effect of hexavalent chromium compounds on living organisms is presented.*

The work was carried out at the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines of Orenburg State University and the research laboratory of JSC Novotroitsk Plant of Chrome Compounds.

Key words: *chromium compounds, sludge utilization, chromate production, chromate sludge*



СЕКЦИЯ 6

«КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ»

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «КОНСТРУКТИВ»

Фролова Олеся Александровна, кандидат технических наук, доцент
Батталов Егор Римович, бакалавриат, 3 курс

Оренбургский государственный университет

Аннотация. В данной статье рассмотрена разработка программного комплекса «КОНСТРУКТИВ» по объединению расчетной модели и элементов чертежей в промышленном и гражданском строительстве, способы применения искусственного интеллекта для проактивного участия в разработке и проверке строительных чертежей на соответствие расчетного комплекса, затрагивающего строительство промышленных и гражданских сооружений из монолитного железобетона, бетона, металл каркаса и применение иных материалов несущего каркаса. Усовершенствование применения BIM-технологий и развитие стандартов в области регулирования и применения технологий моделирования и проектирования.

Ключевые слова: строительство, проектирование, Lira SAPR, Revit, Autocad, проектная документация, рабочая документация.

Код и рубрика: 004 Информационные технологии. Компьютерные технологии. Теория вычислительных машин и систем.

В науке в области строительства перспективы связаны с созданием новых технологий производства строительных материалов, разработкой новых конструктивных систем зданий и сооружений, инженерных систем. Упор делается на надёжность, безопасность, долговечность, эстетический комфорт и эксплуатационную экономичность. Также одна из ключевых задач – переход к цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования в строительстве.

Актуальность разработки программного обеспечения (плагинов) для работы в проектировании и строительстве сводится к следующему:

1. Отечественное ПО. Разработка программного обеспечения от отечественного производителя снижает риски замедления программных комплексов и иных ресурсов в зависимости от внешней политической ситуации.

2. Кадровый кризис. В срезе последних 10 лет прослеживается стагнация кадров подготовленных и вовлеченных инженеров. Данный факт усугубляет работу не только при проектировании объекта, но и при его последующем возведении;

3. Минимизация проектных ошибок. Современное строительство сосредоточено на использовании монолитных железобетонных конструкциях. Ошибки при проектировании (переносе данных из расчетной схеме) могут привести к фатальным последствиям при строительстве или эксплуатации зданий/сооружений.

4. Увеличение производительности. Подготовка проекта стадии «Р» (рабочая) в особенности разделов «КЖ» и «КМ» (конструкции железобетонные и конструкции металлические) требуют от инженера сосредоточенности и скрупулезного подхода. При работе с ПО «КОНСТРУКТИВ» предполагается сокращение временных ресурсов и сокращения человека/часов на единицу конструкции при проектировании.

Каждая программа, вне зависимости от ее функционала и назначения, начинается с написания кода. Какой язык программирования лучше всего подойдет для ПО «КОНСТРУКТИВ»? Перед тем, как ответить на этот вопрос, рассмотрим программное обеспечение современного инженера проектного отдела:

Во-первых, это LIRA (SCAD OFFICE) [1] – программное обеспечение для автоматизированного расчета не только отдельных конструктивных схем в частности, но и здания со всеми возможными нагрузками в целом.

Данный программный продукт предоставляет не только информацию о подборе арматурных стержней, класса бетона и иных конструкциях, но также показывает все возможные деформации (кручение, сдвиг, расширение, сжатие и т.п.) (рисунки 1, 2). Программный комплекс для создания и анализа расчета обязателен для каждого инженера [5]. Данный программный комплекс написан на языке C++ (поддерживает плагины на языках C# и Python).

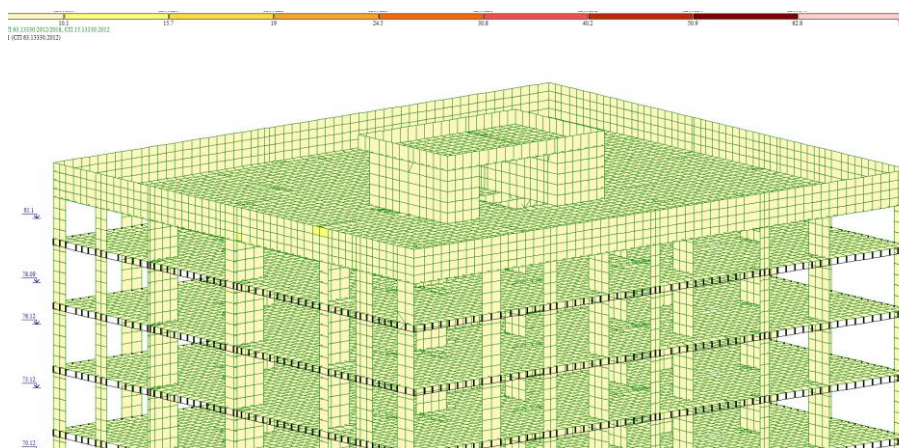


Рисунок 1 – Подбор армирования

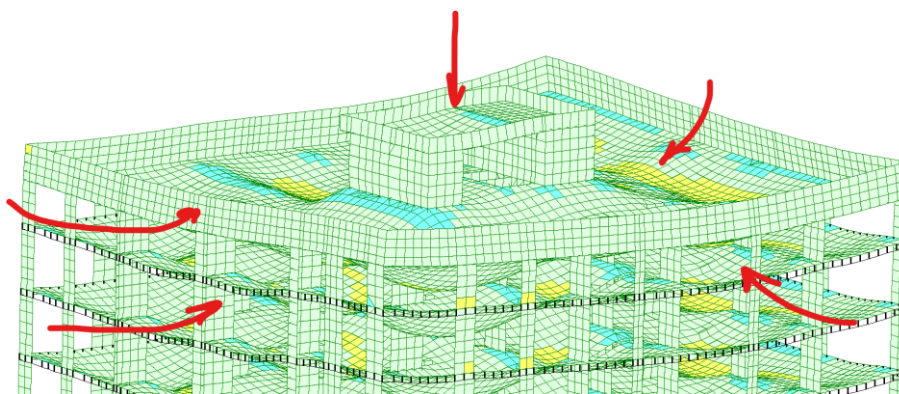


Рисунок 2 – Деформации конструкций

Во-вторых, это программные комплексы для проектирования (Autocad и Revit), а также отечественный «КОМПАС-3D» [2] написаны на языке программирования С#. Для лучшего взаимодействия, передачи информации между программными комплексами для разработки ПО «КОНСТРУКТИВ», также подойдет язык программирования С#.

Алгоритм внедрения ПО «КОНСТРУТИВ» представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Алгоритм внедрения ПО «КОНСТРУТИВ»

Принципы работы и область применения ПО «КОНСТРУТИВ» в современном строительстве и проектировании включают в себя:

1. Сбор данных и подготовка расчетной модели.

Специалисты в области инженерных изысканий подготавливают геодезический отчет и отчет местности, в котором отражено состояние грунтов, на которых планируется возвести проектируемое здание/сооружение. Инженеры-конструкторы совместно с инженерами-расчетчиками подготавливают расчетную модель, в которой отражены все виды нагрузок (постоянные, временные, особые, нагрузки несилового воздействия) [3].

2. Анализ расчетной модели.

На данном этапе в работу с «LIRA» вступает ПО «КОНСТРУТИВ». Применение программного комплекса позволяет инженерам проводить анализ более тщательно, не пропуская особо опасных мест. ПО «КОНСТРУТИВ» подсвечивает особо нагруженные элементы, или элементы с высоким процентом раскрытия трещин, не позволяя выводить данные из расчетной схемы дальше для разработки «расчетной тетради», прикрепляемой к текстовой части проектной документации разделов «Конструктивных решений» (рисунок 4) [3, 4].

Инженеры проводят работу с данными элементами, исправляя ошибки в расчете (неверный ввод данных, подбор арматурных стержней, подбор бетона, неверный сбор нагрузок, неверное сечение и т.д.). После чего, вносит

корректировки в расчетную модель, запуская при этом анализ ПО «КОНСТРУКТИВ». Если ошибка повторяется, вышеописанные работы проводятся повторно. После выполнения анализа ПО «КОНСТРУКТИВ» с положительным заключением, проводится повторный анализ модели от непосредственного ее разработчика (инженера-конструктора или инженера-расчетчика).

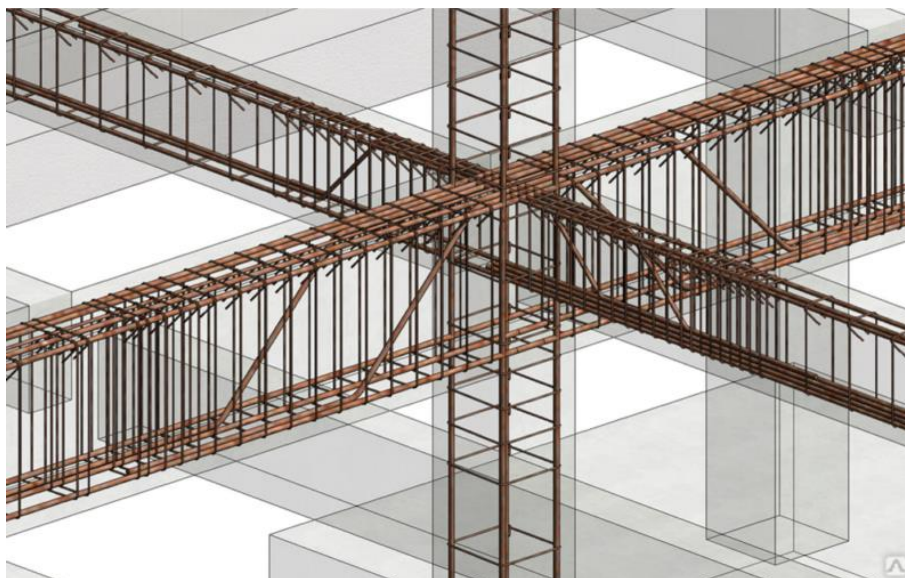


Рисунок 4 – Пример работы ПО «КОНСТРУТИВ»

3. Согласование изменений.

В случае, если инженеры подтверждают, что расчет выполнен без ошибок, данные об изменениях конструкций передаются соответствующим отделам (менеджерам проекта, архитекторам, инженерам-конструкторам, проектировщикам, инженерам смежных разделов и т.д.). Проводится технический аудит, на котором заключают, что изменение конструкции или применяемых материалов неизбежно, ввиду ошибки от анализа ПО «КОНСТРУКТИВ».

4. Подготовка чертежей.

При подготовке чертежей рабочей и проектной документации по железобетонным и металлическим изделиям и монолитного каркаса, возникает риск неполного или некачественного переноса данных из расчетной модели. Эту проблему также поможет решить ПО «КОНСТРУКТИВ» [3, 4].

5. Конвертирование данных.

ПО «КОНСТРУКТИВ» конвертирует (переводит) данные из расчетной модели, позволяя подгружать данные при подготовке того или иного сечения, или при разработке чертежей по армированию железобетонных конструкций, монолитных стен, плит перекрытия и фундаментов. Подложка позволит не пропустить места усиления и показать в выносках информацию, которая соответствует подготовленной расчетной модели без ошибок [3, 4].

6. Проверка подготовленных чертежей.

ПО «КОНСТРУКТИВ» будет полезным при проведении экспертизы проектной документации и расчетных моделей. При прохождении государственной и негосударственной экспертизы значительные временные затраты идут на перепроверку соответствия переданных чертежей и расчетной тетради. Эту работу на себя берет ПО «КОНСТРУКТИВ», проверяя не только расчетную модель и чертежи между собой, но и чертежи на предмет использования ПО «КОНСТРУКТИВ» при подготовке проектной документации. Отчет ПО «КОНСТРУКТИВ» состоит из описания проекта, а также мест конструкций, которые необходимо усилить или которые могут быть технически сложными. Это поможет эксперту не тратить время на перепроверку типовых конструкций, а обратить внимание на непосредственно сложные технические элементы.

Таким образом, ПО «КОНСТРУКТИВ» позволит сократить риск и влияние человеческого фактора, позволит обеспечить реагирование и принятие решений по минимизации рисков, связанных с неправильным подбором материалов или жесткостей тех или иных частей сооружений, комплексное взаимодействие по всем стадиям от составления расчетной схемы до возведения сооружений и передаче или проверки данных в контролирующие органы.

Список использованной литературы

1. Официальный сайт компании «ЛИРА софт» (г. Москва), являющейся правообладателем программного комплекса ЛИРА 10. – Режим доступа: <http://lira-soft.com>.
2. «КОМПАС 3D». Официальный сайт компании «АСКОН» – крупнейшего российского разработчика инженерного программного обеспечения и интегратора в сфере автоматизации проектной и производственной деятельности. – Режим доступа: <https://kompas.ru/>.
3. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 26.12.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2025) // Собрание законодательства РФ. – 2005. – №1, ч. 1. – Ст. 16, Ст. 40, Ст.42, Ст. 50-52.
4. СП 63.13330.2018. СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – Введ. 2019-06-20 – М. : Изд-во стандартов, 2019. – 143 с.
5. Фролова, О. А. Опыт применения программного комплекса лира 10.6 в образовательной деятельности обучающихся инженерных направлений подготовки / О. А. Фролова, Е. В. Пояркова // В сборнике: Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Материалы Всероссийской научно-методической конференции. – 2019. – С. 1003-1006.

DEVELOPMENT OF THE CONSTRUCTIVE SOFTWARE PACKAGE

**Frolova Olesya Alexandrovna, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor**

Battalov Egor Rimovich, Bachelor's degree, 3rd year

Orenburg State University

Abstract. *This article discusses the development of the CONSTRUCTIVE software package for combining a computational model and drawing elements in industrial and civil construction, ways to use artificial intelligence to proactively participate in the development and verification of construction drawings for compliance with a computational complex affecting the construction of industrial and civil structures made of monolithic reinforced concrete, concrete, metal frame and the use of other materials of the supporting frame. Improving the use of BIM technologies and developing standards in the field of regulation and application of modeling and design technologies.*

Keywords: *construction, design, Lira SAPR, Revit, Autocad, project documentation, working documentation.*

АРОЧНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПРОТИВ ТРАДИЦИОННЫХ БАЛОК: АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ И ЭФФЕКТИВНОСТИ

Фролова Олеся Александровна, кандидат технических наук, доцент
Едачёв Игорь Андреевич, Долгополов Вадим Борисович, студенты
бакалавриата, 3 курс

Оренбургский государственный университет

Аннотация. В статье рассматриваются конструктивные и механические преимущества арочных систем по сравнению с традиционными балочными элементами в строительной механике. Проведён сравнительный анализ работы балок и арок при вертикальной нагрузке, выявлены особенности перераспределения внутренних усилий и поведения конструкций под нагрузкой. Показано, что арки работают преимущественно на сжатие, благодаря чему существенно снижаются изгибающие моменты, в отличие от балок, где одновременно действуют растягивающие и сжимающие напряжения. В заключение подчёркивается эффективность арочных конструкций для создания лёгких, устойчивых и долговечных инженерных решений, особенно в условиях тяжёлых нагрузок и больших пролётов.

Ключевые слова: строительство, проектирование, арочные конструкции, преимущества.

Код и рубрика: 692 Части зданий и сооружений (архитектурные конструкции).

Арочные и балочные конструкции являются одними из основных типов несущих систем в архитектуре и строительстве (рисунок 1). Арка – криволинейная конструкция, существующая с древнейших времён (римские акведуки, готические соборы, триумфальные арки и т.п.) – передаёт нагрузку преимущественно на опоры через сжатие. Балка – прямолинейный элемент, широко применяемый в современном строительстве, воспринимает нагрузки главным образом за счёт изгиба [1].



https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.e879ddca-683326db-583fc

а) римские акведуки



https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.e879ddca-683326db-583fc

б) триумфальные арки

Рисунок 1 – Арочные конструкции

Арка представляет собой в основном конструкцию, хорошо воспринимающую сжатые нагрузки, тогда как балка нагрузки на изгиб. При вертикальной нагрузке на арку возникают и вертикальные реакции, и горизонтальные распорные силы. Именно наличие этой горизонтальной тяги резко уменьшает изгибающие моменты в теле арки по сравнению с балкой того же пролёта и нагрузки.

В балке при изгибе верхнее волокно сжимается, а нижнее растягивается, что требует более прочного материала или больших сечений. В отличие от балки, арка может работать преимущественно на сжатие и совершенно не испытывать растягивающих напряжений, если её форму подобрать оптимальным образом. Например, в численном примере при одной и той же нагрузке максимальный изгибающий момент балки составлял $937,5 \text{ Т}\cdot\text{м}$, тогда как в трёхшарнирных арках разной формы он был порядка $26\text{--}27 \text{ Т}\cdot\text{м}$ (рисунок 2). Это означает, что балке придётся сопротивляться гораздо большим моментам и, соответственно, более высоким напряжениям. При этом в балке возникают как сжимающие, так и растягивающие напряжения, а в арках сохраняется только сжатие. Такое перераспределение усилий позволяет арочной конструкции использовать материал более эффективно и использовать менее прочные материалы, чем требуются для балки с аналогичным пролётом.

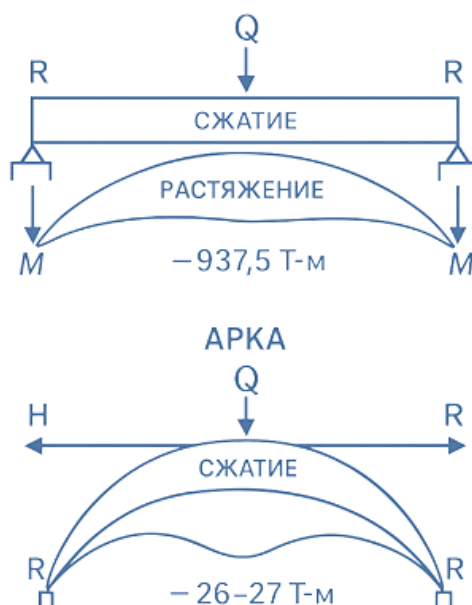


Рисунок 2 – Диаграмма прочностных характеристик арочных нагрузок

В арке же весь прогиб «превращается» в осевое сжатие элементов. Такую особенность важно учитывать при выборе материала: хрупкие материалы (камень, бетон без арматуры) подходят для арок, поскольку не испытывают растяжения, а для балки без армирования они неприменимы.

Арочная конструкция, обеспечивая преимущественно сжатую работу, позволяет оптимально распределить нагрузки по её длине и опорам [2]. Форма арки естественным образом передаёт вертикальные нагрузки в горизонтальные распорные силы на опоры. Это означает, что общая масса арки может быть

меньше, чем у балки такого же пролёта, при равномерном использовании материала по её сечению. Благодаря плавности нагрузочных схем (отсутствию резких изгибающих моментов) арки часто оказываются более лёгкими, хотя для восприятия распорных сил необходимы тяжёлые опоры или связь арки растяжками. В ряде многопролётных арочных сооружений (римские акведуки, современные арочные ангары) горизонтальные распорные усилия суммируются и частично компенсируют друг друга, что уменьшает требования к одному опорному элементу. При этом собственный вес арочной конструкции, как правило, определяется суммарной длиной несущего элемента и его сечением.

Диаграмма нормальных (осевых) усилий иллюстрирует появление значительной осевой (горизонтальной) тяги в арке, отсутствующей у балки (рисунок 3). В балке осевые усилия равны нулю, а в арочных секциях достигают сотен тонн сжатия. Эти распорные силы передаются на опоры, формируя горизонтальное давление. Следовательно, арке требуются массивные или укреплённые опоры (бутовая кладка, железобетонные блоки, растяжки), чтобы противостоять данным нагрузкам. Стоит отметить, что арка в целом распределяет нагрузку на большую площадь основания и может «самоуплотняться» при росте нагрузок – по мере увеличения нагрузки трещин в арке не возникает, а конструкция лишь сильнее входит в компрессию. В результате комбинированное воздействие изгиба и распорных сил делает арочную систему жёсткой и устойчивой под тяжёлыми нагрузками (такова принципиальная идея арочных плотин и куполов).

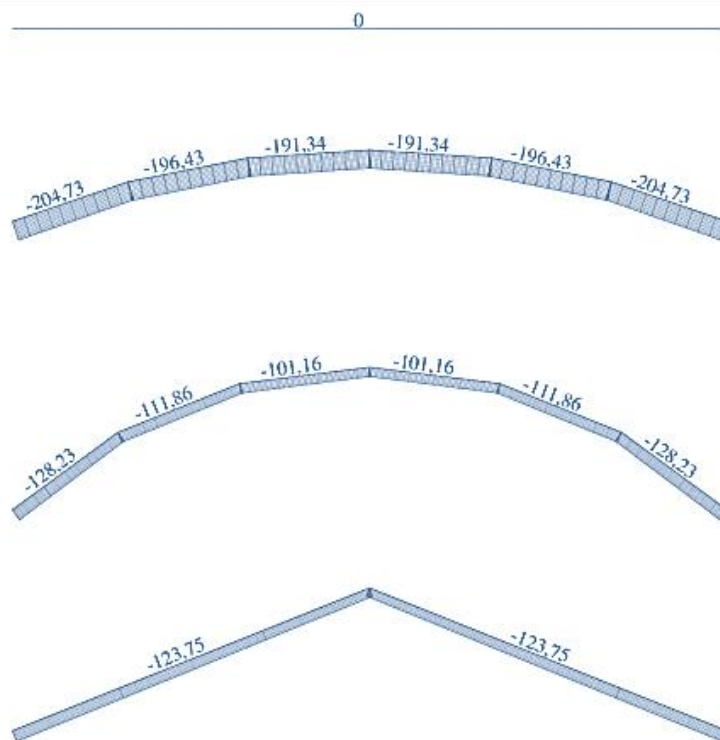


Рисунок 3 – Диаграмма нормальных (осевых) усилий

Экономическая оценка сравнения арок и балок включает стоимость материалов, монтажа и эксплуатации. Арочная конструкция при тех же геометрических размерах обычно требует меньше материала за счёт более равномерного распределения напряжений, что уменьшает избыточные запасы прочности. К примеру, известный факт – купольные и арочные перекрытия позволяют сокращать расход стали по сравнению с балками такой же прочности. Однако арки предъявляют более высокие требования к опорам и фундаментам из-за распорных усилий, что может увеличить стоимость подготовки оснований.

Монтаж арок сложнее: их элементы чаще изготавливаются под заказ, требуют точной подгонки (особенно кирпичные/каменные арки) или сложного стального каркаса. Балочные конструкции (двутавровые балки, фермовые пролёты, монолитные плиты) более технологичны и стандартизированы в производстве и доставке. Сравнительно простой монтаж балок (сквозное или послойное на опорах) зачастую удешевляет строительные работы. С другой стороны, долговечность арок (при правильном уходе) выше – арочная форма не создаёт концентраторов напряжений (нет сварных швов или уплотнений), что снижает эксплуатационные расходы.

В ряде случаев использование арок позволяет применять более дешёвые материалы. Исторически арки возводили из камня и кирпича (дешёвое и доступное сырьё), тогда как для пролетных балок большой длины требовалась дорогая сталь или железобетон. В современных проектах металлическая или железобетонная арка может оказаться экономически выгоднее длинных балок и ферм, особенно для больших пролетов (свыше 50 – 100 м), где размах требует чрезмерно больших балочных элементов. Например, при проектировании многопролётных ангаров и стадионов арочные фермы или пролётные арки часто выгоднее обычных балочных рам с учётом общей массы и затрат на монтаж. В целом экономическую эффективность определяет баланс: меньше материала и потенциал удешевления за счёт сжатия против усложнения опор и монтажа.

Арочные конструкции традиционно воспринимаются как более эстетичные и монументальные по сравнению с балочными. Их плавные изгибы и «плавучесть» структурных форм создают ощущение лёгкости и торжественности. Множество архитектурных памятников (триумфальные арки, галереи и аркады готических соборов, купола византийских и восточных строений) подчёркивают зрительную выразительность арки. Даже современные стеклянные фасады используют арочные проёмы и ребра, чтобы придать зданию изящество. В культуре арка символизирует торжество и устойчивость (например, Триумфальная арка в Париже (рисунок 4, а), мемориальная арка в Сент-Луисе (рисунок 4, б), Нарвские триумфальные ворота (Санкт-Петербург, Россия) (рисунок 4, в), Бранденбургские ворота (Калининград, Россия) (рисунок 4, г)).

В противоположность этому, балочные конструкции выглядят более утилитарно: прямая линия фермы или ригеля функциональна, но визуально скромна. Тем не менее, минимализм прямолинейных форм в некоторых стилях (минимализм, хай-тек) идёт на пользу практичности. В современном дизайне часто комбинируют оба принципа: арочная стереометрия может быть

гармонично встроена в «коробки» из балок (например, арочные окна и входы в современных зданиях). Многие архитекторы используют арку как декоративный элемент или пространственную особенность, привлекая внимание к фасаду или внутреннему объёму.



<https://experience.tripster.ru/sights/triumfalnaya-arka-v-parizhe>

а) Триумфальная арка (Париж, Франция)



https://ru.wikipedia.org/wiki/Сааринен,_Ээро

б) мемориальный арка
(Париж, Сент-Луис, Франция)



<https://dzen.ru/a/YerEJAqYHRxu-LSF>

в) Нарвские триумфальные ворота
(Санкт-Петербург, Россия)



https://en.wikipedia.org/wiki/File:Kaliningrad_05-2017_img01_Brandenburg_Gate.jpg

г) Бранденбургские ворота
(Калининград, Россия)

Рисунок 4 – Эстетика арочных конструкции

С развитием технологий и программных средств Building information modeling (BIM), Computer-aided engineering (CAE), систем автоматизированного проектирования (САПР) внимание к арочным формам возросло: цифровое моделирование позволяет оптимизировать их геометрию и учесть нетривиальные особенности расчёта.

Современные цифровые инструменты существенно расширили возможности проектирования как арочных, так и балочных конструкций. BIM-моделирование (Revit, ArchiCAD, Tekla и др.) позволяет создать трёхмерную информационную модель сооружения, точно учесть геометрию арки, расположение элементов и взаимодействие с инженерными сетями. Так, в проекте пешеходного моста в Гонконге (рисунок 5) использовали открытые BIM-стандарты для совместной работы над двумя стальными арками моста. Их арочная форма объединила пролёты в единую конструкцию с оптимальными

структурными характеристиками, а BIM-технологии обеспечили высокую точность изготовления и монтажа.

Цифровое моделирование позволяет проводить расчёт сложных распределений напряжений в арках с произвольным очертанием (параболические, эллиптические, стрельчатые арки и др.), анализировать влияние строительства на конструкции (метод опускания в конструкции моста, графика монтажа). Кроме того, технологии САЕ (метод конечных элементов) помогают оптимизировать сечения арочных элементов, выбирая профили по заданному бюджету и нагрузкам. Так, архитектурные BIM-платформы дают возможность сразу визуализировать результат, проконтролировать изготовление элитных форм (например, эффекты дворцов куполов или спортивных арен) и синхронизировать проектирование с графиками производства и монтажа (4D-планирование).



https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.71867ec9-68332fa2-207c1789-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Cross_Bay_Link

Рисунок 5 – Мост Цыунг Кван О Кросс-Бэй

В случае балок BIM-технологии ускоряют создание семейств стандартных профилей и автоматическую детализовку рамных конструкций, но в целом расчёт балок проще и менее требователен к моделированию (прямолинейность упрощает задачи) [3]. Таким образом, цифровая эпоха сделала арочные конструкции более доступными: теперь инженеры могут реализовать уникальные криволинейные решения, довести их до серийного производства и монтажа с минимальными погрешностями, чего было трудно добиться при чисто ручном проектировании.

Таким образом, арочные конструкции по сравнению с балочными обладают рядом заметных преимуществ: меньшие изгибающие моменты и отсутствие растягивающих напряжений позволяют им эффективнее использовать материал, особенно на больших пролетах [4]. Архитектонические формы арок также открывают дополнительные возможности для дизайна и организации пространства. Однако арки требуют больших опорных конструкций и более сложного монтажа из-за распорных усилий, что может повысить затраты. С развитием цифровых технологий (BIM, численные методы) проектирование арок стало более рациональным – стало возможным точно смоделировать кривизну и рассчитать все нагрузки. В современных строительных проектах

часто сочетают преимущества обоих подходов: комбинируют прямые балки и изящные арки, используя каждую систему там, где она наиболее выигрышна. Арочные конструкции в цифровую эпоху остаются актуальными как высокоэффективное и эстетически привлекательное решение для перекрытия больших пространств.

Список использованной литературы

1 Юнусов, А. С. Арочные конструкции, востребованные временем, в строительной науке и архитектуре / А.С. Юнусов // *Инженерный вестник Дона*. – 2016. – № 1(40). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/arochnye-konstruktsii-vostrebovannye-vremenem-v-stroitelnoy-nauke-i-arhitekture> (дата обращения: 31.05.2025).

2 Ван Жэньцзе. Исследование по преимуществу и особенностям расчета конструкции арочного перекрытия / // Молодой ученый. – 2023. – № 19 (466). – С. 69-80. – URL: <https://moluch.ru/archive/466/102551/> (дата обращения: 31.05.2025).

3 Таратута, В. Д. Большепролетные конструкции промышленных и гражданских зданий и сооружений: учеб. пособие / В. Д. Таратута, А. М. Бегельдиев. – Краснодар: КубГАУ. – 2017. – 187 с.

4 Изучение свойств арочных конструкций с использованием интерактивной модели : методические указания / сост.: Е. В. Дырдина, Е. В. Пояркова ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Оренбург. гос. ун-т», Каф. механики материалов, конструкций и машин. – Оренбург : ОГУ, 2022. – 32 с

ARCHED STRUCTURES VS TRADITIONAL BEAMS: ANALYSIS OF ADVANTAGES AND EFFICIENCY

**Frolova Olesya Alexandrovna, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor**

**Edachev Igor Andreevich, Dolgopolov Vadim Borisovich, Bachelor's degree, 3rd
year**

Abstract. *In the article Structural and mechanical advantages of arch systems in comparison with traditional beam elements in structural mechanics are considered. In comparison with traditional beam elements in structural mechanics. A comparative analysis of the work of beams and arches under vertical loading is carried out, the peculiarities of internal forces redistribution and behavior of the of structures under load. It is shown that arches work predominantly in compression, due to which bending moments are significantly reduced, in contrast to beams, where tensile and compressive stresses act simultaneously. In conclusion, the effectiveness of arch structures for creating lightweight, stable and durable engineering solutions, especially under conditions of heavy loads and large spans.*

Keywords words: *construction, engineering, arch structures, advantages.*

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА АРОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ БАЛКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ PYTHON

Фролова Олеся Александровна, кандидат технических наук, доцент
Васильченко Фёдор Вячеславович, бакалавриат, 2 курс

Оренбургский государственный университет

Аннотация. В данной работе представлен эффективный численный метод расчета арочных конструкций, основанный на концепции эквивалентной балки. Алгоритм реализован на языке Python и позволяет достичь высокой точности результатов, сопоставимой с специализированным коммерческим ПО, при этом исключая необходимость его приобретения. Разработанная программа автоматизирует вычисление балочных моментов, поперечных сил, определение наиболее нагруженных сечений, что делает её применимой в широком спектре инженерных задач, включая проектирование в аэрокосмической отрасли. В статье подробно описан алгоритм, включающий этапы ввода данных, расчета опорных реакций и дискретизации конструкции. Приведен пример расчета двухопорной балки для демонстрации возможностей метода. Предлагаемый подход значительно снижает зависимость от коммерческих пакетов и минимизирует риск ошибок при расчетах.

Ключевые слова: арочные конструкции, эквивалентная балка, Python, расчет на прочность, изгибающие моменты, ракетостроение, авиастроение.

Код и рубрика: 004 Информационные технологии. Компьютерные технологии. Теория вычислительных машин и систем.

Актуальность задачи численного моделирования и расчета арочных конструкций с применением специализированного программного обеспечения подтверждается многочисленными исследованиями [1, 2]. Реализация соответствующих вычислительных алгоритмов требует не только глубоких знаний в области прикладной механики, но и владения специфическими инструментами и вспомогательными утилитами. В ряде работ (например, [2]) в качестве вычислительной среды предлагается использование пакета Mathcad. Однако, существенным ограничением данного подхода является необходимость приобретения лицензионной версии программного обеспечения и наличие навыков работы с его интерфейсом.

В настоящей работе предлагается альтернативный подход, основанный на использовании программного кода на языке Python. Применение данного языка обеспечивает удобный ввод/вывод информации, а также высокую вычислительную точность (до 16 значащих цифр), что позволяет минимизировать вероятность возникновения ошибок, обусловленных погрешностью вычислений.

Программа реализует расчет арки через эквивалентную балку, производится вычисление балочных моментов, балочных поперечных сил. Этот

метод дает достаточную картину распределения нагрузки и расположения опасных точек. Однако возможности программы также могут использоваться для классического расчета балок на изгиб, подсчёта величины поперечных сил и изгибающих моментов.

Программное обеспечение, разработанное в рамках данной работы, находит потенциальное применение в задачах авиастроения и ракетостроения. В частности, оно может быть использовано для решения таких актуальных задач, как расчет прочности крыла самолета [3], определение деформации топливных баков под воздействием изгибающих моментов [4] и анализ распределения напряжений в участках соединения ступеней ракет.

Представленная программная реализация предназначена для расчета арочных конструкций на основе метода эквивалентной балки. Модуль хранения данных (рисунок 1) обеспечивает ввод и хранение следующих параметров: геометрические характеристики балки (длина), информация о сосредоточенных нагрузках (величина и положение относительно начала балки), распределенных нагрузках (величина, координаты начала и конца действия) и внешних моментах (значение и координата приложения). По умолчанию, положение опор принимается на концах балки. Кроме того, предусмотрена возможность задания списка сечений балки, причем количество сечений определяется необходимой точностью расчета.

Блок ввода данных о нагрузках (рисунок 2) предназначен для формирования структурированных списков данных, используемых для последующих вычислений. В данном блоке осуществляется задание ориентации линий действия сил, величины внешнего воздействия и положения нагрузки относительно начала балки.

```
class Beam:
    def __init__(self, length):
        self.length = length
        self.point_loads = []
        self.distributed_loads = []
        self.external_moments = []
        self.supports = [0, length]
        self.sections = []
        self.shear_forces = {}
        self.bending_moments = {}
        self.n_sections = 100 # Значение по умолчанию
```

Рисунок 1 – Блок хранения
заносимых данных

```
def add_point_load(self, position, magnitude, direction='down'):
    mag = -abs(magnitude) if direction == 'down' else abs(magnitude)
    self.point_loads.append((position, mag))

def add_distributed_load(self, start, end, magnitude_start, magnitude_end=None, direction='down'):
    if magnitude_end is None:
        magnitude_end = magnitude_start
    mag_start = -abs(magnitude_start) if direction == 'down' else abs(magnitude_start)
    mag_end = -abs(magnitude_end) if direction == 'down' else abs(magnitude_end)
    self.distributed_loads.append((start, end, mag_start, mag_end))

def add_external_moment(self, position, magnitude, direction='ccw'):
    mag = abs(magnitude) if direction == 'ccw' else -abs(magnitude)
    self.external_moments.append((position, mag))
```

Рисунок 2 – Блок входных данных о
нагрузках

Базовый алгоритм расчёта балочных конструкций предполагает после задания начальных параметров системы произвести расчет реакций опор, для использования их в следующих итерациях работы программы. Система составляет уравнения моментов относительно опорных точек и через сумму моментов считает величину реакции опор (рисунок 3).

После расчёта реакций опор, программа разбивает балку на заданное количество сечений. Команда «def generate_sections(self, n_sections=N)» определяет количество разбиений (N – число сечений) (рисунок 4).

Когда найдены и описаны все входные данные, программа подсчитывает изгибающие моменты и значения поперечных сил. Для удобства и быстроты в блоке управления можно задавать количество нагрузок, их определенный тип и завершать ввод по мере необходимости (рисунок 5).

```
def calculate_reactions(self):
    sum_moments_A = 0

    for pos, mag in self.point_loads:
        sum_moments_A += mag * (pos - self.supports[0])

    for start, end, mag_s, mag_e in self.distributed_loads:
        if mag_s == mag_e:
            resultant = mag_s * (end - start)
            pos = start + (end - start) / 2
        else:
            resultant = (mag_s + mag_e) / 2 * (end - start)
            pos = start + (end - start) * (2 * mag_e + mag_s) / (3 * (mag_s + mag_e))
        sum_moments_A += resultant * (pos - self.supports[0])

    for pos, mag in self.external_moments:
        sum_moments_A += mag

    Rb = -sum_moments_A / (self.supports[1] - self.supports[0])

    sum_vertical = 0

    for _, mag in self.point_loads:
        sum_vertical += mag
```

Рисунок 3 – Расчет реакций опор

```
def generate_sections(self, n_sections=2):
    if n_sections is not None:
        self.n_sections = n_sections

    self.sections = [self.length * i / self.n_sections for i in range(self.n_sections + 1)]

    for pos, _ in self.point_loads + self.external_moments:
        if pos not in self.sections:
            self.sections.append(pos)

    for start, end, _, _ in self.distributed_loads:
        if start not in self.sections:
            self.sections.append(start)
        if end not in self.sections:
            self.sections.append(end)

    self.sections = sorted(list(set(self.sections)))
```

Рисунок 4 – Разбиение балки на участки

```
def main():
    print("РАСЧЕТ ДВУХОПОРНОЙ БАЛКИ С РАЗНЫМИ ТИПАМИ НАГРУЗОК")

    length = input_float(prompt: "\nВведите длину балки (м): ", min_val: 0.1)
    beam = Beam(length)

    while True:
        print("\n=== МЕНЮ ДОБАВЛЕНИЯ НАГРУЗОК ===")
        print("1. Добавить сосредоточенную силу")
        print("2. Добавить распределенную нагрузку")
        print("3. Добавить внешний момент")
        print("4. Задать количество участков разбиения")
        print("5. Завершить ввод нагрузок и выполнить расчет")
```

Рисунок 5 – Блок управления при вводе

В качестве примера рассмотрим двухопорную балку длиной 2 метра со сосредоточенной силой посередине пролета величиной 10 Н (рисунок 6). Количество разбиений на участке зададим равным 10.

На рисунке 7 представлены результаты расчета. На простейшем примере можно наглядно проследить воздействие нагрузок и изменение внутренних силовых факторов балки.

Проведенное исследование подтвердило эффективность предложенного численного метода расчета арочных конструкций, основанного на модели эквивалентной балки и реализованного с использованием языка программирования Python. Комплексная оценка полученных результатов свидетельствует о ряде существенных преимуществ разработанного подхода, а именно: высокая степень точности вычислений (до 16 значащих цифр), обусловленная применением современных вычислительных алгоритмов; исключение зависимости от дорогостоящего коммерческого программного

A horizontal beam of length 2 meters is shown. At the left end (A), there is a pin support with an upward reaction force R_A . At the right end (B), there is a roller support with an upward reaction force R_B . A downward point load $F = 10\text{ H}$ is applied at a distance of 1 meter from the left end. The distance from the left end to the right end is labeled as 2 метра.

```

=== РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА БАЛКИ ===

Длина балки: 2.0 м
Количество участков разбиения: 10

=== ПРИЛОЖЕННЫЕ НАГРУЗКИ ===

Сосредоточенные силы:
1. Позиция: 1.00 м, Величина: 10.00 Н, Направление: вниз

=== РЕАКЦИИ ОПОР ===

Ra = 5.00 Н (левая опора)
Rb = 5.00 Н (правая опора)

=== РЕЗУЛЬТАТЫ ПО СЕЧЕНИЯМ ===

Сечение (м) Поперечная сила (Н) Изгибающий момент (Н·м)
0.000      5.00      0.00
0.200      5.00      1.00
0.400      5.00      2.00
0.600      5.00      3.00
0.800      5.00      4.00
1.000      5.00      5.00
1.200     -5.00      4.00
1.400     -5.00      3.00
1.600     -5.00      2.00
1.800     -5.00      1.00
2.000     -5.00      0.00

```

Представленный в работе алгоритм прошел верификацию на тестовом примере расчета двухопорной балки, результаты которого продемонстрировали адекватность и достоверность предлагаемого подхода. В контексте практической значимости, разработанная методика представляется особенно актуальной для решения задач анализа напряженно-деформированного состояния критически важных элементов конструкций летательных аппаратов, таких как крылья, топливные баки и стыковочные узлы, где точность расчетов оказывает непосредственное влияние на безопасность и надежность эксплуатации. Перспективы дальнейшего развития метода заключаются в расширении функциональности программного комплекса посредством реализации трехмерного моделирования, интеграции с современными CAD-системами (Computer-Aided Design) и внедрения алгоритмов оптимизации конструктивных параметров. Значимым результатом настоящего исследования является создание доступного и верифицированного инструмента для инженерных расчетов,

который потенциально может выступать в качестве эффективной альтернативы дорогостоящему специализированному программному обеспечению, при этом сохраняя требуемую точность и надежность результатов.

Список использованной литературы

1. Овсянко, В. М. Моделирование дифференциальных уравнений при расчёте на поперечный и продольно-поперечный изгиб стержневых систем без учета и с учетом вязкоупругих свойств материалов // Наука и техника. – 2012. – № 4. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-different-sialnyh-uravneniy-pri-raschete-na-poperechnyy-i-prodolno-poperechnyy-izgib-sterzhnevyyh-sistem-bez-ucheta-i-s> (дата обращения: 02.06.2025).
2. Орешин, Г. Ю. Решение задачи строительной механики по расчёту трехшарнирной, вертикально нагруженной арки параболического абриса в вычислительной среде Mathcad / Г. Ю. Орешин, А. Н. Начарова // ИВД. – 2019. – №1 (52). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/reshenie-zadachi-stroitelnoy-mehaniki-po-raschetu-trehsharnirnoy-vertikalno-nagruzhennoy-arki-parabolicheskogo-abrisa-v> (дата обращения: 02.06.2025).
3. Станкевич, М. Д. Расчёт на прочность основных элементов крыла / М. Д. Станкевич, Л. А. Достовалова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2011. – №7. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-na-prochnost-osnovnyh-elementov-kryla> (дата обращения: 02.06.2025).
4. Амелина, Е. В. Расчётно-экспериментальная оценка прочности металлокомпозитного бака высокого давления / Е. В. Амелина, А. Е. Буров, С. К. Голушко, А. М. Лепихин, В. В. Москвичев, А. В. Юрченко // ЖВТ. – 2016. – №5. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschetno-eksperimentalnaya-otsenka-prochnosti-metallokompozitnogo-baka-vysokogo-davleniya> (дата обращения: 02.06.2025).
5. Изучение свойств арочных конструкций с использованием интерактивной модели [Электронный ресурс] : методические указания для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 07.03.01 Архитектура, 07.03.03 Дизайн архитектурной среды, 08.03.01 Строительство / сост.: Е. В. Дырдина, Е. В. Пояркова ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Оренбург. гос. ун-т», Каф. механики материалов, конструкций и машин. – Оренбург : ОГУ. – 2022. – 32 с.
6. Дырдина, Е. В. Основы статики сооружений: теоретическая и строительная механика для архитекторов [Электронный ресурс] : учебное пособие для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 07.03.01 Архитектура и 07.03.03 Дизайн архитектурной среды: в 2 т. / Е. В. Дырдина; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш.

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF AN ALGORITHM FOR CALCULATION OF ARCHED STRUCTURES BASED ON AN EQUIVALENT BEAM USING PYTHON

Vasilchenko Fyodor Vyacheslavovich, Bachelor's degree, 2nd year
Frolova Olesya Alexandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Orenburg State University

Abstract. *This paper presents an effective numerical method for calculating arched structures based on the equivalent beam concept. The algorithm is implemented in Python and allows achieving high accuracy of results comparable to specialized commercial software, while eliminating the need to purchase it. The developed program automates the calculation of beam moments, shear forces, and the determination of the most loaded sections, which makes it applicable in a wide range of engineering problems, including design in the aerospace industry. The article describes in detail the algorithm, including the stages of data entry, calculation of support reactions, and discretization of the structure. An example of calculating a two-support beam is given to demonstrate the capabilities of the method. The proposed approach significantly reduces dependence on commercial packages and minimizes the risk of errors in calculations.*

Keywords: *arch structures, equivalent beam, Python, strength calculation, bending moments, rocket science, aircraft engineering.*

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СЕТЧАТОЙ КУПОЛЬНОЙ КРЫШИ РЕЗЕРВУАРА

Закирничный Евгений Григорьевич, аспирант

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Аннотация. Рассмотрены авторские исследования в области численного моделирования сетчатых купольных крыш резервуаров. Разработана модель крыши алюминиевого резервуара с учетом изменившихся нормативных документов, проведены расчеты на прочность и устойчивость конструкции.

Ключевые слова: авторские исследования; купольная крыша; моделирование; снеговая нагрузка, критические напряжения.

Код и рубрика: 81.14.13 Методы проектирования и конструирования

Сетчатые купольные конструкции (далее купольные крыши) для покрытия резервуаров активно используются в международном строительстве благодаря экономичности в расходе металла и исключительной прочности при покрытии каждой единицы площади.

Современные исследования в сфере математического моделирования купольных крыш резервуаров представляют собой разностороннюю работу, позволяющую глубже проникнуть в суть проблемы. Так, в [1] представлен всесторонний анализ эволюции купольных конструкций, выполненных из разнообразных материалов, с акцентом на их формирование, расчёт и проектирование.

В работе детально рассматривается перспективный метод повышения эффективности таких конструкций – использование предварительного напряжения посредством высокопрочных затяжек. Особое внимание уделяется практическому аспекту: приводится подробный пример расчёта сетчатого металлического купола. Материал изложен таким образом, чтобы обеспечить как теоретическое понимание процессов проектирования купольных конструкций, так и практическое применение полученных знаний при решении реальных инженерных задач.

В [2] авторы детально описывают методику расчёта напряжённо-деформированного состояния (НДС) ребристо-кольцевой купольной крыши резервуара объёмом 50 000 м³ для хранения сжиженного природного газа. Исследования проводились с использованием программного комплекса SCAD Office. Научная значимость работы заключается в определении количественного влияния остаточных напряжений.

В [3] содержатся сведения о результатах исследования прочности резервуарных конструкций в расчетных и за расчетными сроками эксплуатации, при воздействии расчетных и за расчетными нагрузками, при наличии в конструкциях дефектов и повреждений.

Тем не менее, с учетом постоянно развивающегося компьютерного моделирования и изменений нормативных документов требуется

совершенствование конструкции и методики расчёта сетчатой купольной крыши резервуара на прочность и устойчивость, первой частью которого является переделка модели купольной крыши с учетом изменившихся нормативных документов.

Построение схемы

Напряженно-деформированное состояние несущих элементов купольной крыши определяется их пространственной работой. Для моделирования работы таких конструкций наиболее приемлемым является метод конечных элементов (МКЭ). Расчет конструкции крыши производится при помощи программного комплекса «SCAD», реализующего данный метод.

Каркас купольной крыши представляет собой систему, состоящую из набора стержней (двутаврового и квадратного сечения). Соединение стержней между собой в узлах жесткое, соединение купольной крыши с опорной частью резервуара – шарнирное. Жесткость настила купольной крыши при расчете не учитывается. Резервуар и опорная часть представлены в виде пластин различной толщины.

Климатические условия, принятые для построения следующие:

- нормативное значение снеговой нагрузки – 1,45 кПа – 3 район;
- нормативное значение ветровой нагрузки – 32 кг/м²;
- сейсмоустойчивость района строительства – 6 баллов.

Модель каркаса алюминиевой купольной крыши для резервуара диаметром 10430 мм с радиусом кривизны равным $R_k=1,2 \cdot D$, где D – диаметр резервуара.

Параметры купольной крыши приведены на рисунке 1 и таблице 1. Механические свойства применяемых материалов представлены в таблице 2.

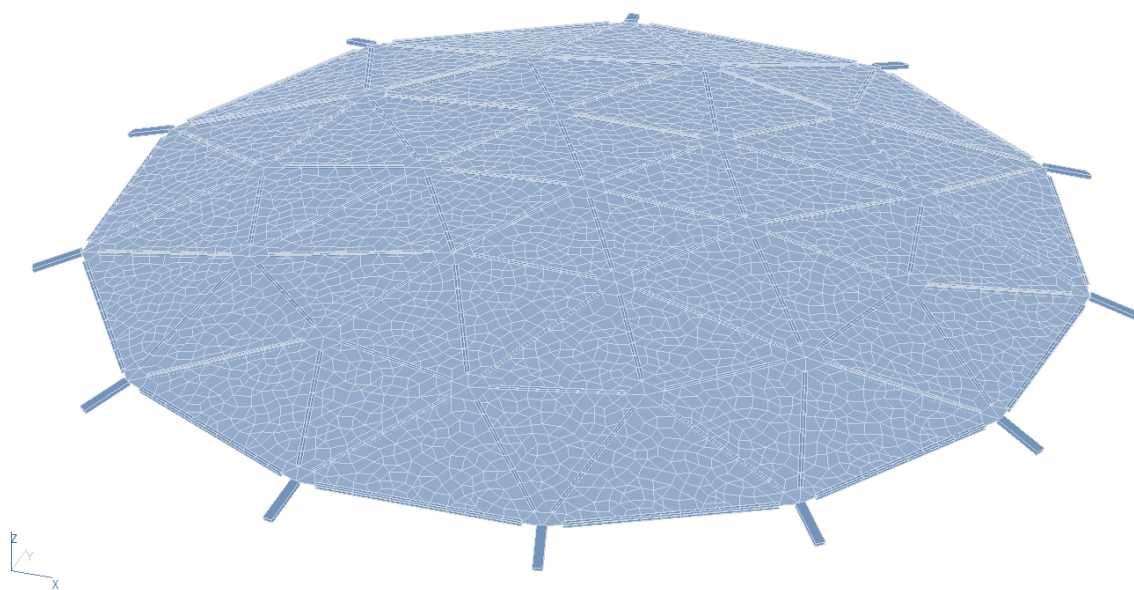


Рисунок 1 – 3D-модель крыши

Таблица 1 – Характеристики купольной конструкции

№	Параметр	Значение
1	Диаметр крыши без опорных балок по осям, м	9,328
2	Высота крыши без опорных балок по осям, м	0,901
3	Высота крыши с опорными балками по осям, м	1,138
4	Коэффициент кривизны купольной крыши	1,2
5	Радиус кривизны, м	12,516
6	Высота стенки резервуара, м	3
7	Избыточное давление, кПа	Отсутствует
8	Относительное разрежение, кПа	Отсутствует
9	Минимальное расстояние между центрами узлов, м	0,6
10	Максимальное расстояние между центрами узлов, м	2,2
11	Число поясов (основных)	3
12	Количество узлов	31
13	Количество балок	90

Таблица 2 – Механические характеристики применяемых материалов

Материал	Механические свойства		Нормативный документ	Элемент конструкции
	предел текучести, МПа	предел прочности, МПа		
АД31Т1	196	235	ГОСТ 8617-2018	Несущие балки
АД35Т1	272-278	309-310	ГОСТ 8617-2018	Опорные балки
АД33Т1	264	304	ТУ 1-804-425-2005	Усиливающие накладки
09Г2С	355	490	ГОСТ 9281-2014	Стенка, опорное кольцо, опорный кронштейн
АМгЗМ	195	100	ГОСТ 21631 2019	Настил
40Х	490	655	ГОСТ 1050-88	Центральная часть опорной оси
12Х18Н10Т	196	510	ГОСТ 9941-81	Втулка из нержавеющей стали

Купольная крыша – конструкция, которая представляет собой несущий каркас с ограждающими элементами в виде алюминиевой обивки толщиной 1,2 мм по листовой поставки. Несущий каркас выполнен в сетчатом варианте.

Стрежневая сетка имеет 12 опорных кронштейнов. Модель построена с учетом требований, представленных в [4].

Расчет основных нагрузок

Полное расчетное значение снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия S определяется по формуле (1):

$$S = S_g \cdot c_t \cdot c_e \cdot \mu, \quad (1)$$

где $S_g = 1,45$ кПа – расчетное значение веса снегового покрова на 1 м^2 горизонтальной поверхности земли;

μ – коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие;

c_t – термический коэффициент, принимаемый в соответствии 10.10 СП 20.13330.2016 [5];

c_e – коэффициент, учитывающий снос снега с покрытий зданий под действием ветра или иных факторов, принимаемый в соответствии 10.5-10.9 СП 20.13330.2016.

Максимальное значение коэффициента перехода для варианта 1 $\mu_1=1$ при угле наклона покрытия $\alpha=30^\circ$. Полное расчетное значение снеговой нагрузки в данном случае.

Для варианта 2 значение коэффициента перехода определим по формуле:

$$\mu_2 = C_{r1} \cdot \left(\frac{z}{r_1}\right)^2 \cdot \sin\beta, \text{ где } C_{r1} = 2,55 - \exp \cdot (0,8 - 14 \cdot \frac{f}{d}). \quad (2)$$

При $z > r_1$ $\mu_3 = 1,5 \cdot \sin\beta$ при $\alpha=45^\circ$; $\mu_3=0$ при $\alpha=60^\circ$.

Для варианта 3 значение коэффициента перехода определим по формуле:

$$\mu_3 = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot f}{d} \cdot \sin(3 \cdot \alpha)} \cdot \sin\beta. \quad (3)$$

Расчет нагрузок проводился в программе в программном комплексе SCAD – численный расчет.

Аналитический расчет проведен по [5].

Значения напряжений от сочетания нагрузок для каждого из расчетов приведены в таблице 3.

Было получено, что наибольшие напряжения возникают при действии 3 варианта нагрузок, однако даже полной снеговой нагрузки оказалось недостаточно, чтобы напряжения достигли значений, превышающих предел прочности балок.

Поэтому вводился коэффициент, который увеличивал значение нагрузки – коэффициент СВ+(СНЗ·1,2), при котором нагрузка составила 223,4 МПа.

Таблица 3 – Значения нагрузки

№ комбинации	Вид сочетания	Численный расчет максимальные значения напряжений, МПа	Аналитический расчет максимальные значения напряжений, МПа
1	СВ	1,88	1,78
2	СВ+СН2	148,2	150,2
3	СВ+СН3	186,5	189,4

В дальнейшем планируется проведение натурного эксперимента, основная цель которого - совершенствование конструкции и методики расчёта сетчатой купольной крыши резервуара на прочность и устойчивость.

Список использованной литературы

1. Тур, В. И. Купольные конструкции. Формообразование, расчет, конструирование, повышение эффективности. Учебное пособие / В. И. Тур. – Издательство АСВ. – 2004. – 96 с.
2. Кардапольцев, А.В. Анализ прочности ребристо-кольцевой купольной крыши резервуара с учетом физической нелинейности металла / А. В. Кардапольцев, М. Г. Каравайченко, И. Ф. Кантемиров // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2021. – № 5-6. – С. 37–43.
3. Каравайченко, М. Г. Прочность и живучесть резервуаров: монография / М. Г. Каравайченко. – СПб.: Наукоемкие технологии. – 2023. – 524 с.
4. ГОСТ 31385-2023. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. – М. Стандартинформ. – 2023.
5. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. – М.: Минстрой России. – 2016.

DEVELOPMENT OF A MODEL OF A MESH DOME ROOF OF A TANK

Zakirnichny Evgeny Grigorivich graduate student

Ufa state petroleum technical university, Ufa

Abstract. *The author's research in the field of numerical modeling of mesh dome roofs of reservoirs is considered. A model of the roof of an aluminum tank has been developed taking into account the changed regulatory documents, calculations have been carried out for the strength and stability of the structure.*

Keywords: *author's research; domed roof; modeling; snow load, critical stresses.*

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСЧЕТОВ ПРОСТЕЙШИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ (SCAD, ЛИРА)

Габдрафикова Алина Арсеновна, Николаева Анна Владимировна,
студенты бакалавриата, 2 курс

Оренбургский государственный университет

Аннотация: Расчет простейших конструкций очень важен при строительстве здания. Чтобы минимизировать ошибки в расчете и ускорить процесс, применяют специальные программы, которые следует знать и уметь ими пользоваться.

Работа выполнена на кафедре механики материалов, конструкций и машин Оренбургского государственного университета **под руководством Фроловой Олеси Александровны**, кандидата технических наук, доцента, доцента кафедры механики материалов, конструкций и машин.

Ключевые слова: конструкции, расчеты, программа, «Лира», «SCAD».

Код и рубрика: 67.00.00 Строительство. Архитектура.

Простейшие конструкции являются основой сложнейших расчетов в строительстве. Это непосредственная база для вычисления конструкции любой сложности.

В современном строительстве и инженерии применение программных комплексов для расчета конструкций стало неотъемлемой частью проектного процесса. Эти системы позволяют значительно повысить точность и надежность проектируемых объектов, а также сократить время на выполнение расчетных работ. Использование программных комплексов обеспечивает автоматизацию сложных вычислений, моделирование различных нагрузок и условий эксплуатации, что в итоге способствует созданию более безопасных и долговечных конструкций. Благодаря современным программным инструментам инженеры и проектировщики получают возможность получать более детальные и точные результаты, быстро реагировать на изменения в проекте и оптимизировать использование материалов, что, в конечном итоге, обеспечивает экономию ресурсов и повышение конкурентоспособности.

Рассмотрим программный комплекс «Лира» (рис.1), который предназначен для механического и геометрического расчета различных строительных и монтажных конструкций. Обеспечивает автоматизацию проектирования, анализ прочности, устойчивости и деформативности конструкций, что позволяет повысить качество и безопасность строительных решений. «Лира» обладает удобным интерфейсом и широкими возможностями моделирования, что делает его незаменимым инструментом для инженеров и специалистов в области гражданского и промышленного строительства.

Программное обеспечение «Ли́ра» помогает осуществлять функции такие как моделирование конструкций, пользователи сами могут создать трехмерные модели зданий и сооружений, анализ нагрузки. Комплекс осуществляет расчет на прочность материалов и устойчивость конструкций на основе заданных условий.

«Ли́ра» может сделать отчеты по расчетам, которые включают в себя результаты и графики.

Программный комплекс «Ли́ра» активно используется в России и других странах СНГ, и считается одним из стандартных инструментов для проектирования в области гражданского строительства [4].

Программный комплекс SCAD (рис.2) предназначен для автоматизированного моделирования и расчета строительных конструкций. Он обеспечивает анализ прочности, устойчивости и деформативности элементов, что способствует оптимизации проектных решений и повышению безопасности объектов. SCAD обладает интуитивным интерфейсом и мощными инструментами для создания точных моделей, что делает его эффективным средством для инженеров-строителей и проектировщиков.

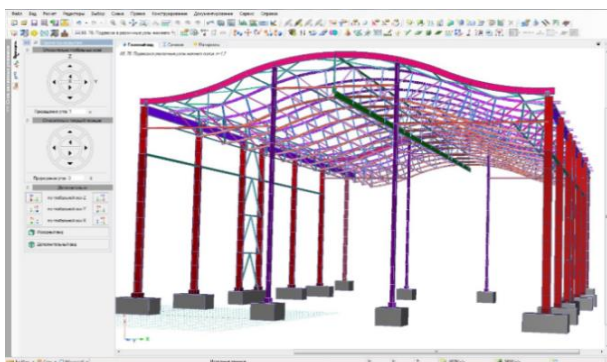


Рисунок 1 – Пример расчета в программном комплексе «Ли́ра. Версия 10.6»

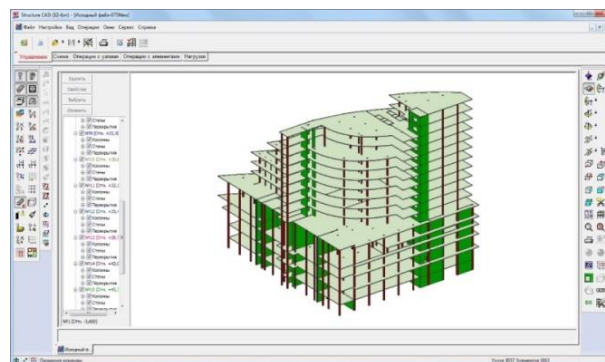


Рисунок 2 – Пример расчета в программном комплексе SCAD

Программное обеспечение SCAD имеет широкий функционал такие как: 3D-моделирование, хороший выбор инструментов для расчета и оценки прочности, устойчивости и других характеристик конструкций, дает возможность работы с различными строительными материалами и их свойствами, осуществляет автоматическую генерацию рабочей документации и чертежей на основе 3D-моделей, имеет совместимость с другими CAD-системами: Импорт и экспорт файлов в различных форматах для удобства работы с другими программными комплексами.

SCAD часто используется инженерами-строителями, архитекторами и проектировщиками для упрощения и ускорения процессов проектирования и анализа конструкций.

Различия между программными комплексами «SCAD» и «Ли́ра» представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Различия программных комплексов (ПК) «SCAD» и «Лира»

ПК	Достоинства	Недостатки
«Лира»	1. Высокая точность расчетов (обеспечивает надежные и соответствующие стандартам результаты). 2. Широкие возможности моделирования (подходит для различных типов конструкций, даже простых). 3. Автоматизация расчетных задач (значительно ускоряет работу и сокращает ошибки). 4. Интеграция с проектной документацией (позволяет удобно использовать результаты в проектных документах). 5. Поддержка регламентных нормативов (учитывает актуальные строительные стандарты). 6. Гибкий пользовательский интерфейс (позволяет быстро осваивать и работать с программой). 7. Техническая поддержка и обновления (гарантируют актуальность и надежность программы).	1. Сложность для новичков (требуется некоторого обучения и навыков работы). 2. Иногда избыточная функциональность (для простых конструкций может быть слишком тяжелым и сложным). 3. Медленная обработка небольших задач (при решении простых расчетов может казаться избыточным или менее быстрым). 4. Цена (стоимость лицензии может быть высокой для пользователей, занимающихся только простыми расчетами). 5. Обучение и поддержка (требуется времени на освоение и наличие соответствующей документации и поддержки). 6. Интерфейс (может казаться «неинтуитивным» для определённых видов расчетов).
«SCAD»	1. Простота использования (удобно для быстрого моделирования и анализа без необходимости глубоких знаний программирования). 2. Высокая точность (позволяет получать надежные результаты расчетов). 3. Автоматизация процессов (сокращает время проектирования за счет автоматизации расчетов и проверки условий). 4. Гибкость (легко модифицировать модели и параметры конструкции). 5. Встроенные библиотеки (имеют доступ к стандартным материалам и элементам). 6. Визуализация (помогает видеть модель и результаты прямо в процессе разработки). 7. Стоимость (доступен по сравнению с более сложными CAD/CAE системами).	1. Ограниченные возможности для сложных расчетов (лучше подходит для проектирования простых конструкций, при сложных задачах может быть недостаточно функционала). 2. Меньшая автоматизация по сравнению с профессиональными CAD/CAE системами (требуется дополнительных настроек и ручных операций). 3. Интерфейс может быть менее интуитивным для новичков (требуется время на освоение). 4. Ограниченная поддержка нормативных требований (может не учитывать все актуальные стандарты). 5. Редкие обновления и развитие (программа развивается медленно, что может сказываться на совместимости и новых возможностях).

На рисунке 3 показан пробный расчет простой конструкции в программном комплексе «SCAD», для сравнения удобства двух программ также был проведен расчет простой конструкции в программном комплексе «Лира-Сапр 2017».

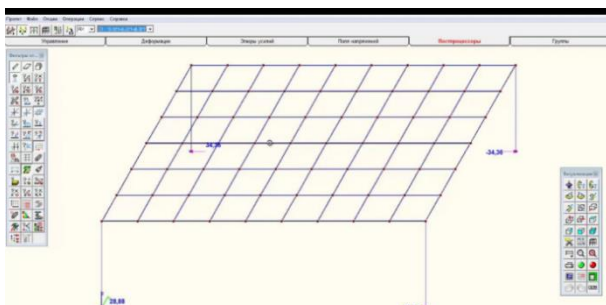


Рисунок 3 – Расчет простой конструкции в программном комплексе «SCAD»

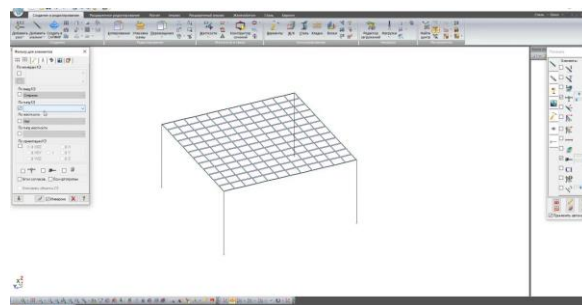


Рисунок 4 – Расчет простой конструкции в программном комплексе в «Лира-Сапр. 2017»

Вывод по исследованию двух программных комплексов Лира и SCAD показывает, что для расчета простейших конструкций более удобным и практичным является программный комплекс Лира. Он обладает интуитивным интерфейсом, простотой в использовании и требует меньших временных затрат на освоение, что делает его предпочтительным инструментом для начальных и быстрых расчетов. SCAD, в свою очередь, более мощный и гибкий, что подходит для сложных и многоэлементных конструкций, однако при расчетах простых конструкций его использование может быть избыточным и позволяет усложнить рабочий процесс [5, 6].

Таким образом, для постановочных задач, связанных с расчетом простых конструкций, предпочтительнее использовать Лиру благодаря её удобству и эффективности.

Список использованной литературы

1. Карпиловский, В. С. SCAD Office. Формирование сечений и расчет их геометрических характеристик. Учебное пособие / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. А. Маляренко, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер. – Киев: УкрНИИпроектстальконструкция. – 2024. – 134 с. – ISBN 978-617-7031-94-8. – Режим доступа: <https://scadsoft.com/download/Section1049.pdf> (дата обращения 03.06.2025).

2. Ромашкина, М. А. Программный комплекс ЛИРА-САПР®. Руководство пользователя. Обучающие примеры [Электронное издание] / М. А. Ромашкина, В. П. Титок : под редакцией академика РААСН А.С. Городецкого. – 2018. – 254 с. – Режим доступа: https://rflira.ru/files/lira-sapr/Book_LIRA_SAPR_2018.pdf (дата обращения 03.06.2025).

3. Ковальчук, О. А. Введение в программный комплекс ЛИРА 10.4 [Электронный ресурс] : учебное пособие / О. А. Ковальчук, А. В. Колесников,

Е. М. Русанова [и др.] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. унт. – Электрон. дан. и прогр. (10 Мб). – Москва : НИУ МГСУ, 2015. – ISBN 978-5-7264-1093-7. – Режим доступа: <http://lira3soft.com/wiki/manuals/> (дата обращения 03.06.2025).

4. Фролова, О. А. Компьютерное моделирование сложной пространственной стержневой конструкции [Электронный ресурс] / О. А. Фролова, А. В. Чухломин // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всерос. науч.-метод. конф. (с междунар. участием), 23-25 янв. 2020 г., Оренбург / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Оренбург. гос. ун-т». – Электрон. дан. – Оренбург : ОГУ. – 2020. – С. 761-765.

5. Фролова, О. А. Моделирование конструкций с помощью архитектурных элементов [Электронный ресурс] : учебное пособие для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательную область «Инженерное дело, технологии и технические науки» / О. А. Фролова; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Оренбург. гос. ун-т». – Оренбург : ОГУ. – 2020. – ISBN 978-5-7410-2489-8. – 102с.

6. Фролова, О. А. Опыт применения программного комплекса лира 10.6 в образовательной деятельности обучающихся инженерных направлений подготовки / О. А. Фролова, Е. В. Пояркова // В сборнике: Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Материалы Всероссийской научно-методической конференции. – 2019. – С. 1003-1006.

INVESTIGATION OF CALCULATIONS OF THE SIMPLEST BUILDING STRUCTURES FOR STRENGTH AND STABILITY USING SOFTWARE PACKAGES (SCAD, LIRA)

Gabdrafikova Alina Arsenovna, Nikolaeva Anna Vladimirovna, 2nd year undergraduate students

Orenburg State University

Abstract: *The calculation of the simplest structures is very important during the construction of a building. To minimize calculation errors and speed up the process, special programs are used that require you to know and be able to use them.*

The work was carried out at the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines of the Orenburg State University under the supervision of Olesya Aleksandrovna Frolova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines.

Keywords: *constructions, calculations, program, «Lira», «SCAD».*



СЕКЦИЯ 7

«ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИКИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ»

ПРОГРАММА ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА БАЗЕ ПРОЦЕССОРА TMS320F28379D

Рассохин Сергей Александрович, студент магистратуры, 2 курс

Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Аннотация: Работа выполнена на кафедре мехатронных систем Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова под руководством Никитина Юрия Рафаиловича и Трефилова Сергея Александровича, кандидатов технических наук, доцентов, доцентов кафедры мехатронных модулей и Пономарева Дмитрия Андреевича, инженера-исследователя. Разработана программа векторного управления бесколлекторным двигателем постоянного тока (БДПТ) на базе процессора TMS320F28379D. В программе задается мертвое время для обеспечения задержки времени включения силовых MOSFET транзисторов. MOSFET транзисторы расположены на плате драйвера. Для управления моментом используется ШИМ сигналы, формируемые для каждой фазы. Для управления угловым положением ротора используется вектор напряжения, состоящий из трех составляющих напряжений, подающихся на каждую фазу БДПТ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00792, <https://rscf.ru/project/25-29-00792/>.

Ключевые слова: векторное управление, бесколлекторный двигатель постоянного тока, процессор TMS320F28379D.

Код и рубрика: 45.41.31 Электропривод переменного тока

Введение

В настоящее время все большее распространение получают электроприводы на основе бесколлекторных двигателей с постоянными магнитами (БДПТ).

К преимуществам БДПТ относятся:

- улучшенные массогабаритные показатели двигателей;
- более высокий коэффициент мощности двигателя, что потенциально позволяет получить более высокое отношение между электромагнитным моментом двигателя и током, потребляемым от преобразователя;
- уменьшенный момент инерции, позволяющий повышать предельные динамические показатели привода;
- отсутствие коллекторно-щеточного узла и соответственно электромагнитных помех.

К недостаткам БДПТ относятся более высокая стоимость двигателей, несколько меньшая их надежность по сравнению с асинхронным двигателем и меньшая технологичность производства, зависимость от поставок постоянных магнитов, сложное управление.

Область применения БДПТ: электропривод для беспилотных воздушных судов, мобильных роботов, высококачественный электропривод подач металлорежущих станков. Основные характеристики контура регулирования скорости: диапазон регулирования – не менее 10000, полоса пропускания – не менее 100 Гц. Особенности векторного управления БДПТ рассмотрены в работах [1-9].

Математическая основа векторного регулирования приводом – дифференциальные уравнения, описывающие привод одинаково корректно и в динамике, и в статике. В силу адекватности управления в динамике векторное управление, в отличие от скалярного, дает возможность строить высокодинамичные и прецизионные электроприводы переменного тока, обеспечивающие наивысшую точность и скорость регулирования. Кроме того, при векторном регулировании используется представление трехфазных величин в виде обобщенных векторов и модель системы управления строятся во вращающихся координатах [10-17].

Для измерения положения ротора наиболее часто используют три датчика Холла. Реже применяются БДПТ с квадратурными энкодерами. Помимо систем управления с датчиками существуют и бездатчиковые системы управления, принцип действия которых заключается в измерении ЭДС в свободной фазе [18-20].

При вращении ротора с постоянными магнитами наводится электродвижущая сила (ЭДС) в обмотках БДПТ. Для того чтобы этот метод корректно работал, ротор должен находиться в движении. Этот метод хорошо работает при сравнительно высоких скоростях вращения ротора. При низких скоростях вращения наводимая ЭДС может оказаться недостаточной для четкого определения положения ротора. При реализации векторного управления в пространстве состояний в системах управления возникает необходимость использования датчиков тока фаз в силовом преобразователе.

В силовом преобразователе могут применяться датчики электрического тока на основе эффекта Холла, датчики Холла компенсационного типа и датчики на основе низкоомных сопротивлений. Если схема имеет небольшую мощность и низкий уровень напряжения, то используются датчики на основе низкоомных сопротивлений. Датчики тока расположены в двух фазах БДПТ, ток третьей фазы вычисляется по первому закону Кирхгофа, как сумма измеренных токов первой и второй фаз с обратным знаком:

Сигналы с датчиков тока поступают на вход АЦП, период опроса каналов которого синхронизирован с частотой векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Сигналы напряжения на двух фазах БДПТ поступают с делителя напряжения на вход АЦП.

Эффективным способом управления является применение систем со скользящими режимами (Sliding Mode Systems) [21-24].

Разработка алгоритма и программы управления БДПТ

В данной статье приведена программа векторного управления бесколлекторным двигателем постоянного тока на базе процессора TMS320F28379D. Данный процессор выбран, т.к. он обладает высокой

производительностью и встроенным модулем для приема сигналов с квадратурного энкодера.

На статоре двигателя имеются три обмотки (А, В, С), сдвинутые в пространстве на 120 градусов. Каждая обмотка состоит из двух секций, включенных встречно. Таким образом, при протекании тока в обмотке она создает внутри двигателя два полюса (положительный и отрицательный), к которым и притягивается магнитный ротор. Такая конструкция обмотки называется сосредоточенной. Обычно для нее характерна трапецеидальная форма ЭДС. В дальнейшем рассмотрении будем считать нулевым угловое положение ротора (θ_R), при котором вектор потока ротора совпадает по направлению с осью фазы А (осью обмотки А). Уравнения равновесия статорных обмоток БДПТ при его включении в «звезду» в неподвижных фазных координатах АВС имеют вид:

$$U_{A\phi} = \frac{d\psi_A}{dt} + I_A R_\phi, \quad (1)$$

$$U_{B\phi} = \frac{d\psi_B}{dt} + I_B R_\phi, \quad (2)$$

$$U_{C\phi} = \frac{d\psi_C}{dt} + I_C R_\phi, \quad (3)$$

где $U_{A\phi}$, $U_{B\phi}$, $U_{C\phi}$ – фазные напряжения,

ψ_A , ψ_B , ψ_C – потокосцепления фазных обмоток,

I_A , I_B , I_C – токи фаз,

R_ϕ – активное сопротивление фазной обмотки.

Поток в обмотке каждой фазы формируется из следующих составляющих:

- поток, наводимый собственным током фазы;
- поток, наводимый магнитными полями других фазных обмоток;
- поток, наводимый в обмотке магнитами ротора.

Как показано системой уравнений:

$$\psi_A = L_A I_A + L_{AB} I_B + L_{AC} I_C + \psi_{fA}, \quad (4)$$

$$\psi_B = L_B I_B + L_{BC} I_C + L_{AB} I_A + \psi_{fB}, \quad (5)$$

$$\psi_C = L_C I_C + L_{AC} I_A + L_{BC} I_B + \psi_{fC}, \quad (6)$$

где L_A , L_B , L_C – индуктивность фазных обмоток,

L_{AB} , L_{BC} , L_{AC} – взаимные индуктивности обмоток,

ψ , ψ , ψ – потокосцепления, наводимые в обмотках магнитом ротора.

Для формирования вращающего электромагнитного поля формируется вектор ЭДС, равный сумме векторов ЭДС каждой фазы (для равномерной скорости вращения ротора). Для реализации вращающегося вектора электромагнитного поля

статора на фазы А, В, С нужно подавать синусоидальное напряжение со сдвигом фаз 120° .

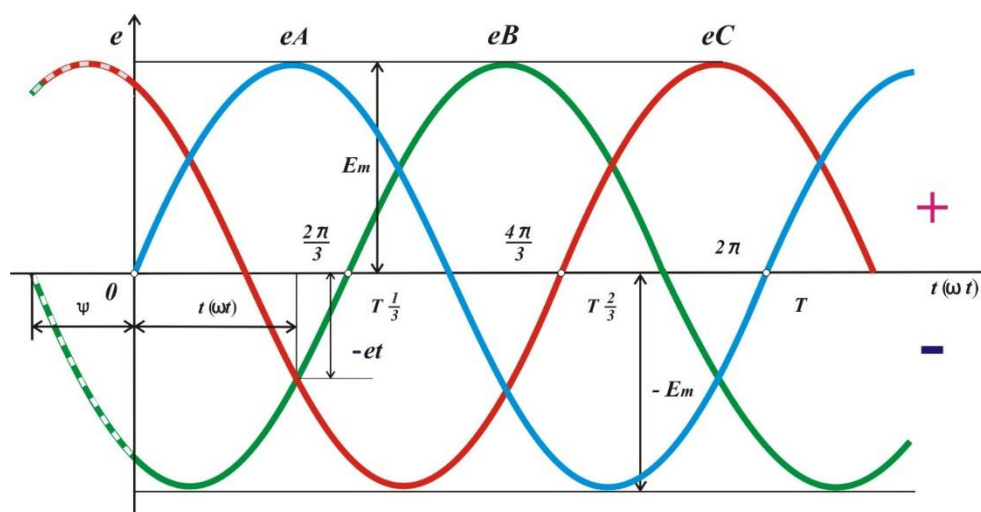


Рисунок 1 – Напряжение на фазах А, В, С для вращения ротора БДПТ с постоянной скоростью

Синусоиды формируются широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Если требуется ускорение или торможение ротора, то необходимо ускорение или торможение вращения вектора ЭДС, что достигается изменением периода ШИМ.

Для обеспечения эффективного ШИМ-регулирования необходимо правильно рассчитать параметры управляющего сигнала. Частота ШИМ является критическим параметром и определяет, как часто будут повторяться импульсы. Для различных типов двигателей рекомендуемая частота ШИМ для управления электрическими двигателями отличается, как показано в таблице 1.

Ядром системы управления БДПТ является цифровой сигнальный процессор TMS320F28379D фирмы Texas Instruments на плате LAUNCHXL-F28379D.

Для реализации ШИМ используется модуль ePWM процессора TMS320F28379D. Необходимо настроить 6 выводов (по 2 вывода на каждую фазу БДПТ) GPIO TMS320F28379D на альтернативную функцию EPWM. Фрагмент текста программы настройки портов GPIO приведен ниже.

```
// Настройка GPIO0/1, GPIO2/3, GPIO4/5 как ePWM1A/1B, ePWM2A/2B, ePWM3A/3B
//
GPIO_setPadConfig(0, GPIO_PIN_TYPE_STD);
GPIO_setPinConfig(GPIO_0_EPWM1A);
GPIO_setPadConfig(1, GPIO_PIN_TYPE_STD);
GPIO_setPinConfig(GPIO_1_EPWM1B);
GPIO_setPadConfig(2, GPIO_PIN_TYPE_STD);
GPIO_setPinConfig(GPIO_2_EPWM2A);
GPIO_setPadConfig(3, GPIO_PIN_TYPE_STD);
GPIO_setPinConfig(GPIO_3_EPWM2B);
GPIO_setPadConfig(4, GPIO_PIN_TYPE_STD);
GPIO_setPinConfig(GPIO_4_EPWM3A);
GPIO_setPadConfig(5, GPIO_PIN_TYPE_STD);
GPIO_setPinConfig(GPIO_5_EPWM3B);
GPIO_setPadConfig(6, GPIO_PIN_TYPE_STD);
```



```
GPIO_setPinConfig(GPIO_6_EPWM4A);
GPIO_setPadConfig(7, GPIO_PIN_TYPE_STD);
GPIO_setPinConfig(GPIO_7_EPWM4B);
```

Таблица 1 – Рекомендуемая частота ШИМ для управления электрическими двигателями

Тип электродвигателя	Рекомендуемая частота ШИМ	Особенности применения
Коллекторные двигатели постоянного тока малой мощности	1-5 кГц	Низкая индуктивность обмоток требует невысокой частоты
Коллекторные двигатели постоянного тока средней и большой мощности	5-20 кГц	Компромисс между потерями в силовой части и акустическим шумом
Бесколлекторные двигатели постоянного тока	10-50 кГц	Высокая частота обеспечивает плавность хода и минимум пульсаций
Тип электродвигателя	Рекомендуемая частота ШИМ	Особенности применения
Асинхронные двигатели малой мощности	1-10 кГц	Оптимальное соотношение между потерями на переключение и эффективностью
Асинхронные двигатели большой мощности	1-5 кГц	Ограничение потерь на переключение в силовых ключах

Для настройки работы частоты ШИМ надо знать частоту тактового генератора процессора SYSCLK. Она составляет 200 МГц. Частота ШИМ для управления БДПТ выбрана 20 кГц. Время периода ШИМ рассчитывается по формуле t записывается в регистр EPWM_TIMER_TBPRD.

$EPWM\_TIMER\_TBPRD = 100 \text{ Mhz} / (2 * \text{SwitchingFreq})$.

$\text{SwitchingFreq} = 20 \text{ кГц}$.

Например, $100 \text{ Mhz} / (2 * 20\text{k}) = 2500$.

Данное значение должно быть записано в регистр, задающий время периода ШИМ EPWM_TIMER_TBPRD.

$EPWM\_TIMER\_TBPRD = 2500$.

Порт А и порт В модуля ePWM работают зависимо. Когда выход порта А имеет высокий уровень напряжения, выход порта В имеет низкий уровень напряжения, т.е. порты работают в противофазе.

Так как силовые MOSFET транзисторы переключаются не мгновенно и для того, чтобы не было короткого замыкания используется модуль Dead-Band Submodule (DB). С помощью данного модуля можно настроить зоны нечувствительности для каналов ШИМа. Таким образом, может быть сконфигурировано мертвое время.

Чтобы выставить «мёртвое время», необходимо установить регистр в нужное состояние, например:

```
EPwm1Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE;
```

Для задания мёртвого времени добавлен фрагмент текста программы:

```
EPwm1Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE;  
EPwm1Regs.DBCTL.all = BP_ENABLE + POLSEL_ACTIVE_HI_CMP;  
// Настройка db  
EPwm1Regs.DBFED = 300; // Мертвое время = 150МГц * 2мкс = 300  
EPwm1Regs.DBRED = 300;
```

Осциллограмма ШИМ сигналов для одной фазы БДПТ с мёртвым временем приведена на рисунке 2.

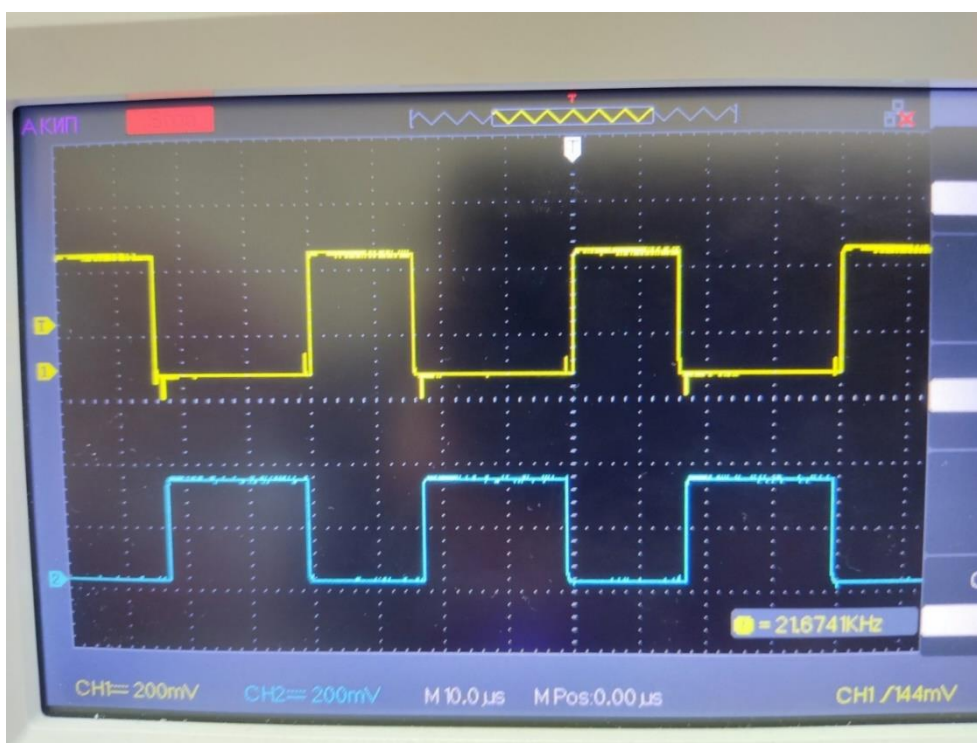


Рисунок 2 – Осциллограмма ШИМ сигналов для одной фазы БДПТ с «мёртвым временем»

Оригинальным решением в программе для управления моментом БДПТ является применение переменного коэффициента момента КМ, принимающим значение от 0 до 1, на который умножается синусоидальный сигнал, для ограничения момента и силы тока за счет коэффициента заполнения.

Если $KM=0$, то при синусоидальном сигнале управления коэффициент заполнения 50% (эффективное напряжение равно нулю, вращающий момент равен нулю).

Если $KM=1$, то при синусоидальном сигнале управления коэффициент заполнения 100% (эффективное напряжение равно напряжению питания, вращающий момент равен номинальному значению).

Если $KM=0.1$, то при синусоидальном сигнале управления коэффициент заполнения 45% (эффективное напряжение равно 10% от напряжения питания, вращающий момент равен 10% от номинального значения).

Таким образом, не будет перегрузки блока питания по току при работе с небольшим моментом сопротивления или в режиме холостого хода.

```
float KM=0.1           // коэффициент момента

for (j=0;j<4;j++) // число пар полюсов 4
{
    for (i=0;i<360;i++)
    {
        // формирование синусоиды и заполнение ШИМ сигнала
        EPWM1_CMP = EPWM1_TIMER_TBPRD*((KM*sinf(i*PI/180.0f)+1.0f)/2.0f);
        EPWM_setCounterCompareValue(EPWM1_BASE, EPWM_COUNTER_COMPARE_A, EPWM1_CMP);
        EPWM2_CMP = EPWM2_TIMER_TBPRD*((KM*sinf(i*PI/180.0f+(2*PI/3))+1.0f)/2.0f);
        EPWM_setCounterCompareValue(EPWM2_BASE, EPWM_COUNTER_COMPARE_A, EPWM2_CMP);
        EPWM3_CMP = EPWM3_TIMER_TBPRD*((KM*sinf(i*PI/180.0f+(4*PI/3))+1.0f)/2.0f);
        EPWM_setCounterCompareValue(EPWM3_BASE, EPWM_COUNTER_COMPARE_A, EPWM3_CMP);
        DEVICE_DELAY_US(694); // задержка 694 мкс (для 1 оборота ротора БДПТ за 1 с.)
    } // конец цикла for (i=0;i<360;i++)
} // конец цикла for (j=0;j<4;j++)
```

Выводы

Реализованная система управления бесколлекторным двигателем постоянного тока обеспечивает широкий диапазон регулирования скорости вращения двигателя – от низких оборотов до скорости вращения выше номинальной.

Раздельное управление контурами регулирования тока и скорости вращения ротора позволяют снизить объем вычислений процессора, не оказывая существенное влияние на качество управления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00792, <https://rscf.ru/project/25-29-00792/>.

Список использованной литературы

1. Андреев, А. Д. Электронная система управления бесколлекторного двигателя постоянного тока / А. Д. Андреев // Инновационные технологии управления и права. – 2020. – № 3(29). – С. 42-46.
2. Смирнов, В. А. Влияние способа управления коммутацией бесколлекторных двигателей постоянного тока на их характеристики / В. А. Смирнов, А. Э. Соловьев // Известия Тульского государственного университета.

Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 375-380. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-2-375-376.

3. Патрик, М. Управление бесколлекторными двигателями постоянного тока / М. Патрик // Силовая электроника. – 2023. – № 5(103). – С. 32-36.

4. Андреев, В. П. Субмодуль управления бесколлекторным двигателем постоянного тока для гетерогенного мобильного робота / В. П. Андреев, В. Л. Ким, Ю. Е. Лушекин // Экстремальная робототехника. – 2021. – № 1(32). – С. 143-156.

5. Андреев, А. Д. Система управления электроприводом на основе бесколлекторного двигателя постоянного тока / А. Д. Андреев // Инновационные технологии управления и права. – 2021. – № 1(30). – С. 36-42.

6. Nikitin, Y. BLDC motor identification based on optimal control model in the state space / Y. Nikitin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Sep. 4 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTME 2020, Sevastopol, 07–11 сентября 2020 года. Vol. 971. – BRISTOL, ENGLAND: IOP Publishing Ltd, 2020. – P. 042063. – DOI 10.1088/1757-899X/971/4/042063.

7. Осипов, П. А. Стенд для испытаний электропривода с асинхронным двигателем и бесколлекторным двигателем постоянного тока с постоянными магнитами / П. А. Осипов, С. Е. Морковкин // Уральская горная школа - регионам : материалы научно-практической конференции, Екатеринбург, 10 апреля 2023 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. – С. 256-258.

8. Schagin, A.V. Development of Speed Control System for BLDC Motor with Power Factor Correction / A.V. Schagin, D.T. Nguyen // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia. – 2020. – P. 2411-2414. – DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9038981.

9. Гридин, В. М. Бесконтактные двигатели постоянного тока с дискретным управлением и модуляцией тока по положению ротора / В. М. Гридин // Электричество. – 2021. – № 3. – С. 60-64. – DOI 10.24160/0013-5380-2021-3-60-64.

10. Зайцев, И. А. Математическое моделирование векторного управления бесколлекторным двигателем постоянного тока / И. А. Зайцев // Аллея науки. – 2023. – Т. 1. – № 3(78). – С. 137-145.

11. Трефилов, С. А. Модель бесколлекторного двигателя постоянного тока в пространстве состояний при векторном управлении / С. А. Трефилов, Ю. Р. Никитин, П. В. Лекомцев // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. – 2020. – № 3(11). – С. 28-38.

12. Воробьева, А. П. Создание математической модели бесколлекторного двигателя постоянного тока с использованием Matlab Simulink / А. П. Воробьева, И. А. Антропова // Политехнический молодежный журнал. – 2024. – № 6(95).

13. Вельченко, А. А. Математическая модель бесколлекторного двигателя постоянного тока на основе уравнения напряжения трёхфазной обмотки / А. А. Вельченко, С. А. Павлюковец, А. А. Радкевич // Системный анализ и прикладная информатика. – 2024. – № 1. – С. 19-25. – DOI 10.21122/2309-4923-2024-1-19-25.

14. Mouliswararao, R. Mathematical Modeling of Brushless DC Motor and its Speed Control using Pi Controller / R. Mouliswararao, K. Bhaskararao, Ch. Prasad. // International journal of engineering research and technology (IJERT). Vol. 08, Issue 05 (May 2019). – 2019. – P. 880-883. DOI: 10.17577/IJERTV8IS05044.

15. Электропривод с бесколлекторным двигателем постоянного тока практика применения моделирования и кодогенерации в АО «Аэроэлектромаш» / Ю. Н. Калачев, Ф. И. Баум, В. Ю. Ланцев, Е. В. Окулов // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2020. – № 2(127). – С. 34-39.

16. Моденов, М. Ю. Разработка структурной схемы замкнутой системы управления для работы с бесколлекторными инновационными двигателями / М. Ю. Моденов, А. Н. Чуканов, К. Б. Кун // Энергия знаний : сборника научных статей Международного научно-образовательный конгресса молодежи, Курск, 26 ноября 2024 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга». – 2024. – С. 142-146.

17. Энергоэффективное нейросетевое управление бесколлекторным двигателем постоянного тока / А. А. Вельченко, С. А. Павлюковец, А. А. Радкевич, А. К. Ибрагим // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2025. – Т. 68, № 1. – С. 45-57. – DOI 10.21122/1029-7448-2025-68-1-45-57.

18. Романов, Д. Д. Бездатчиковое управление бесколлекторным двигателем постоянного тока / Д. Д. Романов // Информационные технологии, энергетика и экономика : труды XX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Смоленск, 26–27 апреля 2023 года. – Смоленск: Универсум. – 2023. – С. 311-313.

19. Ибрагимов, Р. Р. Определение минимальных необходимых параметров датчиков тока и напряжения для реализации векторного бездатчикового управления асинхронным двигателем / Р. Р. Ибрагимов, М. С. Волонин, Д. С. Рославцова // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Тезисы докладов Тридцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 29 февраля – 02 марта 2024 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг «РАДУГА». – 2024. – С. 129.

20. Солодкий, Е. М. Бездатчиковое управление синхронным двигателем с постоянными магнитами на основе прямой компенсации в контуре тока / Е. М. Солодкий, Д. О. Савенко // Электротехника. – 2024. – № 11. – С. 2-5. – DOI 10.53891/00135860-2024-11-2-5.

21. Тран, В. Т. Адаптивное скользящее управление бесколлекторным двигателем / В. Т. Тран, А. М. Корилов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2024. – Т. 27, № 1. – С. 72-78. – DOI 10.21293/1818-0442-2024-27-1-72-78.

22. Адаптация наблюдателя скользящего режима к изменяющимся условиям эксплуатации синхронного двигателя с постоянными магнитами / В. С. Никулин, С. А. Сторожев, Ю. Н. Хижняков, А. А. Южаков // Электротехника. – 2024. – № 11. – С. 6-12. – DOI 10.53891/00135860-2024-11-6-12.

23. Лебедев, А. В. Синтез системы со скользящим режимом для децентрализованного управления движением беспилотного летательного аппарата

/ А. В. Лебедев // Робототехника и искусственный интеллект : материалы XII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Железногорск, 28 ноября 2020 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Сибирский федеральный университет, Межинститутская базовая кафедра «Прикладная физика и космические технологии». – Железногорск: Литера-Принт, 2020. – С. 191-196.

24. Шекари, М. Надежный контроллер со скользящим режимом для управления двухосным трекером, предназначенным для точного отслеживания положения Солнца / М. Шекари, А. Ханджанзаде // Прикладная механика и техническая физика. – 2023. – Т. 64, № 1(377). – С. 194-206. – DOI 10.15372/PMTF202215057.

PROGRAM OF VECTOR CONTROL OF BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR BY TMS320F28379D PROCESSOR

**Rassokhin Sergey Alexandrovich,
master's degree program, 2nd course**

Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikov

Abstract. *The work was performed at the Department of Mechatronic Systems of Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov under the supervision of Nikitin Yuri Rafailovich and Trefilov Sergey Alexandrovich, Candidates of Technical Sciences, associate professors, associate professors of the Department of Mechatronic Modules and Dmitry Andreevich Ponomarev, a research engineer. A vector control program for a brushless DC motor (BDPT) based on the TMS320F28379D processor has been developed. The program sets a dead time to ensure a delay in the turn-on time of the power MOSFET transistors. MOSFET transistors are located on the driver board. PWM signals generated for each phase are used to control the torque. To control the angular position of the rotor, a voltage vector is used, consisting of three voltage components applied to each phase of the BDPT.*

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 25-29-00792, <https://rscf.ru/project/25-29-00792/>.

Keywords: vector control, brushless direct current (BLDC) motor, TMS320F28379D processor.

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ВЫБОРА КОМПЛЕКТА «САМОСВАЛ-ЭКСКАВАТОР»

Габдрафикова Алина Арсеновна, Николаева Анна Владимировна, студенты бакалавриата, 2 курс

Гаврилов Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры материалов, конструкций и машин

Оренбургский государственный университет

Аннотация. Экскаваторы и самосвалы выполняют важную роль на каждой строительной площадке, в расчете выбора которых недопустимо совершить ошибку. Однако данные расчеты являются объемными и очень сложными, требующими не одного дня работы. Для этого разработан алгоритм формирования комплекта машин в программе Microsoft Excel, который будет значительно экономить время и сократит время работы.

Ключевые слова: экскаваторы, самосвалы, ковши, комплект, программа, объект, кузов, таблица.

Код и рубрика: 73.01.00 Общие вопросы транспорта

Экскаваторы и самосвалы играют важную роль в строительстве, так как они выполняют различные работы, которые требуют качества и скорости выполнения своих функций на площадке.

Экскаваторы (рисунок 1) выполняют земляные работы, помогают в подготовке площадки, а также занимаются планировкой участков. Экскаваторы с разными насадками (рисунок 2) и ковшами позволяют работать с трудными участками, что необходимо при возведении сложных объектов, например, тоннелей, мостов или больших зданий.



Рисунок 1 – Экскаватор



Рисунок 2 – Экскаватор с навесным оборудованием

Самосвалы (рисунок 3) необходимы на строительной площадке, так как здесь требуется перемещение материалов с быстрой выгрузкой.

Также самосвалы осуществляют важную задачу – они вывозят с площадки сыпучий мусор и доставляют его к местам утилизации.

Использование экскаваторов и самосвалов позволяет минимизировать объём ручной работы, повысить производительность труда, уменьшить стоимость работ и сократить сроки строительства.

Для наилучшего результата строительных работ важно правильно подобрать комплект «самосвал-экскаватор». Это позволит сделать работу бесперебойной, повысит эффективность, снизит риск издержек.

Процесс погрузки самосвала экскаватором происходит так: ковш экскаватора захватывает и поднимает материал, а затем высыпает его в кузов самосвала (рисунок 4). Но даже такая простая работа требует правильный подбор машин, который осуществляется с помощью сложные вычисления.



Рисунок 3 – Самосвал

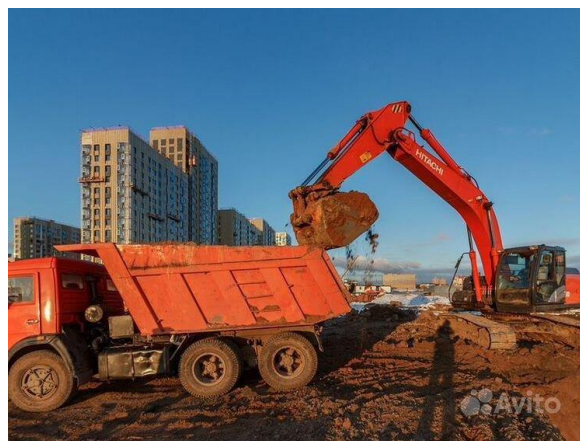


Рисунок 4 – Процесс погрузки грунта экскаватором в самосвал

Выбор комплекта «самосвал – экскаватор» зависит от условий работы на строительной площадке.

Некоторые факторы, которые следует учитывать при выборе комплекта:

- объём работ на объекте;
- дальность перебазирования экскаваторов и автомобилей-самосвалов на объект;
- тип разрабатываемого грунта;
- расстояние транспортирования грунта;
- удельная себестоимость работы машин на объекте.

Учет такого количества факторов усложняет выбор, и для его облегчения расчет был автоматизирован в программе Microsoft Excel.

Принцип работы программы в том, чтобы пользователь мог внести необходимый минимум данных и программа автоматически подобрала для него комплект.

Блок ввода информации, которую нужно учитывать при подборе машин показан на рисунке 5. При этом вносятся следующие данные: объём работ на

объекте, дальность перебазирования экскаваторов и автомобилей-самосвалов на объект, тип грунта, группа грунта, рабочее оборудование, расстояние транспортирования грунта, тип дорожного покрытия. Расчетный блок показан на рисунке 6.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following structure:

- Top Section:** A table with columns for excavator models (e.g., EX-1000, EX-1200) and their specifications.
- Middle Section:** A table with columns for truck models (e.g., КА-100, КА-150) and their specifications.
- Bottom Section:** A summary table with columns for 'Строительный объект' (Construction object), 'Путь транспортирования грунта' (Soil transport path), and various calculation parameters like 'Объем работ' (Volume of work), 'Дальность перебазирования' (Relocation distance), 'Тип грунта' (Soil type), etc.

Рисунок 5 – Таблица для работы с вычислениями машин

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following structure:

- Top Section:** A table with columns for soil types (e.g., Суглинок, Песок) and their specifications.
- Middle Section:** A table with columns for soil groups (e.g., 1 группа, 2 группа) and their specifications.
- Bottom Section:** A summary table with columns for 'Строительный объект' (Construction object), 'Путь транспортирования грунта' (Soil transport path), and various calculation parameters like 'Объем работ' (Volume of work), 'Дальность перебазирования' (Relocation distance), 'Тип грунта' (Soil type), etc.

Рисунок 6 – Программа выполняющая вычислительные работы

Ниже представлены примеры формул, которые были важны при разработке программы.

Число ковшей грунта n , загружаемого экскаватором в самосвал, можно определить по вместимости кузова самосвала:

$$n' = \frac{1,1 \cdot q_c}{q_3 \cdot K_H^3},$$

где q_c – это вместимость кузова;

$q_э$ – это вместимость основного ковша общего назначения;
 $K_H^э$ – это коэффициент разрыхления грунта.

Проверка числа ковшей по условию непревышения грузоподъемности самосвала выполняется по формуле:

$$n'' = \frac{Q_c \cdot K_{px}}{q_э \cdot K_H^э \cdot \varphi},$$

где Q_c – это грузоподъемность самосвала;
 φ – это объемная масса разрабатываемого грунта.

При помощи данных формул происходит расчет коэффициента использования вместимости K_q и грузоподъемности K_Q .

$$k_q = \frac{q_э \cdot K_H^э \cdot n}{q_c},$$

$$k_Q = \frac{q_э \cdot K_H^э \cdot n \cdot \varphi}{Q_c \cdot K_{px}}.$$

При $m_{факт} < m_{расч}$ происходит нехватка самосвалов, от чего возникает простой экскаваторов, поэтому производительность $\Pi_{э,ч}^K (M^3/ч)$ следует находить по продолжительности цикла самосвалов:

$$\Pi_{э,ч}^K = \frac{3600 \cdot q_c \cdot K_q \cdot m_{факт} \cdot K_{пр.вероят}}{T_{ц}^c \cdot K_{px}} \cdot K_B.$$

При $m_{факт} > m_{расч}$ возникает избыток самосвалов, что приводит к простоям техники и снижению общей эффективности производственного процесса, поэтому производительность $\Pi_{э,ч}^K$ устанавливается по продолжительности загрузки самосвала экскаватором.

$$\Pi_{э,ч}^K = \frac{3600 \cdot q_э \cdot K_H^э \cdot K_{пр.вероят}}{t_{п} \cdot K_{px}} \cdot K_B.$$

На рисунке 7 показан пример реализации заданной формулы для вычисления скорости движения транспорта в табличном редакторе Microsoft Excel.

H21		=ЕСЛИ(G21=A16;ЕСЛИ(F21<=500;B16;ЕСЛИ(F21<=2000;C16;D16));ЕСЛИ(G21=A15;ЕСЛИ(F21<=500;B15;ЕСЛИ(F21<=2000;C15;D15));ЕСЛИ(G21=A14;ЕСЛИ(F21<=500;B14;ЕСЛИ(F21<=2000;C14;D14));ЕСЛИ(G21=A13;ЕСЛИ(F21<=500;B13;ЕСЛИ(F21<=2000;C13;D13))))))																					
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
Объем работ на объекте, Vol (м3)	Дальность перебазирования экскаваторов и автомобилей-самосвалов на объект, B, км	Тип грунта	Группа грунта	Рабочее оборудование	Расстояние транспортировки авт. грунта, L, м	Тип покрытия	Скорость движения транспорта(км/ч)	Объемная масса разрабатываемого грунта	Коэффициент разрыхления грунта	Коэффициент заполнения ковша экскаватора	Выбор пары Экскаватор - Автомобиль-Самосвал	Экскаватор	Автомобиль-Самосвал										
500	25	Суглинок	2 группа	Обратная лопата	1200	Грунтовая дорога	20	1,75	1,35	1,25	28	КВ 160W	КамАЗ-6520										

Рисунок 7 – Пример формулы, реализуемой в редакторе Microsoft Excel

В текущем состоянии выполнения этой работы удалось достигнуть формирования нескольких оптимальных комплектов с возможностью выбора пользователем окончательного варианта.

В дальнейшем планируется перейти на более специализированные инструменты (Excel с VBA, Python, веб-приложения) для более сложной разработки, а также учесть экономические затраты и экономическую эффективность выбранного комплекта. Последующее развитие и совершенствование алгоритма выбора комплекта «самосвал-экскаватор» позволит повысить эффективность строительных процессов, снизить издержки и улучшить качество выполнения работ, что делает эту тему актуальной и перспективной для научных исследований и практического применения.

Список использованной литературы

1. Дворковой, В. Я. Методические указания к лабораторной работе «Формирование, сопоставление и выбор комплектов “экскаватор – автомобили-самосвалы”». – М.: МАДИ, 2015. – 20 с.

2. Дроздова, Л. Г. Одноковшовые экскаваторы: конструкция, монтаж и ремонт: учеб. пособие /Л. Г. Дроздова, О. А. Курбатова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ. – 2007. – 235 с. – ISBN 978-5-7596-0729-8. – Режим доступа: [https://dl.libcats.org/genesis/373000/feaa73feb3c7b44c6b5c5ba82fa84ae6/_as/\[Drozдова L.G.\] Odnokovshovuee_yekskavatorue kons\(libcats.org\).pdf](https://dl.libcats.org/genesis/373000/feaa73feb3c7b44c6b5c5ba82fa84ae6/_as/[Drozдова L.G.] Odnokovshovuee_yekskavatorue kons(libcats.org).pdf) (дата обращения 03.06.2025).

3. Спешилова, В. С. Строительные машины и средства малой механизации: методическое пособие / В. С. Спешилова, Т. С. Соловьева. – Москва: Издательство АСВ. – 2015. – 120 с.: – ISBN 978-5-4323-0124-5. – Режим доступа: https://blpkuu.ru/sites/default/files/docs/kurs_lekciy_02.01.01_stroitelnye_mashiny.pdf (дата обращения 03.06.2025).

4. СП 45.13330.2017. Свод правил. Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87 / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) – Введ. 2018-06-17. – 180 с. – Режим доступа: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14715/> (дата обращения 03.06.2025).

CHOOSING A DUMP TRUCK-EXCAVATOR PACKAGE

**Gabdrifikova Alina Arsenovna, Nikolaeva Anna Vladimirovna, 2nd year students
Gavrilov Alexander Alexandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the Department of Construction Production Technology**

Orenburg State University

Abstract. *Excavators and dump trucks play an important role at every construction site, and it is unacceptable to make a mistake in calculating which ones to choose. However, these calculations are voluminous and very complex, requiring more than one day of work. To do this, we decided to create a calculation of the necessary types of machines in the Microsoft Excel program, which will significantly save time and reduce operating time.*

Keywords: *excavators, dump trucks, bucket, kit, program, object, truck body, table.*

МЕХАНИЗМ ПОДЪЁМА МОСТОВОГО КРАНА, ГРУЗОПОДЪЁМНОСТЬЮ 200 ТОНН

**Строев Иван Андреевич, Прядкин Максим Алексеевич, студенты
бакалавриата 2 курса**

**Решетов Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры механики материалов, конструкций и машин**

Оренбургский государственный университет

Аннотация: В работе рассмотрены вопросы разработки механизма подъема мостового крана, который используется для перемещения особо тяжёлых грузов до 200 тонн на небольшие расстояния, что делает их незаменимыми в таких отраслях, как машиностроение, металлургия, строительство, а также в складском хозяйстве.

Ключевые слова: механизм подъема, кран мостовой, дифференциальный механизм, модель, кинематическая схема.

Код и рубрика: 55.51.31 Машиностроение. Подъемно-транспортное машиностроение. Краны и крановое оборудование.

Мостовой кран представляет собой подъёмное устройство, оснащённое металлоконструкцией ферменного или балочного типа в виде опорного либо подвесного моста. Данный мост перемещается по подкрановым рельсовым путям вдоль пролёта производственного цеха или открытой грузовой площадки. По мосту в поперечном направлении относительно пролёта осуществляется движение крановой тележки, которая оборудована грузозахватным механизмом [11].

С каждым годом наблюдается тенденция к повышению требований к производительности и эффективности в различных отраслях промышленности. В этом контексте мостовые краны выступают в качестве ключевого технологического инструмента, позволяющего оптимизировать производственные процессы и обеспечить соблюдение стандартов безопасности.

Использование мостовых кранов способствует значительному сокращению временных затрат на перемещение грузов, что, в свою очередь, повышает общую производительность труда. Кроме того, применение данной техники минимизирует риск травматизма, связанного с ручным перемещением тяжёлых объектов, тем самым обеспечивая безопасность рабочих и снижая уровень профессиональных заболеваний.

Мостовые краны также играют важную роль в оптимизации логистических цепочек, обеспечивая эффективное управление потоками материалов и сырья. Их конструктивные особенности и технические характеристики позволяют адаптировать оборудование к различным условиям эксплуатации, что делает их универсальным решением для широкого спектра производственных задач [11, 12].

В этом контексте, была поставлена задача сконструировать механизм подъема мостового крана. Кинематическая схема механизма подъема изображена на рисунке 1. Которая будет состоять из редуктора (рисунок 2) и дифференциала

(рисунок 3) [1]. Несмотря на свою сложность, данная конструкция привода механизма подъёма позволяет реализовать максимально возможное число необходимых рабочих режимов.

При проектировании редуктора и дифференциала и их 3D-моделировании использовалась программа КОМПАС-3D, а для расчета отдельных элементов – программа ANSYS.

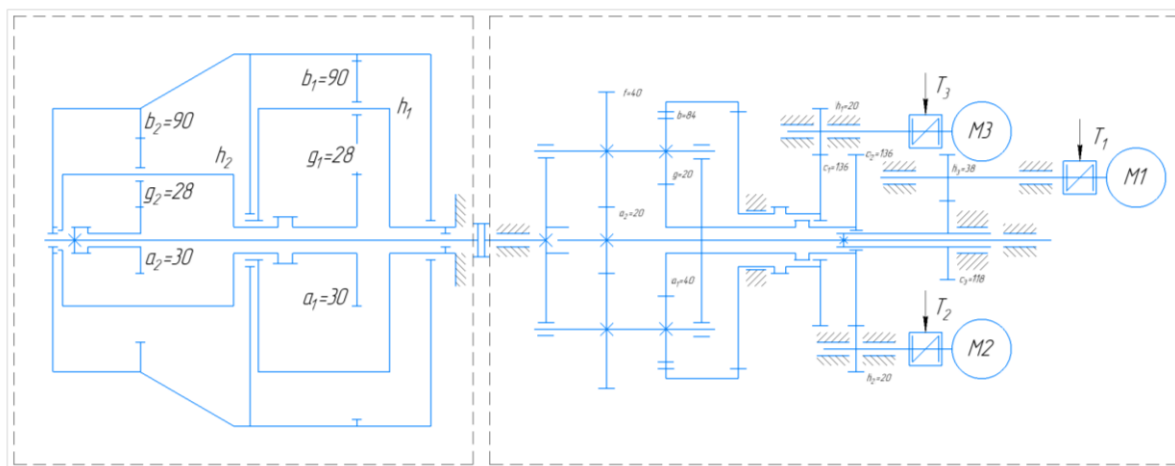


Рисунок 1 – Кинематическая схема механизма подъема мостового крана

Кинематическая схема передаточного механизма состоит из трех приводных асинхронных электродвигателей, которые через втулочно-пальцевые муфты, управляемые тормозами T_1 , T_2 и T_3 , соединяются с валами дифференциала. Применение трёх приводных электродвигателей позволяет обеспечить механизм подъема мостового крана 8 ступенями скоростей. Эти ступени скоростей обеспечиваются благодаря дифференциальному планетарному механизму.

Дифференциал представлен блоками планетарных и косозубых цилиндрических передач.

Планетарная передача представлена двухрядным планетарным механизмом типа 2К-Н по классификации В.Н. Кудрявцева [1] и имеет четыре сателлита. Передача модернизирована введением дополнительного зубчатого колеса a_1 , $z=40$, за счет чего можно получить необходимое число скоростей работы механизма (рисунок 4 и таблица 1) [2, 3, 4].

Далее по кинематической цепи находится двухступенчатый планетарный редуктор, при помощи которого производится основная редукция частот вращения электродвигателей. Каждая его ступень представлена планетарным механизмом типа 2К-Н и имеет по три сателлита. Особенностью редуктора является то, что его выходным валом является сам корпус, на который через фланец устанавливается приводной барабан. В целях уменьшения диаметрального габарита передач в конструкции солнечных колёс и сателлитов была использованная легированная сталь 12ХН3А с поверхностной цементацией зубьев. Также в зацеплении предусмотрена угловая коррекция зубьев.

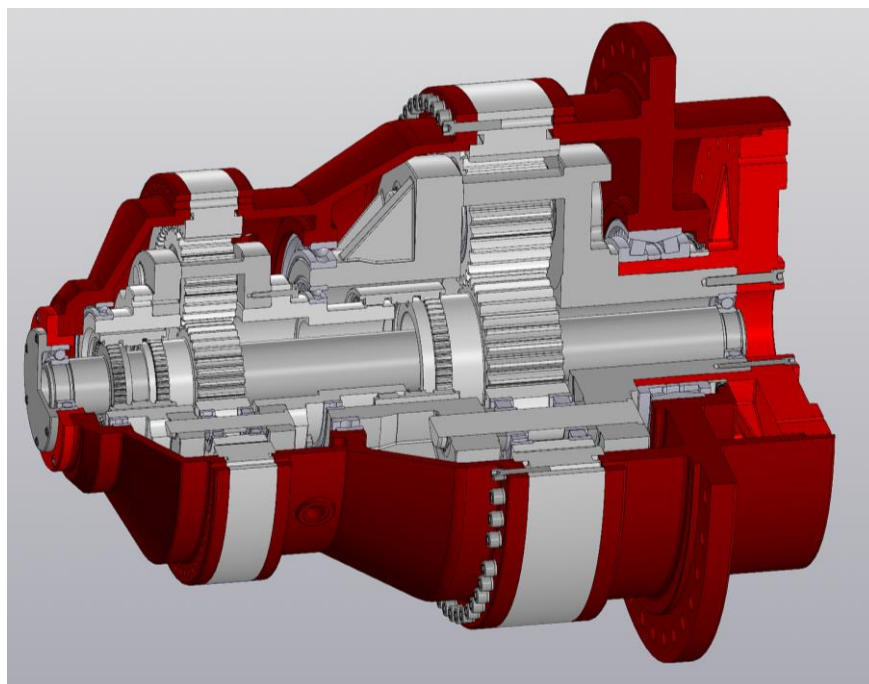


Рисунок 2 – Редуктор в разрезе

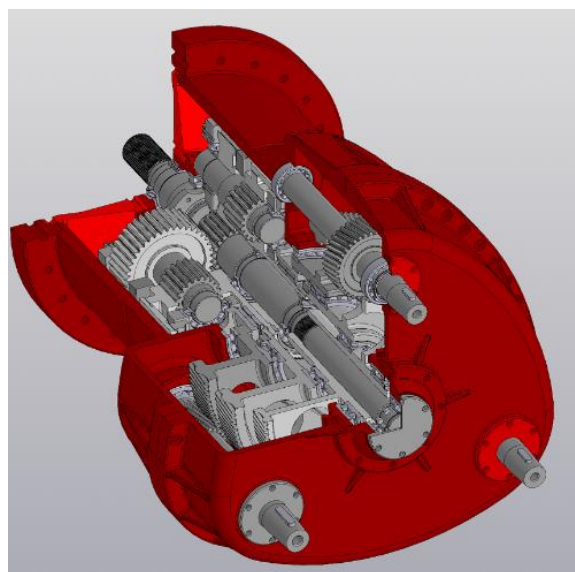
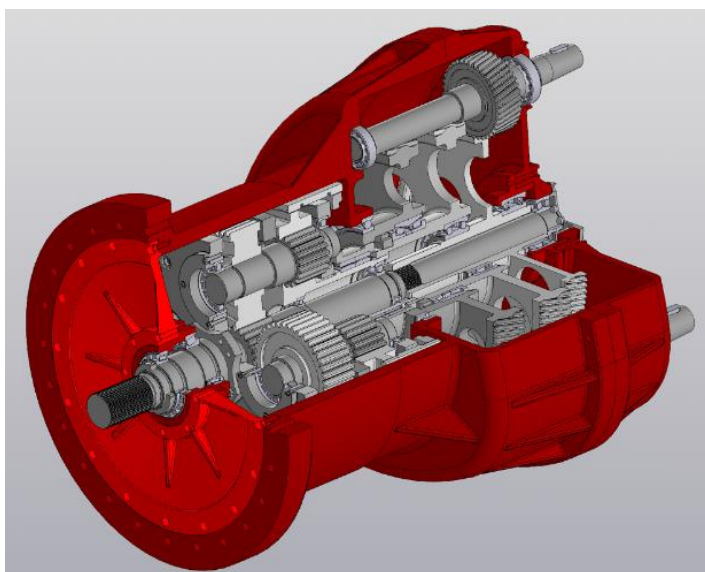


Рисунок 3 – Дифференциал в разрезе

В целях наиболее равномерного распределения напряжения по длине зубьев были применены плавающие элементы. В редукторе используются зубчатые муфты, обеспечивающие осевую и радиальную подвижности солнечных колёс. В дифференциале – эпицикл, также установленный на зубчатой муфте, опоры на сферических подшипниках, обеспечивающих статически определимые системы валов. Валы центральных колес являются статически определимыми, с одной стороны имеют сферическую опору, с другой опору, установленную на упругий элемент, что позволяет осуществлять перемещение и самоцентрировку валов при передаче полезного крутящего момента.

характерно для планетарных и дифференциальных механизмов [1]) отдельных элементов привода. С целью уменьшения длины барабана был использован 6-ти кратный полиспаг, что нетипично для кранов высокой грузоподъемности. Это увеличивает крутящий момент на барабане и требует применение редуктора с большим передаточным числом. Это и является одной из причин использования планетарных передач, так как они позволяют передавать большую мощность и имеют при меньших габаритах большее передаточное число, чем обычные цилиндрические передачи [6, 8, 9].

Также под разработанную конструкцию барабана была предложена, рассчитана, сконструирована и испытана в программе ANSYS специальная крюковая подвеска со стандартным крюком (рисунки 5 и 6) [2, 5, 7, 10].

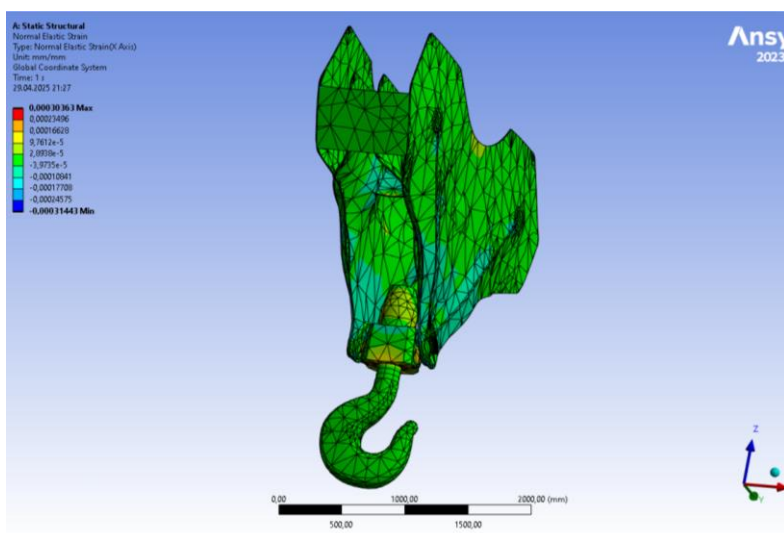
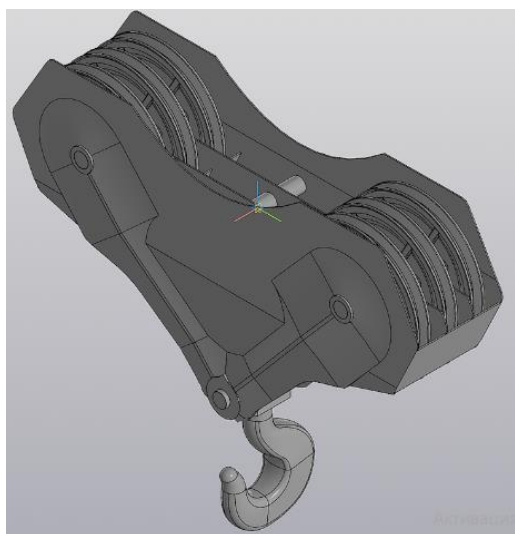


Рисунок 5 – Крюковая подвеска в изометрии

Рисунок 6 – Результаты испытания крюковой подвески в ANSYS

Анализ результатов компьютерного эксперимента в программе ANSYS показал достаточную прочность и жесткость наиболее слабых элементов сконструированной крюковой подвески.

В результате выполненной работы была предложена оригинальная кинематическая схема многоскоростного привода подъёмного механизма на базе планетарного и дифференциального механизмов.

Разработана конструкция основных передаточных механизмов привода подъёма и опускания грузов при помощи программы КОМПАС-3D.

Разработана специальная конструкция крановой крюковой подвески со стандартным крюком ГОСТ 34680-2020. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния крановой подвески показало ее достаточную прочность и жесткость.

Список использованной литературы

1. Планетарные передачи [Текст] : справочник / под ред. В. Н. Кудрявцева, Ю. Н. Кирдяшева. – Л. : Машиностроение, 1977. – 536 с. : ил. – Библиогр.: с. 522-525. – Предм. указ.: с. 526-532.
2. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ф. К. Иванченко [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : Вища шк.. – 1978. – 576 с. : ил.
3. Малиновский, А. Н. Методические указания к расчетам и анализу современных редукторов по курсу «Детали машин» / А. Н. Малиновский. – М.: МАДИ. – 1981. – 35 с.
4. Рязанцева, И. Л. Прикладная механика. Схемный анализ и синтез механизмов и машин : учеб. пособие / И. Л. Рязанцева ; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ. – 2017. – 184 с. : ил. – ISBN 978-5-8149-2556-5.
5. Балдин, В. А. Детали машин и основы конструирования. Передачи : учебник для бакалавриата и специалитета: для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям / В. А. Балдин, В. В. Галевко; под редакцией В. В. Галевко. – 2-е изд., переработанное и дополненное. – Москва : Юрайт. – 2018. – 332 с.: ил., табл., схемы. – (Бакалавр и специалист). – ISBN 978-553-40-6285-4.
6. Руденко В. Н. Планетарные и волновые передачи [Текст] : альбом конструкций. – М.: Машиностроение. – 1980. – 148 с.
7. Конструкция и расчет подъемно-транспортных машин [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ф. К. Иванченко. – Киев : Вища шк.. – 1983. – 351 с.
8. Подъемно-транспортные машины [Текст] : учеб. пособие для машиностроит. спец. вузов / М. П. Александров – 6-е изд., переработанное и дополненное. – М.: Высш. шк.. – 1985. – 520 с.
9. Грузоподъемные и транспортирующие машины [Текст] : учеб. пособие для техникумов / А. А. Богорад. – М.: Металлургия. – 1989. – 416 с.
10. Каменев, С. В. основы метода конечных элементов в инженерных приложениях [Электронный ресурс] : учебное пособие для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств и 15.03.06 Мехатроника и робототехника / С. В. Каменев; Электрон. текстовые дан. (1 файл: 3.84 Мб). – Оренбург : ОГУ, 2019. – 110 с. – Загл. с тит. экрана. – Adobe Acrobat Reader 6.0. – Режим доступа: http://artlib.osu.ru/web/books/metod_all/94203_20190515.pdf – ISBN 978-5-7410-2478-2. (дата обращения 20.05.2025).
11. Пояркова, Е. В. Анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкций балок мостовых кранов при их восстановлении / Е. В. Пояркова, В. С. Гарипов, А. М. Авдонин // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21. – № 3. – С. 1259-1262.
12. Пояркова, Е. В. Диагностирование металла сварных соединений грузоподъемного оборудования после длительной эксплуатации / Е. В. Пояркова, А. М. Авдонин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2015. – № 9. – С. 23-29.

LIFTING MECHANISM OF A BRIDGE CRANE WITH A LIFTING CAPACITY OF 200 TONS

Stroeв Ivan Andreevich, Pryadkin Maxim Alekseevich, 2nd year undergraduate students

Reshetov Sergey Yuryevich, Associate Professor of the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Orenburg State University

Abstract: *The paper considers the development of a lifting mechanism for a bridge crane, which is used to move particularly heavy loads up to 200 tons over short distances, which makes them indispensable in industries such as mechanical engineering, metallurgy, construction, and warehousing.*

Keywords: *lifting mechanism, overhead crane, differential mechanism, model, kinematic scheme.*

ПРОЧНОСТНЫЕ РАСЧЕТЫ НА ЭВМ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСМИССИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**Черноусов Егор Александрович, Кашапов Тимур Динарович,
Касимов Роман Андреевич, студенты бакалавриата, 4 курс**

Оренбургский государственный университет

Аннотация: Работа выполнена под руководством Решетова Сергея Юрьевича, кандидата технических наук, доцента кафедры механики материалов, конструкций и машин

Работа посвящена применению компьютерных систем инженерного анализа, проведен обзор программных комплексов, применяемых для прочностных расчетов в авиастроении и, в частности, для расчетов элементов трансмиссии перспективных летательных аппаратов. Выполнен прочностной расчет элементов конструкции корпуса главного редуктора беспилотного летательного аппарата вертолетного типа, получены практически применимые результаты.

Ключевые слова: прочность, трансмиссия, летательные аппараты, редукторы, алюминиевые сплавы.

Код и рубрика: 55.47.05 Прочность летательных аппаратов

Применение компьютерных систем инженерного анализа для выполнения прочностных расчетов элементов летательных аппаратов позволяет снизить количество проводимых натурных статических, динамических, усталостных испытаний. Интерес представляет применение расчетных комплексов для решения задач конечно-элементарного анализа конструкций летательных аппаратов [4].

Самыми распространенными программными комплексами на предприятиях авиационной промышленности в настоящее время являются такие комплексы, как: Ansys, Femar, ABAQUS и отечественные CAE Fidesys, ЛОГОС Прочность.

Так, для прочностных расчетов конструкции самолета МС-21-300 используется доработанный российскими специалистами из отдела Разработки алгоритмов и программ отделения Прочности КБ ИЦ «ПАО «Яковлев» комплекс Femar, который позволяет сократить цикл расчетов типовой конструкции элементов самолета до 36 часов. До 60 % всей конструкции самолета автоматизировано анализируется и после этого формируется автоматизированный отчет. В основе всего этого лежит глобальная модель самолета «GlobalFiniteElementModel – GFEM) [5]. Конечно-элементарная модель центрального отсека в составе глобальной модели представлена на рисунке 1.

Настоящая работа посвящена использованию программного комплекса Ansys в прочностных расчетах элементов трансмиссии перспективных летательных аппаратов. В ходе работ по формированию конструкции трансмиссии беспилотного летательного аппарата вертолетного типа, в которых непосредственное участие принимают авторы настоящей работы, был спроектирован один из важнейших агрегатов вертолетов – главный редуктор.

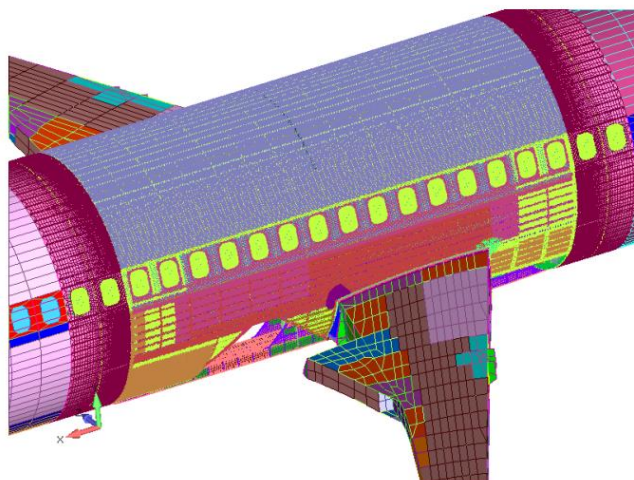


Рисунок 1 – Подробная конечно-элементарная модель, встроенная в глобальную модель [5]

Редуктор предназначен для понижения частоты вращения до требуемой для расчетного функционирования летательного аппарата, а также поворота передаваемого крутящего момента в зависимости от компоновки самого редуктора и летательного аппарата в целом [2, 3]. На рисунке 2 представлена трехмерная модель вновь созданного главного редуктора для беспилотного летательного аппарата вертолетного типа, построенного по соосной схеме расположения несущих винтов.



Рисунок 2 – Главный редуктор беспилотного летательного аппарата вертолетного типа соосной схемы

Основными элементами, воспринимающими силовые факторы в рассматриваемом редукторе, являются корпусные детали: крышка верхняя, корпус основной. На рисунке 3 представлено конструктивно-технологическое членение корпуса редуктора.

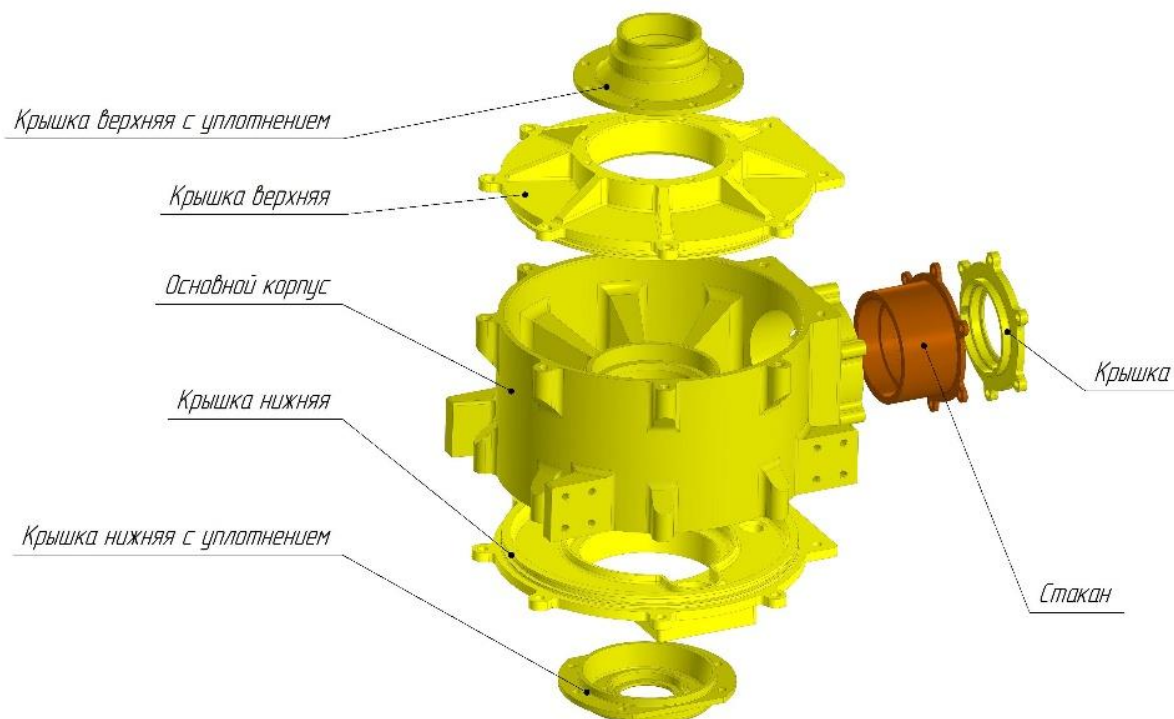


Рисунок 3 – Конструктивно-технологическое членение корпуса главного редуктора

Расчет проводится в статической постановке, в программном обеспечении ANSYS Static Structural.

Все детали кроме стакана, крышки верхней с уплотнением и крышки нижней с уплотнением изготовлены из материала АЛ9М ТУ 1-92-159-90, разработки ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» [1]. В таблице 1 представлены исходные данные к прочностным расчетам, полученные авторами во время эскизного проектирования беспилотного летательного аппарата вертолетного типа.

Таблица 1 – Исходные данные к прочностным расчетам

Параметр	Значение
Взлетная масса летательного аппарата $m_{взл}^2$, кг.	907,63
Максимальная расчетная перегрузка согласно n_{max} , не более	3,5
Коэффициент запаса прочности K_{min} , не менее	1,25
Предел прочности материала АЛ9М σ_B , МПа, не менее	170

Рассмотрим деталь «Крышка верхняя» и ее расчетную схему, представленную на рисунке 4.

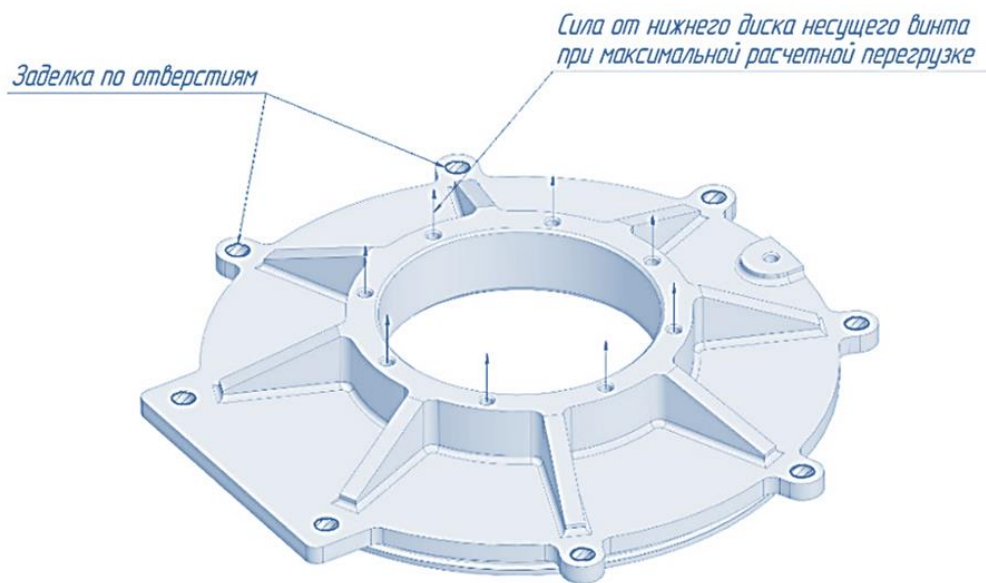


Рисунок 4 – Расчетная схема детали «Крышка верхняя»

Нагрузкой, действующей на деталь «Крышка верхняя» является половина силы веса беспилотного летательного аппарата при максимально допустимой перегрузке. Силу (F_k , Н), действующую на крышку, вычисляют по формуле:

$$F_k = \frac{m_{\text{взл}}^2 \cdot n_{\text{max}} \cdot g}{2}; \quad (1)$$

где $m_{\text{взл}}^2$ – взлетная масса беспилотного летательного аппарата, кг;

n_{max} – максимальная расчетная перегрузка;

g – ускорение свободного падения, м/с².

$$F_k = \frac{907,63 \cdot 3,5 \cdot 9,81}{2} = 15582 \text{ Н.}$$

На рисунке 5 представлена сетка к расчету прочности детали «Крышка верхняя».

Общее число элементов сетки – 56023. Такое количество элементов позволяет при сравнительно низких потерях в точности расчета максимально снизить время расчета.

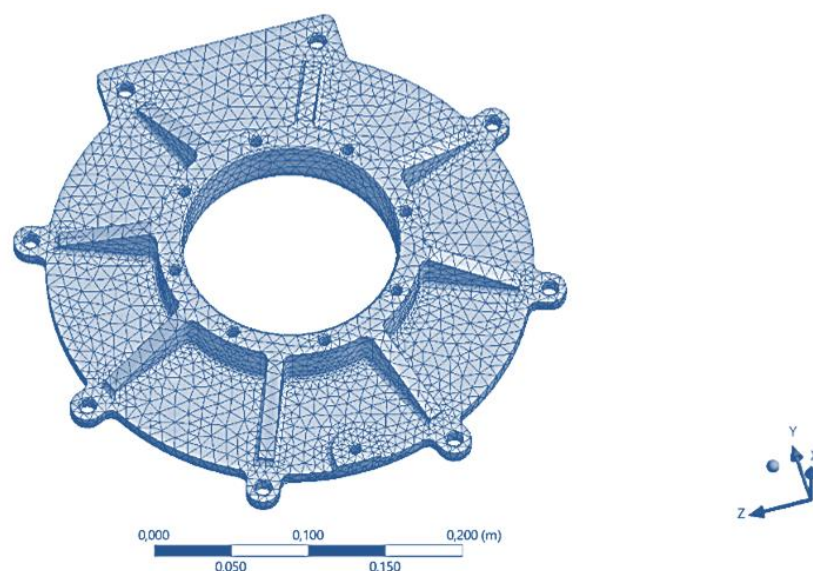


Рисунок 5 – Расчетная сетка детали «Крышка верхняя»

В результате расчетов получаем как картину распределения эквивалентных напряжений в детали «Крышка верхняя», так и максимальные значения этих напряжений. На рисунке 6 представлена картина распределения эквивалентных напряжений в детали «Крышка верхняя». На выносках указаны величины напряжений в критических точках.

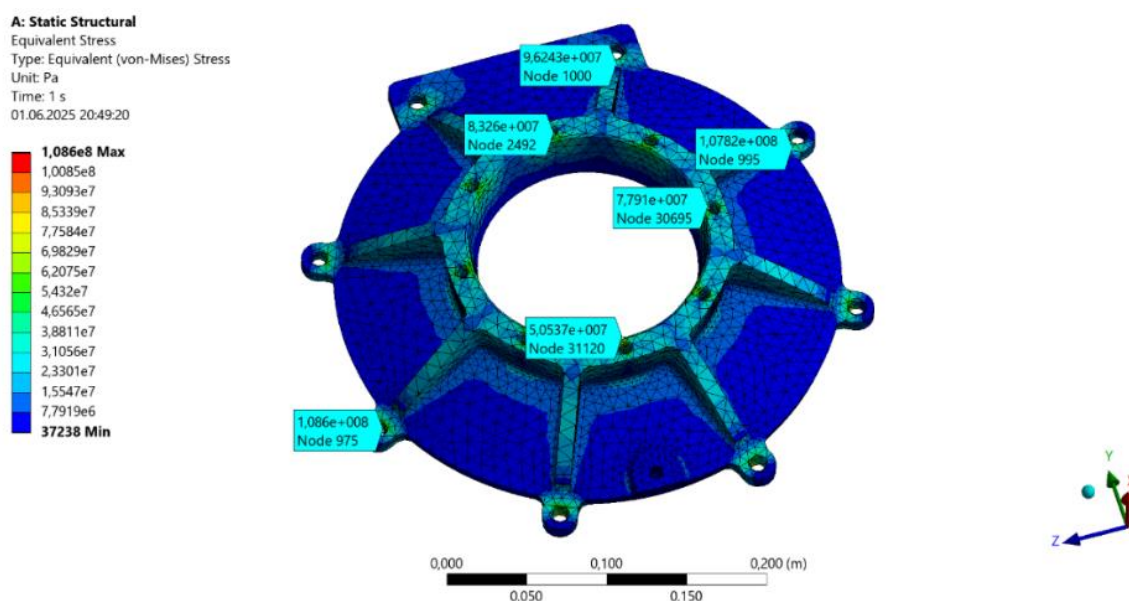


Рисунок 6 – Распределение эквивалентных напряжений в детали «Крышка верхняя»

Подобное распределение напряжений в конструкции детали обусловлено направлением нагрузки – в положительном направлении оси X. Основными «работающими» в этом случае элементами являются отверстия заделки, отверстия фланца и усиливающие ребра.

Наибольшие напряжения фиксируются на отверстиях заделки, которые являются самым слабым местом детали. Максимальное значение эквивалентных напряжений ($\sigma_{\text{эмакс.1}}$, МПа) в результате расчета равно $\sigma_{\text{эмакс.1}} = 108,6$ МПа.

Коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям ($K_{\text{э.кв.}i}$) вычисляют по формуле

$$K_{\text{э.кв.}i} = \frac{\sigma_{\text{в}}}{\sigma_{\text{эмакс.}i}}; \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности материала, МПа;

$\sigma_{\text{эмакс.}i}$ – максимальные эквивалентные напряжение в детали, МПа.

Коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям должен удовлетворять условию:

$$K_{\text{э.кв.}i} \geq K_{\text{min}}$$

Определим для детали «Крышка верхняя» коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям и его соответствие вышеприведенному условию

$$K_{\text{э.кв.1}} = \frac{170}{108,5} = 1,57.$$

Полученный коэффициент удовлетворяет условию прочности, установленному выше. Рассмотрим деталь «Корпус основной» и ее расчетную схему, представленную на рисунке 7.

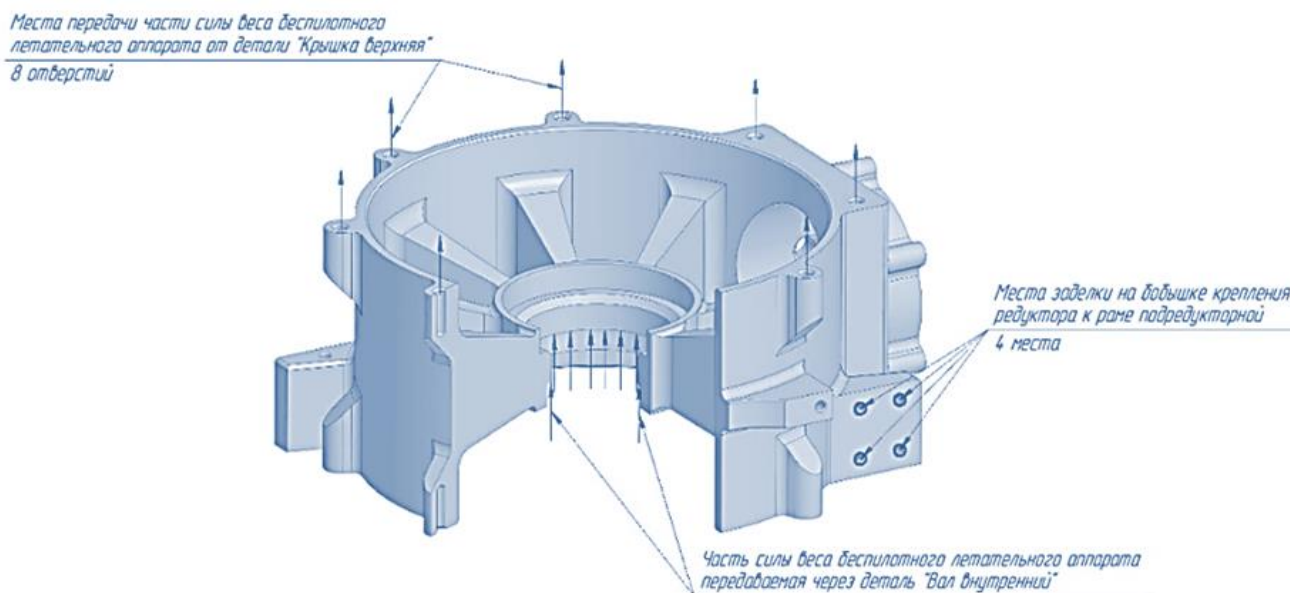


Рисунок 7 – Расчетная схема детали «Корпус основной»

На деталь воздействуют две основные силы: сила веса беспилотного летательного аппарата, передаваемая через крышку верхнюю от вала тихоходного внешнего ($F_{\text{к}} = 15582$ Н), а также сила веса беспилотного летательного аппарата,

передаваемая на корпус основной от детали «Вал внутренний» на посадочное место для подшипника (F_B), причем $F_B = F_k = 15582$ Н.

На рисунке 8 представлена сетка к расчету прочности детали «Корпус основной». Расчетная сетка состоит из 41858 элементов. Проведем расчет согласно расчетной схеме.

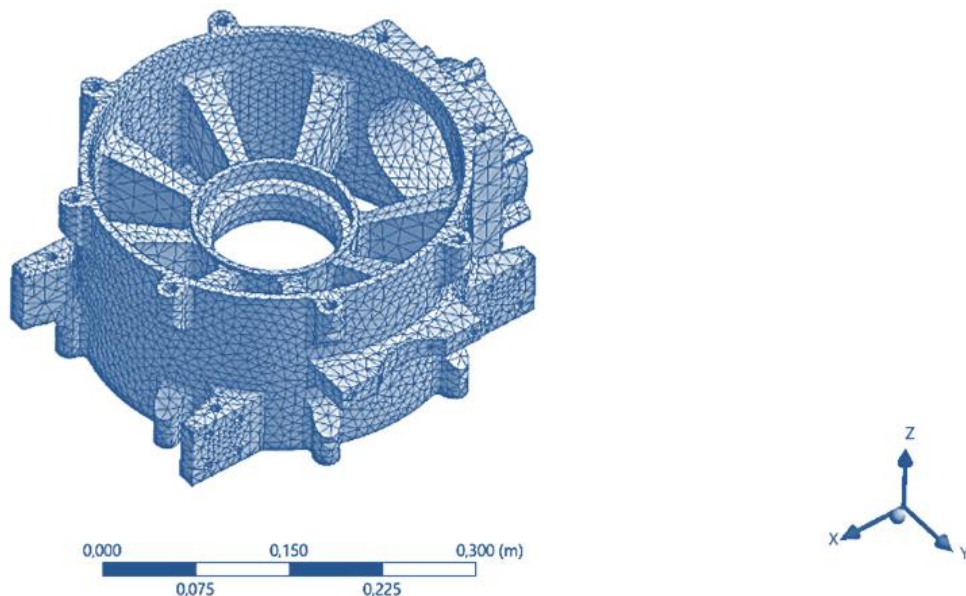


Рисунок 8 – Расчетная сетка детали «Корпус основной»

На рисунке 9 представлена картина распределения эквивалентных напряжений в детали «Корпус основной».

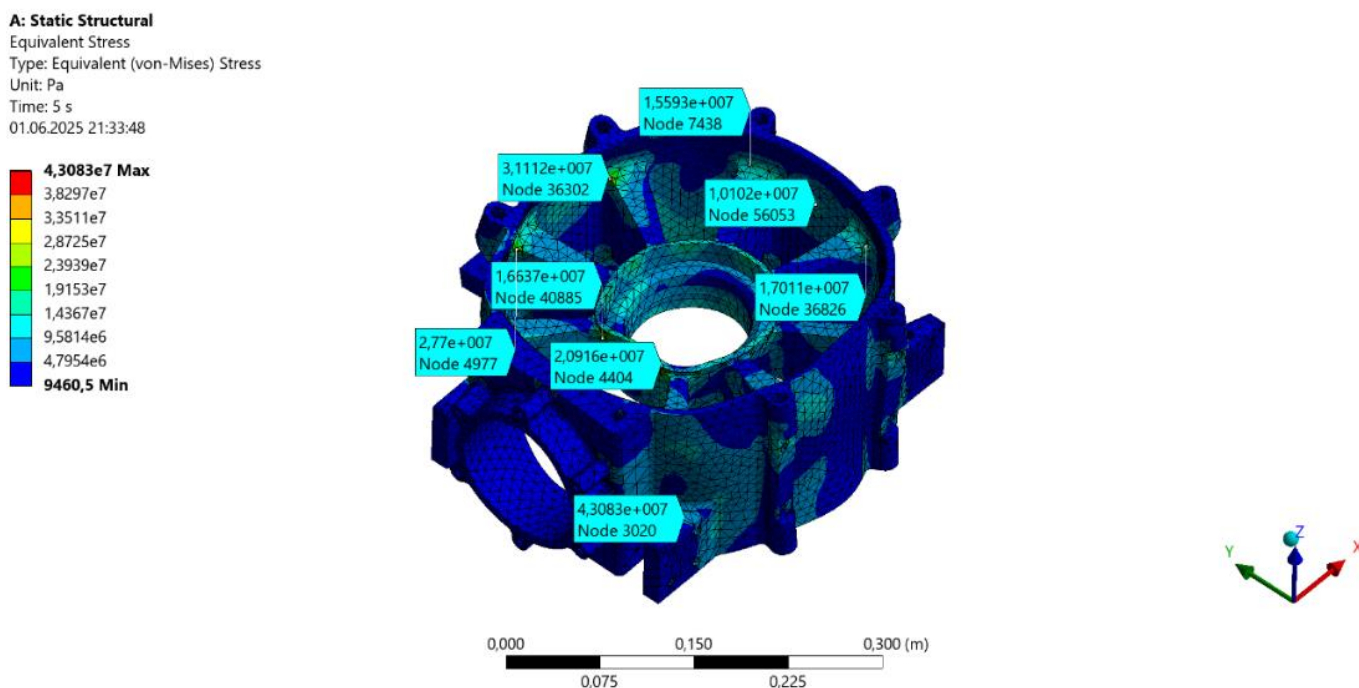


Рисунок 9 – Распределение эквивалентных напряжений в детали «Корпус основной»

Наибольшие напряжения фиксируются на отверстиях заделки. Максимальное значение эквивалентных напряжений ($\sigma_{\text{эмакс.2}}$, МПа) в результате расчета равно $\sigma_{\text{эмакс.2}} = 43,08$ МПа.

Определим для детали «Корпус основной» коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям и его соответствие вышеприведенному условию

$$K_{\text{эв.1}} = \frac{170}{43,08} = 3,94.$$

Полученный коэффициент удовлетворяет условию прочности, установленному выше. Фактическое же значение коэффициента будет несколько ниже ввиду неточностей расчетной модели и идеализированных условий задачи.

В заключении можно отметить, что использование такого программного комплекса ANSYS, а в частности, его модуля Static Structural, позволило сократить время и сложность расчета с нескольких недель до двух рабочих дней, включая работы по подготовке рабочих моделей, разработку схем нагружения и построение расчетных сеток.

Дальнейшее развитие подобных комплексов предполагает усовершенствование алгоритма автоматизированного подбора и контроля параметров расчетных сеток, что ускорит процесс прочностных расчетов.

Авторы выполняют ряд задач по расчетам прочности и в смежных областях промышленности, где также используются подобные программные комплексы, ввиду чего тема прочностных расчетов является актуальной и готовой к дальнейшей проработке.

Список использованной литературы

1. Белов, А. Ф. Строение и свойства авиационных материалов: учебник для вузов / А. Ф. Белов, Г. П. Бенедиктова, А. С. Висков [и др.]. – Москва: Издательство Металлургия. – 1989. – 368 с.

2. Едогур, А. И. Проектирование авиационных конструкций. Проектирование авиационных деталей и узлов: учебное пособие / А. И. Едогур. – Москва: Издательство МАИ-ПРИНТ. – 2009. – 540 с.: ил. – ISBN 978-5-7035-2103-8

3. Силаев, Б. М. Расчет и конструирование деталей авиационных механических передач: учебно-справочное пособие / Б. М. Силаев. – Самара: Издательство Самарского государственного аэрокосмического ун-та. – 2008. – 150 с.: ил.

4. Черноусов, Е. А. Системы автоматизированного проектирования в реализации задач авиастроения // Шаг в науку. – 2022. – №4. – С. 81–86.

5. Яшутин, А. Г. Автоматизированный комплекс силовых и детальных расчетов прочности самолета / А. Г. Яшутин, Е. А. Суренский // Труды МАИ. – 2014. – № 74. – С. 3–26 – EDN SDZCAL.

STRENGTH CALCULATIONS ON THE COMPUTER IN THE DESIGN OF TRANSMISSION ELEMENTS FOR PROMISING AIRCRAFT

**Chernousov Egor Aleksandrovich, Kashapov Timur Dinarovich,
Kasimov Roman Andreevich, 4th year undergraduate student**

Orenburg State University

Abstract. *The article was performed under the supervision of Sergey Reshetov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines.*

The article is devoted to the application of computer systems of engineering analysis, a review of program complexes used for strength calculations in aircraft construction, and, in particular, for calculations of transmission elements of advanced aircraft. The strength calculation of the main gearbox housing elements of a helicopter-type unmanned aerial vehicle has been performed, and practically applicable results have been obtained

Keywords: *strength, transmission, aircraft, gearboxes, aluminum alloys.*



СЕКЦИЯ 8

«КРЕАТИВНАЯ МЕХАНИКА И КОНСТРУКТИВНОЕ ТВОРЧЕСТВО»

(специальная секция для школьников)

ГАЙД ПО ЭФФЕКТИВНОМУ ПОДНЯТИЮ ГРУЗОВ ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ

Иванова¹ Виктория Станиславовна, старший преподаватель кафедры механики материалов, конструкций и машин
Иванова² Вероника Александровна, ученица 9 класса

¹Оренбургский государственный университет

²МОАУ «Лицей №8», г. Оренбург

Аннотация. В данной работе представлен эксперимент по подъёму груза с использованием блочной системы. Показано, как изменение количества подвижных и неподвижных блоков влияет на силу, необходимую для подъёма. Эксперимент сопровождается измерениями, схемами, графиками и теоретическими расчётами, позволяющими наглядно продемонстрировать, как работают простые механизмы. Также проведено сравнение между практическими результатами и теоретическими значениями, полученными по формулам из механики. Работа направлена на развитие инженерного мышления и интереса к физике у начинающих.

Ключевые слова: блок, подъём груза, сила, рычаг, механика, масса, работа, энергия, КПД, простые механизмы.

Код и рубрика: 29.00.00 Физика

С простыми механизмами мы сталкиваемся с раннего возраста – будь то качели, ручки дверей или даже верёвка с ведром в колодце. Один из таких механизмов – блок, который позволяет поднимать тяжёлые предметы, затрачивая меньше усилий [1]. Это устройство используется повсеместно: от подъёмных кранов на стройке до шкивов в спортивных залах.

Чтобы разобраться, как именно блоки помогают человеку, был проведен эксперимент с моделью из конструктора LEGO. Меняя количество подвижных и неподвижных блоков, фиксировали, как уменьшается сила, необходимая для подъёма одного и того же груза. Также сравнили полученные данные с теоретическими расчётами и проанализировали расхождения [2].

Целью данной работы является исследование влияния количества блоков на силу, необходимую для подъёма груза, а также сравнение практических данных с теоретическими расчётами на основе физических формул.

Для проведения эксперимента использовалась модель, собранная из конструктора LEGO. В качестве груза использовались четыре одинаковых колеса, общая масса которых составила **129 граммов**.

На первом этапе измерили массу груза без использования какой-либо системы блоков. Груз поднимался вручную, и сила, которую нужно было приложить, соответствовала полной массе груза. Измеренный вес: **129 грамм**.

Результаты измерений показаны на рисунке 1.



Рисунок 1 – Измерение веса на первом этапе

Затем добавили один подвижный блок. Система стала блочно-рычажной [3], и сила, необходимая для подъёма груза, уменьшилась примерно в два раза.

Измеренный вес: **62 грамма.**

Эксперимент показан на рисунке 2, результаты и схема представлены на рисунке 3.



Рисунок 2 – Подъем груза через один подвижный блок

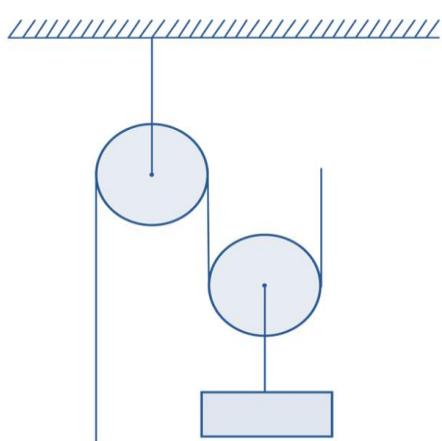


Рисунок 3 – Схема закрепления груза и вес (один подвижный и один неподвижный блок)

С добавлением ещё одного подвижного и неподвижного блока сила снова уменьшилась вдвое.

Измеренный вес: *в пределах от 29 до 31 грамма.*

Фото эксперимента представлены на рисунке 4, а результаты замеров, схема закрепления на рисунке 5.

После добавления третьей пары блоков (то есть всего шести блоков – 3 подвижных и 3 неподвижных) измерения показали, что требуемая сила для подъёма составляет всего *14 грамм.*

Фото эксперимента представлены на рисунке 6, а результаты замеров и схема закрепления на рисунке 7. Процесс подъема груза можно посмотреть по ссылке ниже:

https://drive.google.com/file/d/1e6oy45wQYfbgviNHhJlixEmE5wornDFN/view?usp=drive_link



Рисунок 4 – Подъем груза через две пары блоков

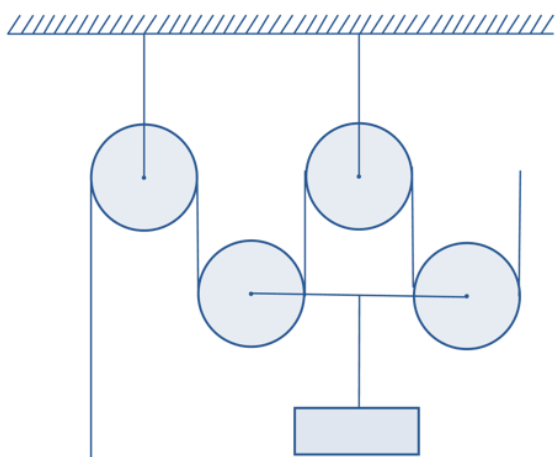


Рисунок 5 – Схема закрепления груза (два подвижных и два неподвижных блока) и вес

Чтобы объяснить полученные результаты, обратимся к физике простых механизмов [4]. Система блоков относится к рычажным механизмам, и её основное назначение – уменьшить силу, необходимую для выполнения работы. Запишем формулу для определения работы:

$$A = F \times S, \quad (1)$$

где: A – работа (Дж),
 F – сила (Н),
 S – перемещение (м).

Так как работа остаётся неизменной, то при уменьшении силы перемещение увеличивается. То есть, уменьшая вдвое силу, мы вдвое увеличиваем длину протягиваемой верёвки.



Рисунок 6 – Подъем груза через три пары блоков

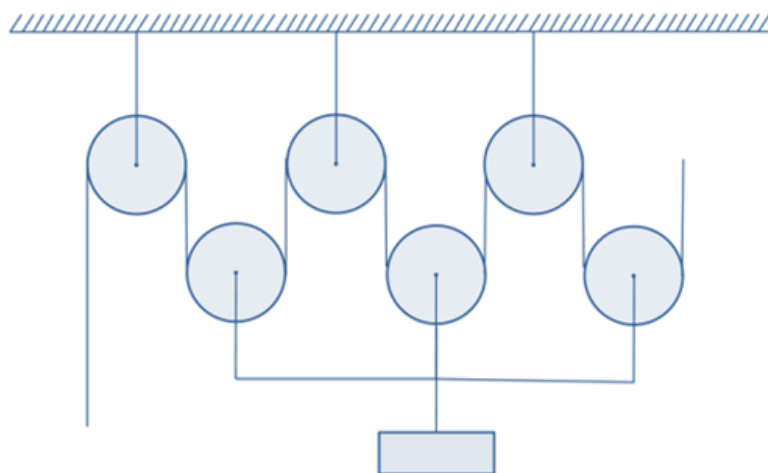


Рисунок 7 – Схема закрепления груза и вес (три подвижных и три неподвижных блока)

Если пренебречь трением и считать систему идеальной, сила, необходимая для подъема груза, будет уменьшаться в зависимости от количества подвижных блоков по формуле:

$$F = \frac{F_0}{2^n},$$

где: F_0 – сила, необходимая без блоков (в ньютонах),

n – количество подвижных блоков.

Преобразуем массу в вес:

$$F_0 = mg = 0,129 \cdot 9,8 = 1,26 \text{ Н.}$$

Рассчитаем силу и соответствующий «вес» (массу) для каждого количества подвижных блоков. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость веса от количества блоков (расчетная)

Кол-во подвижных блоков	Теоретическая сила (Н)	Теоретический вес (г)
0	1,26	129
1	0,63	64,5
2	0,315	32,25
3	0,1575	16,13

Практическое значение силы, полученное в результате эксперимента, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Зависимость веса от количества блоков (экспериментальная)

Кол-во подвижных блоков	Практический вес (г)	Теоретический вес (г)
0	129	129
1	61,5	64,5
2	31	32,25
3	14	16,13

Для наглядного представления результатов был построен график зависимости веса груза от количества подвижных блоков. По оси x (горизонтальной линии) отложено количество подвижных блоков (от 0 до 3), по оси y (вертикальной) – вес груза в граммах. График представлен на рисунке 8.

На графике представлены две линии:

- сплошная линия показывает практические данные, полученные в ходе эксперимента;
- пунктирная линия отображает теоретические значения, рассчитанные по формуле уменьшения силы в 2 раза с каждым добавленным подвижным блоком.

График демонстрирует, что практические и теоретические значения близки друг к другу. Небольшие отклонения могут быть связаны с трением в блоках, неточностью измерений или неидеальными условиями эксперимента. Тем не менее общая тенденция подтверждает, что сила действительно уменьшается экспоненциально при использовании блочной системы.

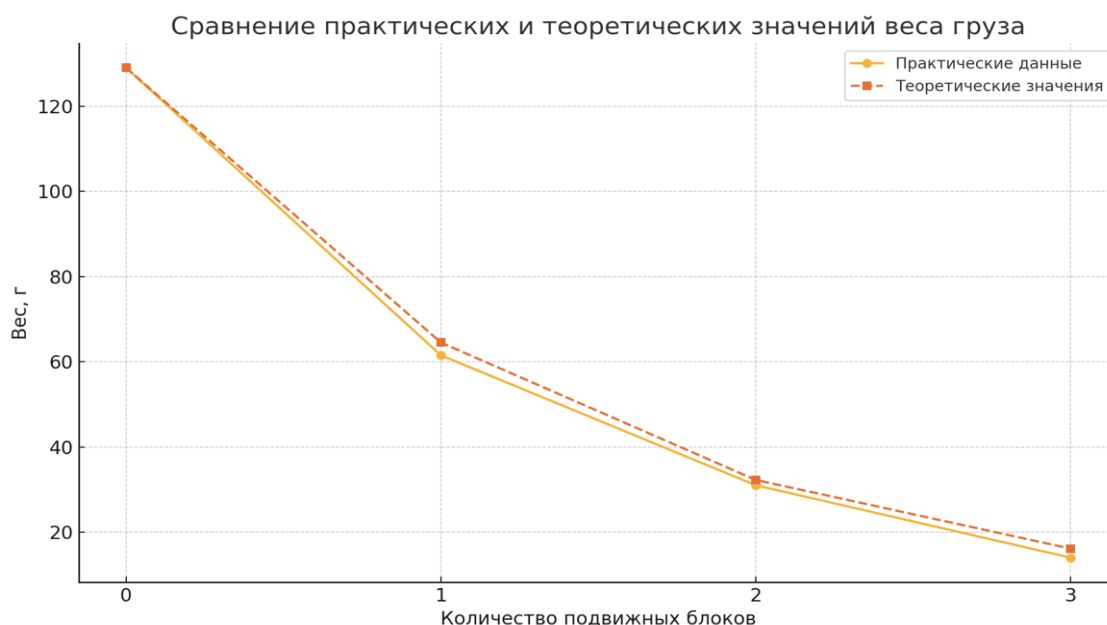


Рисунок 8 – График зависимости веса груза от количества подвижных блоков

В ходе работы была исследована эффективность блочной системы при подъёме груза. С помощью конструктора LEGO была собрана модель, на которой наглядно показано, как с увеличением количества подвижных блоков уменьшается сила, необходимая для подъёма.

Практические измерения показали, что вес, ощущаемый при подъёме, снижался почти в два раза с каждой новой парой блоков. Это полностью совпадает с теоретическими расчётами, основанными на законе сохранения энергии.

Таким образом, эксперимент подтвердил, что блочная система позволяет значительно облегчить физическую работу за счёт увеличения пути, и отлично демонстрирует действие простых механизмов в повседневной жизни. Проведённое исследование помогло мне лучше понять, как физика применяется на практике, и показало, что с её помощью можно решать реальные задачи простыми средствами.

Список использованной литературы

1. Мякишев, Г. Я. Физика. 7–9 классы / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев. – М.: Просвещение.
2. Простые механизмы: рычаг, блок, наклонная плоскость [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://obrazovanie-gid.ru/doklady/prostye-mehanizmy.html> (дата обращения: 03.06.2025).
3. Как работают блоки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://physicsinschool.ru/blok-mechanism> (дата обращения: 03.06.2025).
4. Закон сохранения энергии : видеоурок по физике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://interneturok.ru> (дата обращения: 03.06.2025).

GUIDE TO EFFECTIVE LOAD LIFTING FOR BEGINNERS

Victoria S. Ivanova¹

Veronika A. Ivanova², 9th grade student

¹*Orenburg State University*

²*MOAU "Lyceum No. 8", Orenburg*

Annotation. *The work presents a simple and visual experiment that demonstrates how block-and-tackle systems reduce the effort needed to lift a load. A LEGO-based model was used to measure the reduction in perceived weight depending on the number of pulleys used. The results were compared with theoretical values calculated using formulas from classical mechanics. The experiment confirms that block systems significantly reduce the lifting force while increasing the lifting distance.*

Keywords: *pulleys, mechanical advantage, lifting force, experiment, energy, simple machines, physics.*

ОТ ЗАМАХА ДО УДАРА: МЕХАНИКА ТЕЛА В БОЛЬШОМ ТЕННИСЕ

Подоляк¹ Наталья Ярославовна, преподаватель отделения технологических процессов и производств

Подоляк² Ярослав Александрович, ученик 4 класса

¹ Университетский колледж Оренбургского государственного университета

² МОАУ «Средняя образовательная школа № 68 с углубленным изучением русского языка и математики» г. Оренбург

Аннотация. В работе подробно описаны компоненты удара, такие как постановка ног, ротация туловища, замах, контакт и проход; рассмотрена механика удара, фазы движения, роль кинетической цепи, типы ударов, подача.

Ключевые слова: большой теннис; механика удара; методы анализа движений; эффективность удара.

Код и рубрика: 29.00.00 Физика

Большой теннис – это захватывающий вид спорта, где два игрока (в одиночном разряде) или две команды (в парном разряде) соревнуются в мастерстве владения ракеткой и мячом. Цель проста: направить мяч на сторону соперника так, чтобы он не смог его отбить в соответствии с правилами. Успешный розыгрыш очка требует не только физической подготовки, но и стратегического мышления.

Одним из важнейших аспектов игры, определяющим динамику матча, является подача. В современном теннисе, где техника выполнения ударов постоянно совершенствуется, подача играет решающую роль. Она представляет собой способ введения мяча в игру, но, помимо этого, может стать мощным оружием, определяющим дальнейший ход розыгрыша.

По мнению многих специалистов, подача – это один из самых сложных элементов тенниса. Несмотря на то, что техника подачи отрабатывается на тренировках до автоматизма, качество выполнения подачи напрямую зависит от мастерства спортсмена и его способности адаптироваться к условиям игры. В связи с этим одной из актуальных проблем современного тенниса является изучение механических основ строения ударного действия при выполнении подачи [1].

Успешная подача характеризуется двумя ключевыми параметрами: мощностью и точностью. Недостаточная сила подачи позволяет сопернику легко контратаковать, лишая подающего преимущества. Неточная подача приводит к ошибкам и потере очков.

Эффективность подачи влияет не только на тактические возможности игрока, но и на его психологическое состояние. Неудачные подачи могут привести к деморализации, снижению уверенности в себе и, как следствие, к ухудшению общей игры.

Также можно сказать, что подача является краеугольным камнем успешной игры в современном теннисе. Совершенствование техники подачи, развитие силы и точности удара, а также психологическая устойчивость в процессе выполнения этого элемента – важные факторы, определяющие конкурентоспособность

спортсмена. Понимание механики и стратегии подачи позволяет молодым теннисистам не только улучшить свои игровые навыки, но и раскрыть потенциал для достижения высоких результатов в этом увлекательном виде спорта.

Механика в большом теннисе изучает движения теннисистов, механизмы, лежащие в основе техники игры, и их влияние на эффективность ударов.

Для изучения механики в теннисе используются, следующие методы:

1. Кинематический анализ (позволяет измерять и описывать движения в пространстве и времени).

2. Электромиография (помогает проанализировать работу мышц на разных фазах ударного действия).

3. Видеосъёмка (позволяет изучить внешнюю картину движений и структуру ударов) [2].

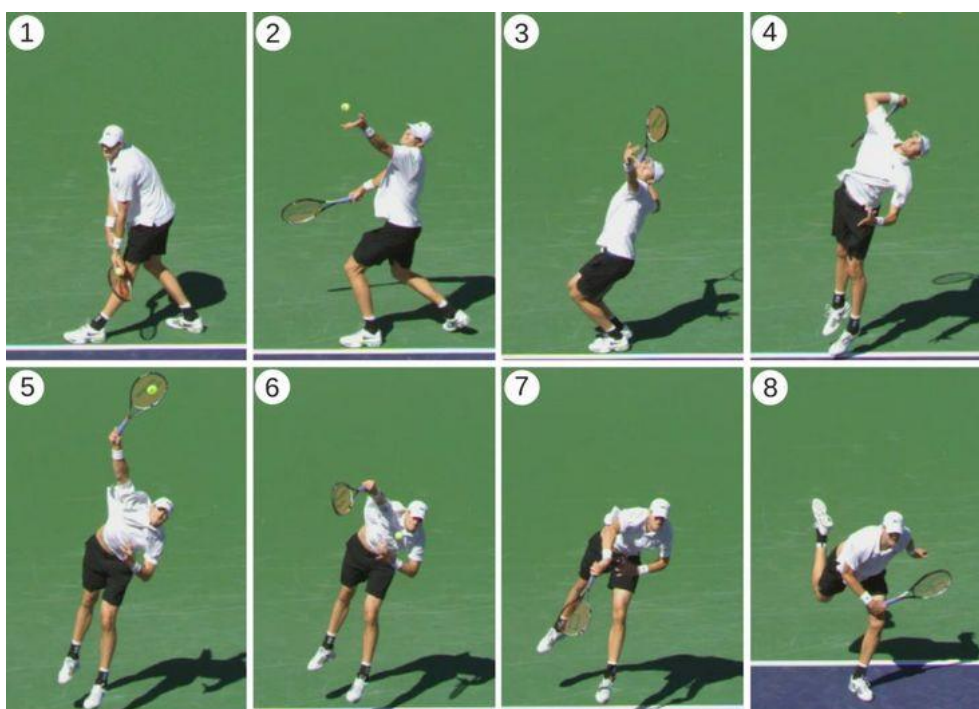


Рисунок 1 – Механика тела при подаче

Основные принципы механики, заложенные в основу:

1. Последовательное включение мышц. Волна мышечной активности начинается с ног, распространяется на мышцы туловища, плечевого пояса, плеча и предплечья бьющей руки.

2. Передача импульса. От нижележащих, (например, ног) импульс передаётся к вышерасположенным (руке с ракеткой).

3. Использование веса тела. В момент соприкосновения ракетки с мячом вес тела перемещается в направлении удара, что увеличивает силу и точность движения.

Теннисный удар является сложным и многосоставным движением, которое требует координации множества, суставов. Механика теннисного удара включает в себя изучение движений тела и приложенных сил для достижения максимальной

эффективности. С точки зрения расположения тела, механика тела включает: постановку ног; положение тела; замах; контакт с мячом и завершение удара. Компоненты удара более подробно рассмотрены в таблице 1.

Таблица 1 – Описание компонентов удара

Компоненты удара	Основная цель	Техника исполнения
Постановка ног	Обеспечение стабильности и мощной основы для удара	Ноги расположены на ширине плеч, одна нога может быть немного впереди другой. Вес на передней ноге. При ударе вес тела переносится на переднюю ногу для увеличения силы и контроля
Положение тела и ротация	Создание кинетической цепи для передачи максимальной силы от ног через туловище к ракетке	Движение начинается с поворота бедер и туловища, что создаёт кинетическую цепь. Движение ног, туловища и рук должно быть синхронизировано
Подготовка и замах	Подготовка к удару и накопление энергии	Замах назад, удерживая ракетку в удобной позиции для мощного замаха. Плечи необходимо развернуть так, чтобы они были параллельны линии удара. Локоть ведущей руки должен быть немного согнут, а ракетка должна находиться выше уровня головы
Контакт с мячом	Обеспечение оптимального удара по мячу для контроля и силы	Удар должен происходить впереди тела на уровне между бедрами и плечами. Взгляд на мяч. Необходимо сосредоточиться на мяче до момента контакта. Удар должен быть нанесен плоскостью ракетки, перпендикулярной направлению удара
Проход и завершение удара	Завершение удара с максимальной эффективностью и готовность к следующему движению	Проход ракетки. После удара необходимо продолжить движение ракетки вперед и вверх. В момент завершения удара ракетка должна заканчиваться выше противоположного плеча. Возвращение в исходное положение в центр корта для готовности к следующему удару

Далее рассмотрим механику ударов. Удар в теннисе, согласно [2], состоит из пяти фаз:

1. *Замах* – обеспечение грубой ориентации ракетки.
2. *Разгон* – уточнение ориентации ракетки в зависимости от вращения и высоты точки удара, обеспечение жёсткости системы «рука-ракетка».
3. *Удар* – передача накопленной энергии бьющей руки и ракетки мячу.

4. *Торможение* – уменьшение скорости ракетки в направлении удара до полной остановки.

5. *Завершение* – быстрый «выход» из удара, возвращение ракетки в исходное положение и подготовка к следующему удару.

Для рассмотрения типов ударов и их механики, нужно ответить на вопрос: «Какие бывают удары в теннисе?». Когда человек играет в теннис, он делает разные удары. И каждый удар – это немного механика. Например, ракетка может ударить по мячу быстро или медленно. А еще, она может давить на мячик или просто коснуться его.

В статье [3] сказано, что ускорение свидетельствует о внешней результирующей силе, действующей на изучаемые звенья, а это значит, что к моменту взаимодействия с мячом ракетка может подойти с разным ускорением [3]. В зависимости от тактических задач удары могут быть трех типов:

1. Удар-касание (баллистический тип). Представьте, человек просто подставляет ракетку под мячик, и он от нее отлетает. Человек не толкает его сильно, а просто даёт ему коснуться ракетки. Как когда спортсмен легко отбивает мячик после подачи соперника. В этом ударе ракетка почти не разгоняется, она «входит в мяч» без ускорения. Важно, чтобы ракетка была твердой и натянутой.

Пример: короткий блок на сильную подачу, когда просто нужно перебросить мяч на другую сторону корта.

2. Силовой удар. Представьте, что вот тут спортсмен уже бьет по мячику от души! Он толкает его ракеткой, и она (ракетка) разгоняется вперед. Как когда человек делает мощный форхенд или бэкхенд. Ракетка давит на мяч, и он летит очень быстро. Здесь важно вложиться в удар всем телом.

Пример: мощный удар по восходящему мячу, когда нужно пробить защиту соперника.

3. Удар-торможение. Представьте, спортсмен делает короткий удар около сетки, чтобы мячик перелетел сетку и сразу упал. В этом ударе теннисист сначала разгоняет ракетку, а потом как бы притормаживает ее перед самым касанием мячика. Это чтобы мячик полетел медленнее и упал ближе к сетке. Ракетка сначала набирает скорость, а потом ее сбрасывает. Здесь важна точность и чувство мяча.

Пример: укороченный удар (дроп-шот) – нужно обмануть соперника и заставить его бежать к сетке.

Почему это важно знать? Зная, какие бывают удары, спортсмен сможет лучше понимать, как правильно бить по мячику в разных ситуациях. Он сможет выбирать, какой удар лучше сделать, чтобы выиграть очко.

На рисунке 2 можно увидеть, как двигается тело теннисиста, когда он делает удар. Это как комикс, где показано несколько моментов подряд. При внимательном рассмотрении становится понятно, что сначала теннисист готовится к удару (позы 1 и 2). Он вытягивает руку с ракеткой назад и разворачивает корпус. Это как будто он заряжает пружину, чтобы потом сильно ударить.

Потом (позы 3 и 4) он бьет по мячику. Видно, как рука с ракеткой летит вперед, а корпус поворачивается. После удара (позы 5 и 6) теннисист завершает движение. Он как бы «проводит» мячик взглядом и возвращает ракетку в исходное положение. Важно следить за тем, чтобы движения были плавными и

правильными. Так удар получится сильнее и точнее, и спортсмен не получит травму. Механика удара показывает, как передается сила от ног и корпуса к ракетке, чтобы мячик полетел туда, куда хочет теннисист.

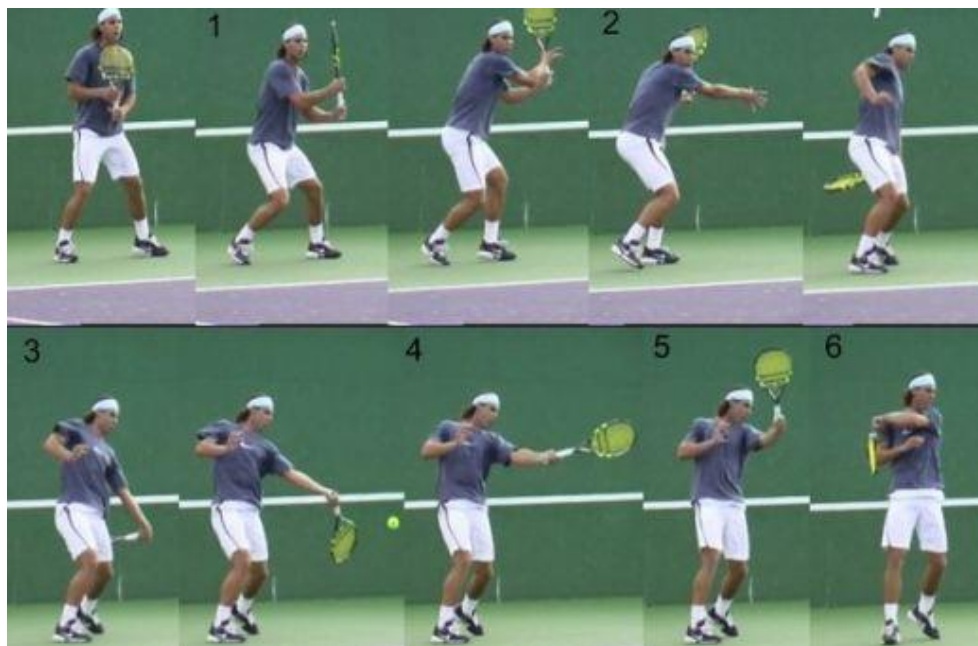


Рисунок 2 – Механика тела при ударе

Правильные движения помогают теннисисту лучше бить по мячику, чтобы он летел туда, куда он хочет, и спортсмен меньше уставал. Если человек научится правильно двигаться, то будет стабильно хорошо играть, и у него будет меньше шансов получить травму. Ведь правильно бить – это значит не только сильно, но и безопасно для тела спортсмена. Поэтому, когда теннисист играет в теннис, он всегда думает о том, как он двигается, как переносит вес тела, и как бьет по мячику.

Правильная техника и знание механики движений помогают избежать травм. Например, если постоянно неправильно бить по мячу, можно повредить плечо или локоть. Поэтому так важно учиться правильным движениям у тренера и следить за своей техникой. Это поможет спортсмену стать отличным теннисистом.

Еще одна особенность тенниса в том, что это не совсем симметричный вид спорта. Большую часть ударов спортсмен делает одной рукой, и это может привести к неравномерной нагрузке на мышцы. Чтобы этого избежать, нужно уделять внимание упражнениям, которые укрепляют мышцы всего тела, особенно те, которые помогают поддерживать равновесие и правильную осанку. Понимание механики тела и правильная техника игры помогут теннисисту долго наслаждаться этим видом спорта без риска для здоровья.

Механика в большом теннисе – ключевой элемент, определяющий эффективность ударов, стабильность техники и снижение риска травм. Основные аспекты включают анализ движений, передачу энергии и оптимизацию игровых действий.

Список использованных источников

1. Биомеханические аспекты реализации ударных действий в теннисе. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/biomehanicheskie-aspekty-realizatsii-udarnyh-deystviy-v-tennise/viewer> (дата обращения 12.05.2025).
2. Биомеханика теннисного удара: как добиться максимальной эффективности. – Режим доступа: <https://dzen.ru/a/Zow1rYstgXhn74Rj/> (дата обращения 14.05.2025).
3. Основные виды ударов в большом теннисе. – Режим доступа: <https://tennis-go-school.ru/vidy-udarov-v-bolshom-tennise-osnovnye> (дата обращения 14.05.2025).

FROM SWING TO IMPACT: BODY MECHANICS IN TENNIS

Podolyak¹ Natalia Yaroslavovna, teacher of the department of technological processes and production

Podolyak² Yaroslav Aleksandrovich, 4th grade student

¹University College of Orenburg State University

²MOAU "Secondary Educational School No. 68 with Advanced Study of Russian Language and Mathematics" of Orenburg

Abstract. *The work describes in detail the components of the strike, such as foot placement, torso rotation, swing, contact and passage; considers the mechanics of the stroke, phases of movement, the role of the kinetic chain, types of strokes, serve.*

Keywords: *tennis; stroke mechanics; methods of movement analysis; stroke efficiency.*

ОРЕХОКОЛ: МАЛЕНЬКИЙ ИНСТРУМЕНТ С БОЛЬШОЙ СИЛОЙ

**Иванова¹ Виктория Станиславовна, старший преподаватель кафедры
механики материалов, конструкций и машин**

Иванов² Владислав Александрович, ученик 6 класса

¹*Оренбургский государственный университет*

²*МОАУ «Лицей №8», г. Оренбург*

***Аннотация.** В работе представлены несколько вариантов орехокола и проведен сравнительный анализ этих вариантов*

***Ключевые слова:** орехокол, рычаг, нагрузка, точка опоры*

***Код и рубрика:** 68.00.00*

Как всем известно, орехи – это весьма полезные продукты. Вкусовые качества и питательный состав делают их незаменимым компонентом рациона человека. Плоды представляют кладезь витаминов, минералов, ненасыщенных жирных кислот и аминокислот. Богаты пищевыми волокнами, антиоксидантами, которые снижают риск развития сердечно-сосудистых заболеваний, рака, помогают укрепить иммунитет.

В этой связи становится актуальным вопрос отделения и извлечения ядра ореха от скорлупы. [1]. Фотография нескольких вариантов орехокола представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Исследуемые орехоколы

Цель работы заключалась в определении эффективности каждого орехокола (цельность ядер, скорость колки, усилие) и выбора оптимального [2].

В настоящем исследовании была проведена сравнительная оценка эффективности трёх типов орехоколов: рычажного с пластиковыми ручками, регулируемого металлического и кухонных ножниц с функцией орехокола. Эксперимент проводился на орехах с массой около 14 граммов.

Для обеспечения сопоставимости результатов, для каждого инструмента было подготовлено по 10 однотипных орехов. Перед началом испытаний были измерены ключевые конструктивные параметры каждого орехокола, включающие:

- толщину стенок и рабочей части, непосредственно контактирующей с орехом;
- размеры и форму фиксаторов (выемок) для удержания ореха;
- расстояние между ручками в исходном положении (ширина захвата руки).

Данные замеров представлены в таблице 1, а на рисунке 2 представлены измерения ширины захвата для всех исследуемых орехоколов.

Таблица 1 – Результаты замеров конструктивных параметров орехоколов

Параметр	Рычажный орехокол (пластиковый)	Рычажный орехокол (металлический)	Кухонные ножницы с орехоколом
Толщина стенок, мм	10	6	3
Размер фиксаторов, мм	30	21	24
Ширина захвата ручек, мм	50	82	110



Рисунок 2 – Замеры ширины захвата ручки

Процесс колки осуществлялся следующим образом: орех помещался в фиксирующую выемку орехокола, после чего сжимались ручки инструмента до появления трещины на скорлупе. Прикладываемое усилие оценивалось

субъективно по шкале от 1 (минимальное усилие) до 5 (максимальное усилие, при котором работа становится затруднительной).

В ходе эксперимента фиксировалось также время, затрачиваемое на колку одного ореха, что позволило оценить скорость работы с каждым орехоколом.

Особое внимание уделялось ширине захвата ручек каждого инструмента. Было установлено, что увеличение расстояния между ручками существенно повышает субъективное усилие, необходимое для их сжатия, что снижает эргономику и эффективность использования. Наибольшее значение было зафиксировано у кухонных ножниц, что объясняет повышенную утомляемость при их применении. Рычажный орехокол с пластиковыми ручками демонстрирует оптимальное соотношение между шириной захвата и необходимыми физическими усилиями, обеспечивая более комфортную и эффективную работу.

Данные, полученные в ходе эксперимента, были обработаны с целью определения процентного соотношения целых и повреждённых ядер, а также анализа скорости колки и субъективного комфорта работы с каждым инструментом [3].

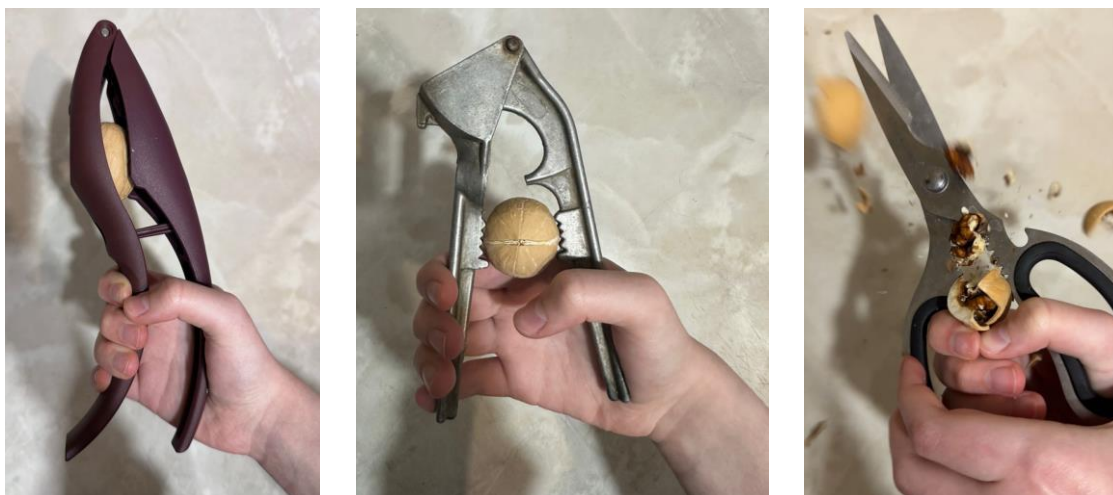


Рисунок 3 – Процесс колки орехов

Проведенные измерения демонстрируют, что пластиковый рычажный орехокол характеризуется оптимальными геометрическими параметрами: толщина стенок и конфигурация фиксаторов обеспечивают надежную фиксацию орехов независимо от их размерного ряда. Кроме того, эргономичная ширина захвата рукоятей способствует эффективному преобразованию прикладываемого усилия в механическое воздействие на скорлупу.

Субъективная оценка в ходе экспериментальных испытаний подтвердила, что использование пластикового орехокола требует на *15–20% меньшего мышечного усилия* по сравнению с альтернативными инструментами. Данный эффект обусловлен конструктивными особенностями устройства, включающими:

- *прогрессивное распределение нагрузки* на скорлупу,
- *адаптивную систему фиксации*, минимизирующую точечные перегрузки,
- *оптимизированный КПД рычажного механизма*.

В сравнении с регулируемым металлическим аналогом, пластиковая модель демонстрирует *преимущества в эргономике* [4]:

Во-первых, узкая рукоять снижает утомляемость кисти.

Во-вторых, упругость материала гасит вибрации, улучшая контроль над процессом.

Ножницы кухонного типа показали *наименьшую эффективность* из-за:

- чрезмерного угла раскрытия лезвий ($> 30^\circ$), требующего повышенного усилия;
- отсутствия направленного давления на скорлупу;
- риска повреждения ядер при эксцентричной нагрузке.

Таким образом, результаты измерений и наблюдений свидетельствуют о том, что рычажный орехокол с пластиковыми ручками является наиболее эффективным инструментом для колки орехов весом около 14 граммов, обеспечивая оптимальное соотношение между усилием, удобством использования и сохранностью ядер.

Рычажный орехокол характеризуется высокой эффективностью – высокий процент целых ядер и низкое усилие благодаря удобной эргономике и оптимальному механизму.

Регулируемый металлический орехокол требует большего усилия и немного хуже сохраняет ядра из-за жёсткой конструкции.

Кухонные ножницы показали наихудшие результаты – низкий процент целых ядер, высокое усилие и длительное время колки, что связано с неудобной шириной захвата и отсутствием специализированного механизма.

В результате проведённого сравнительного анализа трёх типов орехоколов были выявлены следующие закономерности:

1. *Рычажный орехокол с пластиковыми ручками* показал наилучшие результаты по всем ключевым показателям. Высокий процент целых ядер (70%) свидетельствует о бережном и эффективном раскалывании скорлупы без значительных повреждений ядра. Низкое субъективное усилие (2 балла) и высокая оценка удобства использования (4 балла) подтверждают эргономичность и комфорт работы с этим инструментом. Среднее время колки одного ореха (8 с) также является оптимальным среди исследуемых образцов.

2. *Регулируемый металлический орехокол* продемонстрировал средние показатели. Несмотря на возможность регулировки размера фиксаторов, он требует большего усилия (3 балла) и дольше времени на колку (10 с), что связано с жёсткой конструкцией и более широкой ручкой. Процент целых ядер (60 %) ниже, чем у рычажного орехокола, что указывает на менее равномерное распределение давления.

3. *Кухонные ножницы с орехоколом* показали наихудшие результаты по всем параметрам: низкий процент целых ядер (40 %), высокое субъективное усилие (4 балла), наибольшее время колки (15 с) и низкая оценка удобства (2 балла).

Полученные данные могут быть объяснены двумя ключевыми факторами:

- неоптимальной антропометрической характеристикой инструмента – чрезмерной шириной захвата (превышающей 50 мм), не соответствующей биомеханическим параметрам кисти взрослого человека;

– отсутствием специализированного деформационного механизма, предназначенного для контролируемого разрушения скорлупы.

Проведенный сравнительный анализ позволяет заключить, что рычажный орехокол с полимерными рукоятями демонстрирует максимальную эффективность при обработке орехов средней массы (14 ± 2 г).

Список использованной литературы:

1. Ros, E. Health benefits of nut consumption / E. Ros // *Nutrients*. – 2010. – 2(7). – p. 652-682. (*Обзорная статья о питательной ценности орехов, их влиянии на сердечно-сосудистую систему и антиоксидантных свойствах*).
2. Mitcham, E. J. Postharvest handling systems: Tree nuts / E. J. Mitcham, C. H. Crisosto, A. A. Kader. – University of California, Agriculture and Natural Resources. – 2002. – 3313. – С. 1-12. (*Методические рекомендации по обработке орехов, включая механические методы разрушения скорлупы*).
3. Kiliңkaya, M. Design and evaluation of ergonomic nutcracker for hazelnuts / M. Kiliңkaya, H. Ünal // *Journal of Food Engineering*. – 2018. – 222. – p. 207-215. (*Исследование эргономики орехоколов, включая анализ усилия, ширины захвата и сохранности ядер*).
4. ISO 9241-400:2007. Ergonomics of human-system interaction. – Part 400: Principles and requirements for physical input devices. (*Стандарт по эргономике ручных инструментов, включая параметры ширины захвата и усилия*).

NUT CRUSHER: A SMALL TOOL WITH GREAT POWER

Victoria S. Ivanova¹, Senior Lecturer, Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines
Vladislav A. Ivanov², 6th grade student

¹*Orenburg State University*

²*MOAU «Lyceum No. 8», Orenburg*

Annotation: *The paper presents several variants of a nut crusher and conducts a comparative analysis of these variants*

Keywords: *nut crusher, lever, load, fulcrum*

МАТЕРИАЛЫ
IV ВСЕРОССИЙСКОЙ МОЛОДЕЖНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«СОВРЕМЕННАЯ МЕХАНИКА В ЦИФРОВУЮ ЭПОХУ:
ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ»

3-4 июня 2025 г.

Дата принятия к использованию 03.07.2025
Размер 14,702 Мб
Оренбургский государственный университет
460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13