

МОЛОДОЙ УЧЁНЫЙ

ISSN 2072-0297

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



16+

18 2026
ЧАСТЬ I

Молодой ученый

Международный научный журнал

№ 18 (621) / 2026

Издается с декабря 2008 г.

Выходит еженедельно

Главный редактор: Ахметов Ильдар Геннадьевич, кандидат технических наук

Редакционная коллегия:

Жураев Хусниддин Олтинбоевич, доктор педагогических наук (Узбекистан)
Иванова Юлия Валентиновна, доктор философских наук
Каленский Александр Васильевич, доктор физико-математических наук
Кошербаева Айгерим Нуралиевна, доктор педагогических наук, профессор (Казахстан)
Куташов Вячеслав Анатольевич, доктор медицинских наук
Лактионов Константин Станиславович, доктор биологических наук
Сараева Надежда Михайловна, доктор психологических наук
Абдрасилов Турганбай Курманбаевич, доктор философии (PhD) по философским наукам (Казахстан)
Авдеюк Оксана Алексеевна, кандидат технических наук
Айдаров Оразхан Турсункожаевич, кандидат географических наук (Казахстан)
Алиева Тарана Ибрагим кызы, кандидат химических наук (Азербайджан)
Ахметова Валерия Валерьевна, кандидат медицинских наук
Бердиев Эргаш Абдуллаевич, кандидат медицинских наук (Узбекистан)
Брезгин Вячеслав Сергеевич, кандидат экономических наук
Данилов Олег Евгеньевич, кандидат педагогических наук
Дёмин Александр Викторович, кандидат биологических наук
Дядюн Кристина Владимировна, кандидат юридических наук
Желнова Кристина Владимировна, кандидат экономических наук
Жуйкова Тамара Павловна, кандидат педагогических наук
Игнатова Мария Александровна, кандидат искусствоведения
Искаков Руслан Маратбекович, кандидат технических наук (Казахстан)
Калдыбай Кайнар Калдыбайулы, доктор философии (PhD) по философским наукам (Казахстан)
Кенесов Асхат Алмасович, кандидат политических наук
Коварда Владимир Васильевич, кандидат физико-математических наук
Комогорцев Максим Геннадьевич, кандидат технических наук
Котляров Алексей Васильевич, кандидат геолого-минералогических наук
Кузьмина Виолетта Михайловна, кандидат исторических наук, кандидат психологических наук
Курпаяниди Константин Иванович, доктор философии (PhD) по экономическим наукам (Узбекистан)
Кучерявенко Светлана Алексеевна, кандидат экономических наук
Лескова Екатерина Викторовна, кандидат физико-математических наук
Макеева Ирина Александровна, кандидат педагогических наук
Матвиенко Евгений Владимирович, кандидат биологических наук
Матроскина Татьяна Викторовна, кандидат экономических наук
Матусевич Марина Степановна, кандидат педагогических наук
Мусаева Ума Алиевна, кандидат технических наук
Насимов Мурат Орленбаевич, кандидат политических наук (Казахстан)
Паридинова Ботагоз Жаппаровна, магистр философии (Казахстан)
Прончев Геннадий Борисович, кандидат физико-математических наук
Рахмонов Азизхон Боситхонович, доктор педагогических наук (Узбекистан)
Семахин Андрей Михайлович, кандидат технических наук
Сенцов Аркадий Эдуардович, кандидат политических наук
Сенюшкин Николай Сергеевич, кандидат технических наук
Султанова Дилшода Намозовна, доктор архитектурных наук (Узбекистан)
Титова Елена Ивановна, кандидат педагогических наук
Ткаченко Ирина Георгиевна, кандидат филологических наук
Федорова Мария Сергеевна, кандидат архитектуры
Фозилов Садриддин Файзуллаевич, кандидат химических наук (Узбекистан)
Яхина Асия Сергеевна, кандидат технических наук
Ячинова Светлана Николаевна, кандидат педагогических наук

Международный редакционный совет:

Айрян Заруи Геворковна, кандидат филологических наук, доцент (Армения)
Арошидзе Паата Леонидович, доктор экономических наук, ассоциированный профессор (Грузия)
Атаев Загир Вагитович, кандидат географических наук, профессор (Россия)
Ахмеденов Кажмурат Максutowич, кандидат географических наук, ассоциированный профессор (Казахстан)
Бидова Бэла Бертовна, доктор юридических наук, доцент (Россия)
Борисов Вячеслав Викторович, доктор педагогических наук, профессор (Украина)
Буриев Хасан Чутбаевич, доктор биологических наук, профессор (Узбекистан)
Велковска Гена Цветкова, доктор экономических наук, доцент (Болгария)
Гайич Тамара, доктор экономических наук (Сербия)
Данатаров Агахан, кандидат технических наук (Туркменистан)
Данилов Александр Максимович, доктор технических наук, профессор (Россия)
Демидов Алексей Александрович, доктор медицинских наук, профессор (Россия)
Досманбетов Динар Бакбергенович, доктор философии (PhD), проректор по развитию и экономическим вопросам (Казахстан)
Ешиев Абдыракман Молдоалиевич, доктор медицинских наук, доцент, зав. отделением (Кыргызстан)
Жолдошев Сапарбай Тезекбаевич, доктор медицинских наук, профессор (Кыргызстан)
Игисинов Нурбек Сагинбекович, доктор медицинских наук, профессор (Казахстан)
Кадыров Кутлуг-Бек Бекмурадович, доктор педагогических наук, и.о. профессора, декан (Узбекистан)
Каленский Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор (Россия)
Козырева Ольга Анатольевна, кандидат педагогических наук, доцент (Россия)
Колпак Евгений Петрович, доктор физико-математических наук, профессор (Россия)
Кошербаева Айгерим Нуралиевна, доктор педагогических наук, профессор (Казахстан)
Курпаяниди Константин Иванович, доктор философии (PhD) по экономическим наукам (Узбекистан)
Куташов Вячеслав Анатольевич, доктор медицинских наук, профессор (Россия)
Кыят Эмине Лейла, доктор экономических наук (Турция)
Лю Цзюань, доктор филологических наук, профессор (Китай)
Малес Людмила Владимировна, доктор социологических наук, доцент (Украина)
Нагервадзе Марина Алиевна, доктор биологических наук, профессор (Грузия)
Нурмамедли Фазиль Алигусейн оглы, кандидат геолого-минералогических наук (Азербайджан)
Прокопьев Николай Яковлевич, доктор медицинских наук, профессор (Россия)
Прокофьева Марина Анатольевна, кандидат педагогических наук, доцент (Казахстан)
Рахматуллин Рафаэль Юсупович, доктор философских наук, профессор (Россия)
Ребезов Максим Борисович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Россия)
Сорока Юлия Георгиевна, доктор социологических наук, доцент (Украина)
Султанова Дилшода Намозовна, доктор архитектурных наук (Узбекистан)
Узаков Гулом Норбоевич, доктор технических наук, доцент (Узбекистан)
Федорова Мария Сергеевна, кандидат архитектуры (Россия)
Хоналиев Назарали Хоналиевич, доктор экономических наук, старший научный сотрудник (Таджикистан)
Хоссейни Амир, доктор филологических наук (Иран)
Шарипов Аскар Калиевич, доктор экономических наук, доцент (Казахстан)
Шуклина Зинаида Николаевна, доктор экономических наук (Россия)

На обложке изображен *Петр Леонидович Капица* (1894–1984), советский физик, инженер и инноватор.

Петр Леонидович Капица родился в Кронштадте в дворянской семье. Его отец отвечал за возведение кронштадтских крепостных сооружений и дослужился до чина генерал-майора, а мать была известным педагогом, знатоком русского фольклора.

С детства Петр проявлял смекалку в технических вопросах и интерес к мудреным конструкциям. В 1912 году 18-летний Петр Капица с отличием окончил реальное училище. Отсутствие гимназического аттестата закрыло ему доступ в университет, и он поступил в Политехнический институт.

Главную роль в формировании физических идей Петра Капицы сыграл профессор Абрам Иоффе. Он привлек способного ученика к работе в лаборатории, привил навыки исследовательской деятельности.

Студенческие годы Капицы совпали с переломными моментами в истории России. Первая мировая война застала Петра Леонидовича в Шотландии. Только в конце 1914 года он смог вернуться в Россию, чтобы тут же отправиться на фронт. В январе — марте 1915 года Капица служил под Варшавой в составе добровольного санитарного отряда в качестве водителя, но в апреле того же года вернулся в Петроград и продолжил учебу.

Летом 1916 года по семейным делам Капица совершил поездку в Китай и Японию. В том же году в печати появились первые публикации молодого ученого: «Инерция электронов в амперовых молекулярных токах» и «Приготовление волластоновских нитей». По методу Капицы их тут же изготовили для лаборатории Иоффе. В 1917–1918 годах Капица принимал деятельное участие в образовании физико-механического факультета при Политехническом институте и Физико-технического института (ФТИ) при Академии наук. Несмотря на тяготы Гражданской войны, в сентябре 1919 года молодой человек окончил институт и получил специальность инженера-электрика. Он устроился научным сотрудником в ФТИ и параллельно начал преподавать в родном институте.

В апреле 1921 года Петр Капица вошел в состав делегации, собранной для восстановления научных связей с Европой. Летом он прибыл в Лондон, посетил знаменитую Кавендишскую лабораторию. По просьбе Иоффе Капицу приняли туда стажером. С Кавендишской лабораторией связаны следующие 13 лет жизни Капицы. Первым лабораторным исследованием Капицы стало измерение потери энергии α -частицы в конце ее движения. Вскоре Петр Леонидович стал доктором философии Кембриджского университета, а также членом Тринити-колледжа. В то же время Академия наук СССР присвоила Капице степень доктора физико-математических наук и избрала его членом-корреспондентом.

В 1930 году ученый стал профессором-исследователем Лондонского королевского общества, специально для

него построили современную лабораторию. Аппараты Капицы по сжижению водорода и гелия заставили пересмотреть сами принципы сжижения газов в промышленности, в первую очередь кислорода. Основное направление научной деятельности Капицы в 1930-е годы — природа жидкого гелия. В результате экспериментов в пределах критических температур ему удалось обнаружить потерю вязкости и появление сверхтекучести гелия. Опираясь на эти данные, Лев Ландау впоследствии разработал квантовую теорию жидкого гелия.

В 1934 году Капица по традиции приехал на родину, чтобы прочесть курс лекций и повидать близких, однако вернуться в Лондон не смог: по личному распоряжению Сталина ученого решили не выпускать из страны. Спустя полгода ученый принял предложение советского правительства о сотрудничестве. Он согласился возглавить специально учрежденный под его исследования Институт физических проблем (ИФП), который и стал местом работы Капицы на многие десятилетия. Разработанные Капицей методы сжижения воздуха стали революционными в разделении воздуха на азот, кислород и инертные газы.

В январе 1939 года Капицу избрали действительным членом Академии наук СССР. Во время Великой Отечественной войны он входил в Научно-технический совет при Государственном комитете обороны.

В августе 1945 года Капица получил назначение в Спецкомитет по разработке атомной бомбы, но, не сработавшись с председателем комитета Берией, вскоре попросил освободить его от работы. Этот поступок вызвал недовольство Сталина. Петра Леонидовича освободили от должности директора ИФП, а в 1950 году уволили из МГУ.

Годы опалы Капица переживал на своей подмосковной даче на Николиной горе. Он организовал небольшую лабораторию из двух комнат, кухни и гаража, прозванную им и его коллегами «Избой физических проблем». Ученый разрабатывал мощные СВЧ-генераторы и с их помощью получал стабильный плазменный шнур. Физика плазмы и электроника больших мощностей оставались приоритетной темой исследований Капицы последующие три десятилетия.

В январе 1955 года Капицу восстановили в должности директора ИФП, и этот пост он занимал до самой смерти. В конце жизни заслуги Петра Леонидовича Капицы получили наивысшее признание в научном мире: в 1978 году ему присудили Нобелевскую премию по физике. В числе наград ученого — шесть орденов Ленина, Сталинская премия, Орден Трудового Красного Знамени.

22 марта 1984 года Капица почувствовал себя плохо, и его увезли в больницу, где диагностировали инсульт. 8 апреля, не приходя в сознание, Капица скончался. Похоронен ученый в Москве, на Новодевичьем кладбище.

*Информацию собрала ответственный редактор
Екатерина Осянина*

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

Данилина П. А.

Комплексный математический анализ задачи о разорении игрока: стохастическая динамика и предельные состояния в системах с поглощением 1

Сулейманов Р. Р.

Модель Таллока в анализе активности спортсменов в игровых видах спорта 4

ХИМИЯ

Ahmadov J. R.

Molecular design of hydrotreating catalyst: application and efficiency of ecologically clean REE-POM10

Курбанова Д. М.

Эффективный метод получения каустической соды12

Курбанова Д. М.

Электролитический метод получения каустической соды и соляной кислоты14

Наранбаатар Г.

Влияние типа восстановителя и pH среды на синтез и свойства хитозан-медных нанокмпозитов17

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Kiizbaev B. U.

Assessment of the theoretical small hydropower potential of the Alamedin River (Kyrgyz Republic)23

Рузов М. О.

Аэрогелевые материалы: классификация, сферы применения, анализ рынка27

Рузов М. О.

Оптимизация систем теплозащиты трубопроводов31

Семенов Н. Г.

Влияние условий твердения и защитного покрытия на свойства дорожного бетона34

Терещатов А. Ю.

Сравнительный анализ технических характеристик телеметрической приемной станции «Источник-М» и МРТК-4А, используемых в настоящее время на космодроме Плесецк37

Шибеев Я. А.

Сравнительный обзор нормативных требований к расчету усиления железобетонных конструкций композитными материалами по российским и зарубежным стандартам41

АРХИТЕКТУРА, ДИЗАЙН И СТРОИТЕЛЬСТВО

Егоров А. Р.

Геометрическая нелинейность при расчетах внецентренно сжатых железобетонных элементов45

Задорожная О. А., Шиманская М. С.

Применение робототехники в строительной отрасли49

Старыгина И. Д.

Совершенствование расчета монолитной плиты перекрытия с пустотообразователями прямоугольной формы54

Черданцева А. А.

Практическая применимость физически-линейного расчёта при оценке прогрессирующего обрушения на примере локального удаления колонны59

Чернега И. С.

Исследование напряженно-деформированного состояния стальной двутавровой балки в зоне анкеровки преднапряжённой затяжки61

Чэн Цзюань

Исследование влияния стальной фибры на механические свойства и прочность высокопрочного бетона69

МАТЕМАТИКА

Комплексный математический анализ задачи о разорении игрока: стохастическая динамика и предельные состояния в системах с поглощением

Данилина Полина Александровна, студент
Оренбургский государственный медицинский университет

Статья посвящена фундаментальному исследованию классической задачи о разорении игрока в рамках современной теории стохастических процессов. В работе детально декомпозируется математический аппарат, лежащий в основе одномерных случайных блужданий на конечных и бесконечных интервалах с поглощающими экранами. Проведен строгий аналитический вывод уравнений вероятности разорения для различных условий симметрии процесса, а также исследованы характеристики времени до достижения критического состояния. Автор расширяет классическую модель, интегрируя в неё анализ влияния волатильности шага и асимметрии начального капитала. В работе доказано, что при наличии отрицательного математического ожидания или существенного превосходства ресурсов оппонента вероятность коллапса системы стремится к единице, что делает неэффективными любые стратегии управления ставками.

Ключевые слова: стохастический анализ, случайные блуждания, марковские цепи, вероятность разорения, математическое ожидание, поглощающие барьеры, разностные уравнения, теория игр, риск-менеджмент.

Comprehensive Mathematical Analysis of the Gambler's Ruin Problem: Stochastic Dynamics and Limiting States in Systems with Absorption

The article is devoted to a fundamental study of the classic gambler's ruin problem within the framework of modern stochastic process theory. The mathematical apparatus underlying one-dimensional random walks on finite and infinite intervals with absorbing barriers is decomposed in detail. A rigorous analytical derivation of ruin probability equations for various process symmetry conditions is carried out, and the characteristics of the time to reach a critical state are investigated. The author expands the classical model by integrating into it an analysis of the influence of step volatility and initial capital asymmetry. The paper proves that in the presence of negative mathematical expectation or significant superiority of the opponent's resources, the probability of system collapse tends to unity, which makes any betting management strategies ineffective.

Keywords: stochastic analysis, random walks, Markov chains, ruin probability, mathematical expectation, absorbing barriers, difference equations, game theory, risk management.

Исследование стохастических процессов, связанных с потерей ресурсов в условиях неопределенности, представляет собой одну из наиболее актуальных задач прикладной математики. Задача о разорении игрока, возникшая на стыке комбинаторики и азартных игр, сегодня трансформировалась в мощный инструмент моделирования устойчивости сложных систем. Исторически первые упоминания данной проблематики восходят к переписке Блеза Паскаля и Пьера Ферма в XVII веке, однако строгая математическая формализация была осуществлена в трудах Христиана Гюйгенса, Якоба Бернулли и Абрахама де Муавра. В современной научной парадигме эта задача служит эталонным примером для демонстрации свойств марковских цепей и процессов с поглощением. Основной целью работы является не только определение вероятности достижения терминального состояния, но и анализ параметров выживаемости системы в условиях нарастающей энтропии.

Математически процесс описывается как случайное блуждание на целочисленном отрезке от 0 до M . Пусть начальное положение системы задано как n , где $0 < n < M$. На каждом шаге система переходит в состояние $n+1$ с вероятностью p и в состояние $n-1$ с вероятностью $q = 1 - p$. Точки 0 и M являются поглощающими барьерами: достижение точки 0 интерпретируется как разорение игрока, достижение точки M — как достижение целевого выигрыша и прекращение процесса. Данная модель является классическим примером однородной марковской цепи, где матрица переходных веро-

ятностей имеет трёхдиагональную структуру, характерную для процессов гибели и размножения. Анализ вероятности разорения P_n основывается на решении линейного однородного разностного уравнения второго порядка: $P_n = p \cdot P_{n+1} + q \cdot P_{n-1}$. Характеристическое уравнение данной системы имеет корни $r_1 = 1$ и $r_2 = q/p$. В зависимости от соотношения p и q возникают два принципиально разных математических режима функционирования системы.

В условиях симметричного блуждания, когда $p = q = 0.5$ и математическое ожидание каждого шага равно нулю, вероятность разорения линейно зависит от удаленности от барьеров: $P_n = 1 - n/M$. Этот результат парадоксален с точки зрения интуиции: даже в абсолютно честной игре, где шансы на каждом шаге равны, итоговый исход предопределен исключительно масштабом ресурсов. Если противник обладает неограниченным капиталом, то при M стремящемся к бесконечности вероятность разорения игрока равна 1. Это математическое доказательство того, что любой участник с ограниченным ресурсом обречен на крах при бесконечном повторении честного испытания против системы, обладающей значительно большим резервом. Данный вывод имеет прямое отношение к анализу конкуренции малого бизнеса с крупными корпорациями, обладающими существенно большей финансовой подушкой.

Таблица 1. Вероятностные характеристики выживания при симметричном распределении шансов ($p = 0.5$)

Начальный капитал (n)	Целевой капитал (M)	Вероятность разорения	Коэффициент риска	Относительная устойчивость
100	200	0.500	1.00	Средняя
100	1000	0.900	9.00	Низкая
100	10000	0.990	99.00	Критическая
500	1000	0.500	1.00	Средняя
900	1000	0.100	0.11	Высокая

При переходе к несимметричным моделям, когда p не равно q , что характерно для реальных экономических процессов, вероятность разорения описывается экспоненциальной зависимостью: $P_n = [(q/p)^M - (q/p)^n] / [(q/p)^M - 1]$. Здесь вводится понятие преимущества системы. Если p меньше q , то математическое ожидание шага отрицательно, и система испытывает постоянный дрейф к барьеру 0. В этих условиях вероятность разорения крайне быстро стремится к единице даже при очень малых значениях разности $q - p$. Например, при преимуществе казино всего в 1 % и начальном капитале, равном половине целевой суммы, вероятность разорения превышает 0.95 при достаточно длительной серии испытаний. Это объясняет, почему игорный бизнес является устойчивым при наличии даже минимальной маржи: закон больших чисел неумолимо работает против игрока.

Особого внимания заслуживает анализ среднего времени до разорения, то есть математического ожидания длительности процесса E_n . Для несимметричного случая формула принимает вид: $E_n = [n - M \cdot (1 - (q/p)^n) / (1 - (q/p)^M)] / (q - p)$. Этот параметр критически важен для понимания динамики деградации сложных систем. Он показывает, что при наличии отрицательного тренда время жизни системы сокращается не линейно, а гораздо быстрее, что требует от управляющих субъектов немедленного вмешательства при первых признаках стохастического дрейфа. Для симметричного случая формула упрощается до квадратичной зависимости: $E_n = n \cdot (M - n)$. Из неё следует, что максимальная продолжительность процесса достигается при $n = M/2$ и составляет M в квадрате делённое на 4.

Таблица 2. Динамика вероятности разорения при наличии асимметрии шансов ($M = 100$)

Вероятность выигрыша (p)	Преимущество системы (q-p)	P_n при n=50	P_n при n=10	Среднее время жизни E_n (шагов)
0.49	0.02	0.8808	0.9817	около 2400
0.48	0.04	0.9820	0.9996	около 1200
0.45	0.10	0.9999	около 1.0000	около 500
0.40	0.20	около 1.0000	около 1.0000	около 250

В контексте управления рисками часто рассматриваются различные стратегии варьирования ставок, такие как системы прогрессии. Математический анализ в рамках задачи о разорении доказывает теорему о невозможности выигрышной стратегии: если каждый отдельный ход имеет отрицательное или нулевое математическое ожидание, то никакая последовательность ставок не может сделать суммарное ожидание положительным. Более того, агрессивные стратегии типа Мартингейла, предполагающие удвоение ставки после проигрыша, лишь увеличивают дисперсию процесса, что при наличии верхнего предела капитала приводит к ускоренному достижению поглощающего барьера 0.

Таким образом, единственным способом минимизации риска разорения в невыгодной игре является минимизация количества итераций, то есть «дерзкая игра». В выгодной же игре, когда p больше q , оптимальным является дробление капитала в соответствии с критерием Келли.

Таблица 3. Эффективность стратегий распределения ресурсов в стохастических системах

Стратегия	Механизм управления	Влияние на дисперсию	Риск разорения (при p меньше q)	Математический статус
Фиксированный лот	Постоянная ставка	Низкая	Высокий, но медленный	Консервативная
Мартингейл	Геометрическая прогрессия	Экстремальная	Критический, мгновенный	Катастрофическая
Дробная (Келли)	Процент от текущего капитала	Умеренная	Минимальный	Оптимальная
Сверхрисковая (All-in)	Разовая ставка всего банка	Максимальная	Зависит от p	Рациональная при p меньше 0.5

Расширяя область применения модели, можно рассмотреть процесс разорения как метафору потери функционального резерва в биологических и технических системах. В нейронауке активность нейронных ансамблей может быть описана как баланс между возбуждением и торможением. Если внешние факторы или дегенеративные процессы сдвигают этот баланс в сторону торможения, нейронная сеть начинает терять связи. При достижении критического порога происходит системный сбой. Математическая модель разорения позволяет рассчитать критическую массу ресурсов, необходимую для поддержания гомеостаза системы в условиях агрессивной внешней среды. Аналогично, в популяционной генетике задача о разорении описывает вероятность фиксации или элиминации мутантного аллеля в конечной популяции под действием случайного дрейфа генов.

Также стоит отметить поведение системы при M стремящемся к бесконечности, то есть при игре против бесконечного капитала. В этом случае вероятность разорения P_n равна 1 для всех p меньше или равно 0.5. Этот фундаментальный результат теории вероятностей объясняет устойчивость крупных корпораций и банков перед лицом мелких конкурентов: обладая бесконечным относительно малых агентов запасом прочности, большая система неизбежно поглощает ресурсы малых систем в ходе случайных рыночных флуктуаций. Единственной защитой малой системы является специализация, обеспечивающая локальное преимущество, то есть p больше 0.5, либо отказ от продолжения игры при достижении определенных порогов прибыли.

Цифровизация привела к созданию специализированных программных пакетов для анализа задачи о разорении. Среди них можно выделить библиотеку `actuar` в среде `R`, которая позволяет рассчитывать вероятность разорения для классической модели Крамера-Лундберга и её обобщений, включая модели с перестрахованием и инвестиционным доходом. `Python` с библиотеками `pymru` и `scipy` используется для симуляции случайных блужданий методом Монте-Карло и визуализации траекторий, что особенно важно при анализе немарковских обобщений, где аналитическое решение недоступно. `MATLAB` с пакетами `Financial Toolbox` и `Statistics Toolbox` остаётся востребованным в финансовом моделировании и актуарных расчётах благодаря встроенным функциям для калибровки параметров и построения поверхностей вероятности разорения.

Следует выделить риски, связанные с применением модели разорения игрока на практике. Можно отметить следующие аспекты. Во-первых, предположение о стационарности вероятностей p и q . В реальных системах параметры среды меняются во времени, что требует перехода к неоднородным марковским цепям или моделям с переключением режимов. Во-вторых, высокая чувствительность нелинейных показателей к шумам и артефактам исходных данных. Риск заключается в ложных выводах из-за недостаточной очистки эмпирических данных. В-третьих, математическая сложность и неоднозначность: разные алгоритмы расчёта одной и той же характеристики, например корреляционной размерности, могут давать разные результаты. В-четвёртых, отсутствие стандартизированных протоколов применения модели в клинической и экономической практике, что затрудняет сравнение результатов между разными исследовательскими центрами. В-пятых, игнорирование эффектов памяти и корреляций между испытаниями. Классическая модель предполагает независимость исходов, тогда как в реальных финансовых временных рядах наблюдается кластеризация волатильности.

В заключение следует отметить, что строгость математических выводов в задаче о разорении игрока делает её незаменимым инструментом для любого научного исследования, связанного со стохастикой. Статистическая неизбежность разорения в неблагоприятных условиях — это не гипотеза, а доказанный факт, вытекающий из свойств марковских процессов. Понимание этих механизмов позволяет формировать более устойчивые стратегии поведения в экономике, технике и медицине, переводя управление рисками с уровня интуиции на уровень точного математического расчёта.

Количественные методы анализа вероятности разорения позволяют обнаруживать докритические состояния задолго до наступления коллапса, что открывает возможности для превентивного вмешательства. Математические модели задачи о разорении обеспечивают новый уровень воспроизводимости исследований, так как они опираются на инвариантные характеристики динамики, а не на случайные особенности конкретной реализации.

Литература:

1. Боровков, А. А. Теория вероятностей / А. А. Боровков. — М.: Либроком, 2009. — 656 с.
2. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. — М.: Кнорус, 2010. — 664 с.
3. Гнеденко, Б. В. Курс теории вероятностей / Б. В. Гнеденко. — М.: Либроком, 2011. — 448 с.
4. Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. В 2-х томах / В. Феллер. — М.: Мир, 1984. — Т. 1. — 528 с.
5. Ширяев, А. Н. Вероятность / А. Н. Ширяев. — М.: МЦНМО, 2011. — 928 с.

Модель Таллока в анализе активности спортсменов в игровых видах спорта

Сулейманов Ринат Рустамович, студент

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (г. Москва)

В статье используется модель Таллока (contest success function), чтобы описать футбольный матч как динамическую конкуренцию за инициативу, где успех зависит от относительных усилий команд, а ресурсы ограничены и «поздние» минуты обходятся дороже из-за усталости. В такой постановке ужесточение учёта компенсированного времени трактуется как внешнее удлинение последнего отрезка матча (периода после 90-й минуты), что меняет выгоды от усилий в самом конце и может привести к смещению атакующей активности из интервала 75–90 минут в 90+. На данных топ-5 европейских лиг и Лиги чемпионов за сезоны 2019/20–2024/25 показано, что после реформы относительная интенсивность действий в 90+ выросла прежде всего по пасовым метрикам, связанным с продвижением мяча и давлением, тогда как по ударам устойчивого эффекта не выявляется, при этом сдвиг сильнее у проигрывающих команд и при близком счёте, что соответствует логике модели, согласно которой дополнительные минуты особенно ценны, когда исход ещё можно изменить.

Ключевые слова: модель Таллока, contest success function, футбол, компенсированное время, распределение усилий, difference-in-differences.

Введение

Модель Таллока (contest success function) описывает конкуренцию, в которой важен не абсолютный объём затраченных ресурсов, а их соотношение у соперников. Участник может повысить вероятность успеха, если наращивает усилия, но решающим остаётся не сам по себе уровень активности, а преимущество относительно другой стороны. Поэтому эта модель хорошо подходит для анализа ситуаций, где есть ценный приз и издержки борьбы за него.

В экономике такой подход чаще всего используют для описания «борьбы за приз» при ограниченных ресурсах. В классической модели рент-сикинга — борьбы групп интересов за выгодные политические решения — он показывает, что затраты участников на конкуренцию могут быть высокими и социально неэффективными: ресурсы уходят не на создание новой стоимости, а на перераспределение существующей [4]. Позднее литература о contest-моделях подробно описала, как параметры конкурса влияют на равновесные усилия и интенсивность соперничества [1]. Близкая логика лежит и в основе моделей турниров на рынке труда: если вознаграждение зависит не от абсолют-

ного результата, а от места в рейтинге, разрыв в призах напрямую влияет на стимулы работников [2]. В спортивной экономике этот же взгляд помогает объяснить, почему изменения правил, формата соревнования или относительной ценности отдельных игровых эпизодов могут менять стратегию участников и распределение усилий по времени [3].

В этой статье я предлагаю ещё одну область применения модели Таллока — анализ распределения активности футбольных команд по времени внутри матча. В футболе основное время матча длится 90 минут (два тайма по 45 минут), но из-за пауз (травмы, замены и т. д.) судья добавляет в конце тайма компенсированное время. Отрезок после отметки 90 минут обычно записывают как «90+» и именно он часто становится «финальным штурмом», когда команды пытаются либо удержать результат, либо спасти матч. В качестве естественного эксперимента я использую реформу учёта компенсированного времени: начиная с сезона 2023/24 в ведущих лигах судьи в среднем стали добавлять больше минут во втором тайме, поэтому период 90+ заметно удлинился. Это может менять поведение команд в концовке: когда добавлено

всего несколько минут, решения чаще становятся более прямыми и рискованными, а когда времени больше, появляется возможность выстраивать давление более последовательно — дольше контролировать мяч, возвращать владение и повторно заходить в атаку.

Дальше я применяю эту логику к футбольному матчу. Реформу учёта компенсированного времени можно рассматривать как удлинение последнего, наиболее важного отрезка игры. Если команды распределяют ограниченные силы по всему матчу и не могут одинаково прибавлять в каждой минуте, то более длинный период после 90-й минуты должен смещать активность именно в пользу этой части матча. Такой сдвиг, вероятно, будет особенно заметен там, где одна удачная атака может изменить исход, — у проигрывающих команд и при минимальной разнице в счёте. Ниже я сначала формализую эту интуицию в модели, а затем проверяю её на данных ведущих европейских лиг.

Модель и предсказания

В этом разделе я формализую ту же интуицию в терминах стандартной модели Таллока (contest success function). Для моей задачи важно её простое свойство: успех определяется не абсолютным уровнем усилия, а его соотношением с усилием соперника. В футболе это удобно трактовать как борьбу за инициативу и опасные эпизоды. Если одна команда действует активнее, она чаще продвигает мяч, чаще закрепляется в финальной трети и в среднем получает больше возможностей создать момент. Но такая активность требует ресурсов: играть на максимуме весь матч невозможно, потому что усталость накапливается, а в концовке любое дополнительное усилие обычно обходится дороже.

Рассмотрим матч как набор периодов $k = 1, \dots, K$ с длительностями $\Delta t_k > 0$ (в минутах). В каждом периоде команда $i \in \{H, A\}$ выбирает интенсивность атакующей активности $e_{i,k} \geq 0$. Под $e_{i,k}$ я понимаю «общую атакующую активность» в широком смысле: насколько команда готова продвигать мяч вперёд, поддерживать давление, принимать более рискованные решения и чаще доводить владения до опасных зон. В каждом периоде команды соревнуются за поток потенциально опасных ситуаций, и доля этого потока, которую «получает» команда i в периоде k , задаётся функцией Таллока:

$$\phi_{i,k} = \frac{e_{i,k}^r}{e_{H,k}^r + e_{A,k}^r}, r >$$

Если команды действуют одинаково активно, то $\phi_{i,k} = 1/2$. Если активнее действует одна команда, её доля $\phi_{i,k}$ увеличивается. Параметр r отражает, насколько сильно относительное преимущество в активности превращается в преимущество в «инициативе»: при более высоком r разница в активности сильнее влияет на результат периода. Пусть «ёмкость» периода по возможностям пропорциональна его длительности:

$$v_k = \gamma \Delta t_k, \gamma > 0.$$

Тогда ожидаемый вклад периода k в итоговую «инициативу» команды можно описать величиной $v_k \phi_{i,k}$.

Ключевое отличие постановки в этой статье от более простых вариантов состоит в том, что ограничение действует на уровне всего матча, а не отдельно по периодам. Интенсивная игра в начале делает последние минуты дороже, потому что усталость накапливается. Это фиксируется общим расходом ресурса (энергии) по матчу:

$$E_i = \sum_{k=1}^K a_k e_{i,k} \Delta t_k,$$

где веса a_k возрастают к концу игры,

$$a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_K,$$

то есть одинаковая «единица активности» в позднем периоде стоит дороже, чем в раннем. Усталость задаётся выпуклой функцией издержек от суммарного расхода ресурса; для наглядности я использую простую квадратичную форму с бесплатным запасом B_0 :

$$C(E_i) = \begin{cases} \frac{\alpha}{2} (E_i - B_0)^2, & E_i > B_0, \\ 0, & E_i \leq B_0, \end{cases} \alpha > 0.$$

Эта спецификация нужна не для физиологической точности, а чтобы формально зафиксировать две интуиции: ресурсы ограничены на уровне всей игры, и перебор усилий становится всё дороже. Полезность команды можно записать как

$$U_i = \sum_{k=1}^K v_k \phi_{i,k} - C(E_i).$$

Важное следствие этой логики состоит в том, что удлинение матча не обязано вести к росту активности в минуту. Если горизонт становится длиннее, команда вынуждена распределять ограниченный ресурс на большее число минут, и средняя интенсивность в минуту может снижаться. Поэтому центральный объект интереса здесь — не «стало ли больше действий в конце вообще», а изменилось ли распределение активности внутри концовки.

Реформа учёта компенсированного времени трактуется как внешнее изменение правил, которое увеличивает длительность именно последнего отрезка второго тайма. В терминах модели это означает, что после реформы меняется только длительность последнего периода:

$$\Delta t_K^1 = \Delta t_K^0 + \delta, \delta > 0, \Delta t_k^1 = \Delta t_k^0 \text{ для } k < K,$$

а значит увеличивается общая длительность матча

$$T = \sum_{k=1}^K \Delta t_k. \text{ Интерпретационно последний период соот-}$$

ветствует интервалу 90+ (компенсированное время второго тайма), а предпоследний — интервалу 75–90 минут основного времени. Реформа удлиняет именно 90+: «концовка» становится длиннее при неизменных базовых правилах игры. Из-за общего ресурсного ограничения удлинение матча создаёт компромисс: появляется больше минут, в которых поздняя активность может окупаться, но общий ресурс нельзя увеличить пропорционально, по-

этому часть активности приходится переносить между периодами.

Отсюда следует основное предсказание: после реформы относительная атакующая активность в интервале 90+ должна вырасти по сравнению с интервалом 75–90. Под «относительной» я имею в виду сравнение двух отрезков внутри концовки: в данных это проявляется как рост разницы между интенсивностью действий в 90+ и в 75–90 после реформы. Интуиция проста: реформа делает последний отрезок длиннее, и у команды появляется больше времени, чтобы «дожимать» соперника именно после 90-й минуты; при ограниченных ресурсах оптимальная реакция состоит не в том, чтобы прибавить одинаково везде, а в том, чтобы сдвинуть часть активности в период, который стал важнее.

Для интерпретации неоднородностей важно учесть, что ценность поздней активности зависит от ситуации на табло. Когда команда проигрывает, дополнительные минуты в самом конце особенно важны: это дополнительное время, чтобы организовать давление и попытаться сравнять счёт. Когда разница в счёте минимальна, цена позднего эпизода высока для обеих сторон. Чтобы отразить это в модели, достаточно допустить, что ценность инициативы в последнем периоде зависит от состояния матча s и выше в ситуациях высокой срочности, формально это можно записать как изменение веса последнего периода:

$$U_i^{(s)} = \sum_{k=1}^{K-1} v_k \phi_{i,k} + q_s v_K \phi_{i,K} - C(E_i), q_s > 0,$$

где q_s выше для статуса «проигрывает» и для близкого счёта (разница в один мяч). Тогда удлинение последнего периода становится особенно ценным именно в таких состояниях. Это даёт два дополнительных предсказания. Перенос активности в пользу 90+ после реформы должен быть сильнее у проигрывающих команд, чем у команд, которых текущий счёт устраивает. Перенос активности в пользу 90+ после реформы должен быть сильнее в матчах с разницей в один мяч, чем в матчах с более крупной разницей.

Данные и показатели активности

В эмпирической части я использую матчи топ-5 европейских лиг и Лиги чемпионов за сезоны 2019/20–2024/25. Для каждого матча доступны поминутные записи игровых событий, поэтому можно точно определить, что делала команда в конкретный момент игры и при каком счёте это происходило. В дальнейшем я сосредотачиваюсь только на концовке второго тайма и сравниваю два отрезка: интервал 75–90 минут и компенсированное время после 90-й минуты.

Атакующую активность я измеряю четырьмя показателями. Удары по воротам отражают завершение атак. Прогрессивные передачи и входы в финальную треть показывают, насколько команда продвигает мяч к воротам соперника и закрепляется в опасных зонах. Кроссы, напротив, характеризуют более прямой способ доставки

мяча в штрафную. Такое разделение важно, потому что реакция на более длинную концовку может проявляться не сразу в росте ударов, а сначала в том, как команда двигает мяч вперёд и поддерживает давление.

Ключевой технический вопрос здесь — что именно сравнивать. После реформы сам отрезок 90+ стал длиннее, поэтому простое сопоставление количества действий было бы некорректным. По этой причине я работаю не с абсолютным числом событий, а с их интенсивностью. Для каждого показателя учитывается экспозиция: сколько минут команда фактически провела в соответствующем отрезке концовки и в соответствующем состоянии счёта. Затем события переводятся в темп — например, в число действий на 15 минут. Благодаря этому сравнение между 75–90 и 90+ показывает изменение поведения команд, а не механический эффект более длинного компенсированного времени.

Эмпирическая стратегия

Задача эмпирического анализа здесь не сводится к тому, чтобы показать, что после реформы матчи стали длиннее. Важнее понять, изменилось ли поведение команд именно в самой концовке: стали ли они использовать компенсированное время второго тайма иначе, чем последние минуты основного времени.

Поэтому в центре анализа два отрезка — 75–90 минут и 90+. Ещё до реформы они не были одинаковыми: добавленное время и раньше часто проходило в более напряжённом темпе. Поэтому меня интересует усилился ли после реформы разрыв между этими интервалами в пользу 90+. Если да, это можно трактовать как перенос части активности в самый конец матча.

Все оценки читаются как процентное изменение интенсивности действий в 90+ относительно интервала 75–90. Помимо среднего эффекта, я отдельно рассматриваю две ситуации, где такой сдвиг должен быть особенно заметен: когда команда к концу матча проигрывает и когда счёт остаётся близким. В обоих случаях дополнительная минута потенциально имеет более высокую цену, потому что исход встречи всё ещё можно изменить.

Отдельно я оцениваю эффект для разных показателей атакующей игры. Это позволяет понять, на каком именно уровне проявляется адаптация к более длинной концовке: в том, как команды продвигают мяч и закрепляются у чужих ворот, или уже в том, как они завершают атаки ударами.

Результаты

Главный результат статьи состоит в том, что после реформы команды стали иначе распределять атакующую активность внутри концовки. В частности, после реформы команды стали активнее действовать именно в отрезке 90+ по сравнению с последними 15 минутами основного времени (75–90), и этот сдвиг лучше всего проявляется

в показателях, связанных с продвижением мяча и созданием давления у чужих ворот. Если смотреть на пассивные метрики, то картина получается довольно ровной и устойчивой. Интенсивность прогрессивных передач в 90+ относительно 75–90 после реформы увеличивается примерно на 8 %. Почти такой же рост наблюдается для входов в финальную треть (около 7–8 %). Для кроссов эффект ещё сильнее — порядка 12 %. Простыми словами, «длинный 90+» сопровождается тем, что команды чаще доводят мяч до опасных зон и чаще доставляют его в штрафную именно в добавленное время. Это хорошо укладывается в интуицию модели: когда концовка становится длиннее, у команд появляется больше смысла поддерживать давление до самого конца, а не пытаться решить всё раньше.

На уровне ударов результат другой. Сам по себе отрезок 90+ и до реформы является пиковым по ударам: в добавленное время команды бьют существенно чаще,

чем в 75–90. Однако дополнительного устойчивого роста ударов именно из-за реформы (то есть роста «сверх обычного пика») в базовой спецификации не видно. Важно правильно понять, что это означает. Это не значит, что команды «не реагируют» на реформу. Скорее реакция проявляется не в том, что они начинают немедленно чаще завершать атаки ударами, а в том, что они по-другому выстраивают давление: чаще продвигают мяч вперёд, чаще входят в финальную треть и чаще доставляют мяч в штрафную. Удары — наиболее «неровный» показатель: на него влияет не только интенсивность давления, но и то, как соперник защищается, насколько часто удаётся создать позицию под удар, насколько команды готовы завершать атаку при первом же полумоменте. Поэтому отсутствие чёткого эффекта по ударам не противоречит идее перераспределения усилий, а скорее указывает на то, что адаптация происходит на более ранних стадиях атаки.

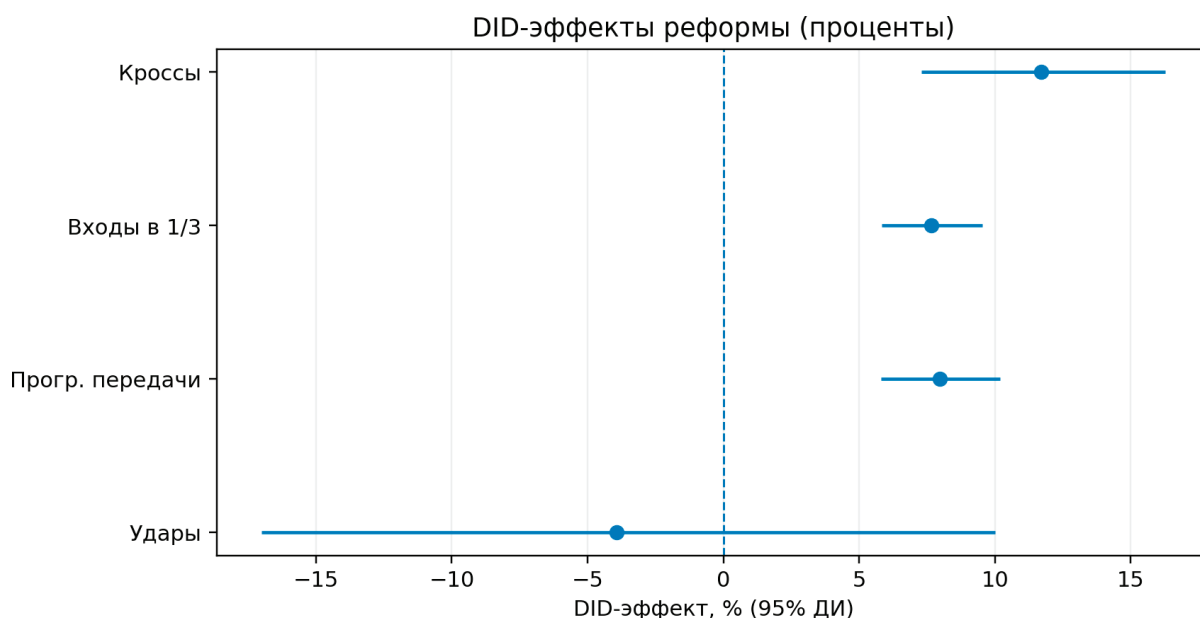


Рис. 1. Базовые оценки эффекта реформы для основных атакующих метрик в 90+ относительно интервала 75–90

Дальше важно понять, кто именно сильнее использует реформу. Когда я отдельно выделяю статус команды по счёту, становится видно, что сдвиг в пользу 90+ особенно выражен у проигрывающих. Это естественно: проигрывающей стороне нужно отыгрываться, и каждая дополнительная минута в конце игры повышает её шанс довести атаку до опасной стадии. В данных это проявляется так, что у проигрывающих команд после реформы заметнее растут показатели продвижения мяча и давления в 90+. При этом даже здесь нет устойчивого скачка по ударам: проигрывающая команда, по-видимому, дольше держит соперника под давлением, чаще возвращает мяч в опасные зоны и больше нагружает штрафную, но конверсия этого давления в дополнительные удары остаётся менее стабильной величиной.

Похожая логика работает и для близкого счёта. В матчах, где разница минимальна, эффекты реформы

по пассивным метрикам усиливаются: перенос активности в пользу 90+ выражен сильнее, чем в ситуациях с более комфортным счётом. Особенно ярко это видно по кроссам: команды в самом конце чаще переходят к прямой доставке мяча в штрафную, то есть используют наиболее «простую» и массовую технологию давления, когда времени мало, а цена эпизода высока. По ударам и здесь нет такого же устойчивого усиления, что снова говорит в пользу тактической интерпретации: команды перестраивают структуру давления и способы доведения мяча до опасных зон, но это не обязательно превращается в пропорциональный рост числа ударов.

В целом все результаты складываются в одну связную картину. Реформа увеличила длительность последнего периода матча, и команды стали использовать этот отрезок активнее относительно 75–90. Сдвиг наиболее заметен там, где дополнительная минута в конце особенно важна:

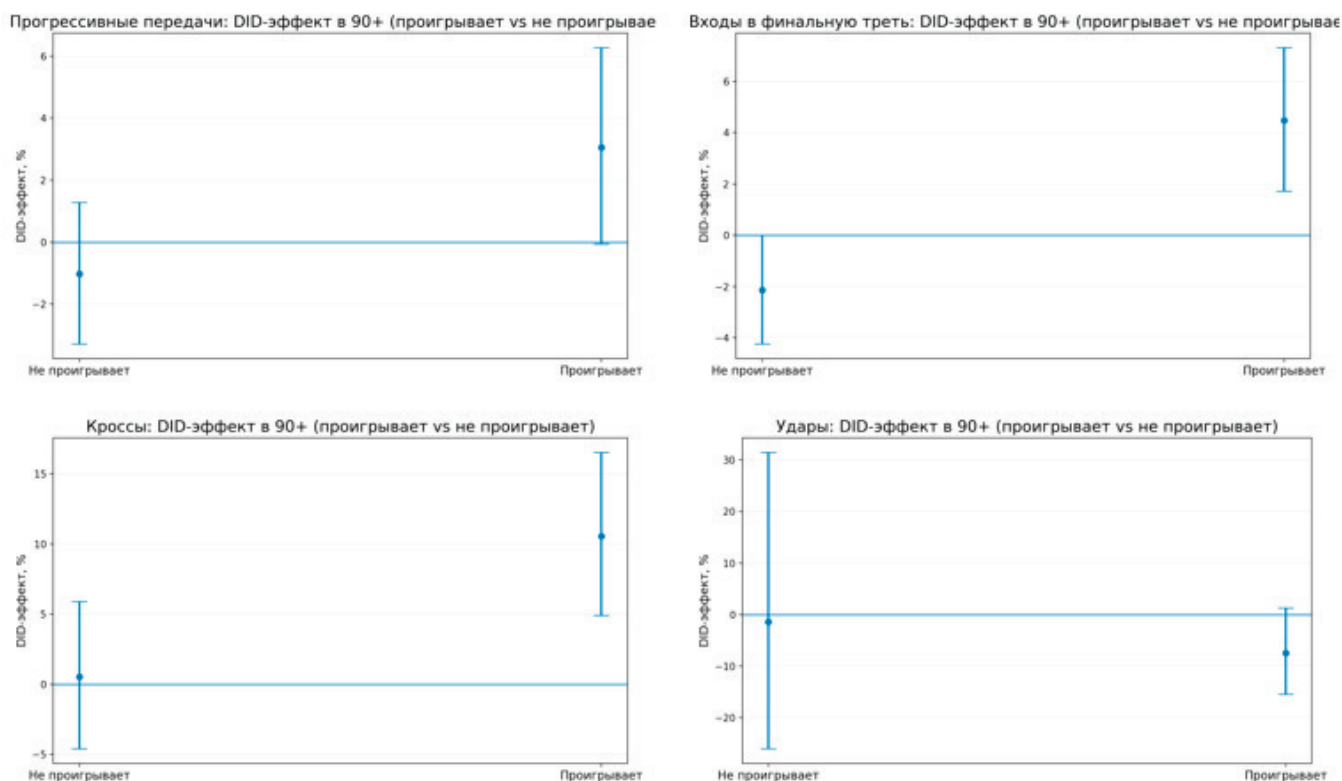


Рис. 2. Гетерогенность эффекта реформы по текущему статусу команды: прогрессивные передачи, входы в финальную треть, кроссы и удары

у проигрывающих и при близком счёте. Это хорошо соответствует интуиции модели: при ограниченных ресурсах команда не может просто «прибавить везде», поэтому она выбирает, когда именно выгоднее тратить усилия. Удлинение 90+ делает поздние усилия более оправданными, и в данных это проявляется прежде всего как перераспределение атакующего давления в пользу компенсированного времени, а не как механический рост числа ударов.

Заключение

В этой статье я показал, что модель Таллока можно использовать для анализа поведения команд внутри спортивной игры. В футболе эта идея особенно естественна: команды конкурируют за инициативу и опасные моменты, а решающим оказывается не абсолютный объём активности, а то, насколько она выше или ниже активности соперника в конкретный отрезок времени. При этом у команд есть жёсткое ограничение по ресурсам: играть на максимуме весь матч невозможно, поэтому усилия приходится распределять по времени.

Реформа учёта компенсированного времени даёт редкую возможность проверить такую логику на данных. Сама игра не изменилась, но изменилась длительность концовки: в среднем стало больше минут после 90-й, то есть дольше длится именно тот период, где цена одной удачной атаки особенно высока. С точки зрения модели это означает, что поздние усилия «окупаются» на более

длинном горизонте, а значит, у команд появляется стимул перестроить концовку и сместить часть давления в добавленные минуты.

Эмпирические результаты подтверждают это предсказание для метрик, которые отражают построение давления. После реформы относительная интенсивность прогрессивных передач, входов в финальную треть и кроссов в 90+ заметно выросла по сравнению с интервалом 75–90. Иными словами, команды стали активнее продвигать мяч к воротам и чаще доставлять его в опасные зоны именно в добавленные минуты. При этом для ударов устойчивого эффекта не выявляется: хотя 90+ и без реформы является «пиковым» отрезком по ударам, после реформы разрыв между 90+ и 75–90 по ударам статистически существенно не меняется. Такой результат хорошо согласуется с интерпретацией модели: адаптация проявляется прежде всего в том, как команды организуют давление и доводят мяч до опасных зон, а не в механическом увеличении числа финальных попыток. Это также может означать, что дополнительное время позволяет дольше «держать атаку живой» и повышать вероятность хорошего момента, но не обязательно увеличивает количество ударов как таковых.

Дополнительные разрезы показывают, что общий эффект распределён по игровым ситуациям неравномерно. У проигрывающих команд смещение активности в 90+ заметнее, и это выглядит вполне естественно: для них добавленные минуты — это дополнительное время на по-

пытку отыгаться. Похожая картина наблюдается и в матчах с минимальной разницей в счёте, где один поздний эпизод по-прежнему может изменить исход встречи.

Если собрать результаты вместе, то видно, что реформа изменила саму логику концовки. Реакция команд проявилась не столько в росте числа ударов, сколько в более дли-

тельном и организованном давлении после 90-й минуты: команды чаще продвигают мяч вперёд, чаще закрепляются у чужих ворот и дольше удерживают соперника под нагрузкой. Иначе говоря, более длинный 90+ повлиял не только на продолжительность игры, но и на то, как именно команды распоряжаются последними минутами.

Литература:

1. Konrad, K. A. Strategy and dynamics in contests / K. A. Konrad. — Oxford: Oxford University Press, 2009. — 215 с.
2. Lazear, E. P. Rank-order tournaments as optimum labor contracts / E. P. Lazear, S. Rosen // Journal of Political Economy. — 1981. — Т. 89, № 5. — С. 841–864.
3. Szymanski, S. The economic design of sporting contests / S. Szymanski // Journal of Economic Literature. — 2003. — Т. 41, № 4. — С. 1137–1187.
4. Tullock, G. Efficient rent seeking / G. Tullock // Toward a theory of the rent-seeking society / ed. by J. M. Buchanan, R. D. Tollison, G. Tullock. — College Station: Texas A&M University Press, 1980. — С. 97–112.

ХИМИЯ

Molecular design of hydrotreating catalyst: application and efficiency of ecologically clean REE-POM

Ahmadov Javid Rafiq, master's student

Scientific advisor: Dadashova Narmin Rasim, ph.d. in chemistry, lecturer
Azerbaijan State University of Oil and Industry (Baku, Azerbaijan)

Hydrotreating catalysts, which are related to molecular design, play an important role in the development of environmentally friendly and efficient energy technologies. These catalysts are mainly used in the refining of oil and other fossil fuels and help reduce carbon emissions. Polyoxometalates containing Rare Earth Elements (REE-POM) is a term used here to refer to rare earth elements, as these elements are used to increase the activity of catalysts and to achieve more flexible, environmentally friendly processes. REE-POM act as active components in catalysts, especially in hydrotreating processes. These elements increase the speed of catalytic reactions, ensuring more efficient energy production. They also help the catalysts last longer, which is important not only from an economic point of view, but also from an environmental point of view. The use of REE-POM, especially in hydrotreating processes, enables the sustainable development of future energy technologies by ensuring the application of environmentally friendly approaches.

Keywords: molecular, hydrotreating, ecological, rare earth elements (REE), polyoxometalate, catalyst.

Introduction

In recent years, the global energy sector has focused on the development of cleaner and more efficient technologies in line with the principles of environmental protection and sustainable development. In this context, hydrotreating processes have emerged as an important method for the flexible and environmentally friendly processing of oil and other fossil fuels. Hydrotreating processes are particularly effective in removing sulfur and other harmful substances from oil, which has a positive impact on the environment by preventing atmospheric pollution.

The role of catalysts in the development of these technologies is indispensable. Catalysts increase the speed of chemical reactions, allowing processes to be carried out more efficiently and with less energy consumption. However, the effectiveness of traditional catalysts is limited to a certain extent, which highlights the need to develop new and more powerful catalysts. In this sense, hydrotreating catalysts created on the basis of molecular design have higher activity and are an important step towards achieving more flexible, environmentally friendly processes.

REE-POM used in the composition of these new generation catalysts stand out in particular. Rare earth elements act as an important component to optimize the performance of catalysts and achieve more sustainable results. These elements, in addition to increasing the activity of catalysts, support

their long-term durability and high performance. Thus, the molecular design of hydrotreating catalysts and the application of REE-POM allow for significant advances in the field of ecologically clean energy production and environmental protection.

In this study, the molecular design of hydrotreating catalysts, their application areas, and the role of REEs in these processes will be reviewed, and how these technologies can bring innovation in ecologically clean energy production will be investigated.

The molecular design of hydrotreating catalysts and their supply with REE-POM play an important role in the development of environmentally friendly energy technologies. These catalysts aim to reduce environmental damage and increase energy efficiency in traditional oil refining processes [1, p. 30]. The use of REE-POM in catalysts ensures both the efficiency and environmental friendliness of the process. In this section, the molecular design of hydrotreating catalysts and the role of REE-POM in this design will be analyzed in detail [2, p. 30].

First of all, hydrotreating processes are one of the most important methods for oil purification, removing sulfur and other toxic substances. These processes reduce the amount of harmful emissions to the environment and improve the quality of fuel products. Catalysts in these processes increase the rate of reactions, ensuring the production of desired products with less energy consumption [3, p. 25]. However, the use of

traditional catalysts faces certain limitations, since over time the activity of the catalysts decreases and their renewal is required. To address this problem, catalysts developed based on molecular design can be used for a longer period of time and provide high performance [4, p. 30].

REE-POM are at the heart of this design. REE-POM, especially elements such as cerium (Ce), lanthanum (La), neodymium (Nd) and praseodymium (Pr), increase the activity of catalysts and help them function for a longer period of time. These elements strengthen the structure of catalysts, increasing their thermal stability and catalytic activity. REE-POM also provide more active areas for reactions on the catalysts, which allows reactions to occur more quickly and efficiently [5, p. 635].

In addition, REE-POMs improve the properties of catalysts not only in terms of reactivity, but also in terms of their environmental impact. These elements ensure that the catalysts work more efficiently, reducing carbon emissions and other harmful substances. As a result, this type of catalyst not only serves to produce energy more efficiently, but also to protect the environment [6, p. 954].

Another important issue related to the application of REE-POM should be considered: the natural occurrence of these elements and the environmental impacts of their extraction. Since REE-POM are naturally rare, their extraction and processing can be environmentally difficult and expensive. Therefore, the sustainability and efficiency of the use of REE-POM are related to issues of recycling and resource optimization. Solving these problems requires the development of more environmentally friendly and economically viable REE-POM application models [7, p. 100].

Finally, it can be seen that hydrotreating catalysts prepared on the basis of molecular design have positive results both in industrial applications and from an environmental perspective. These catalysts, in addition to ensuring more efficient and cleaner energy production, also make an important contribution by reducing the environmental impact of industry. The application of REE-POMs, in turn, increases the efficiency of these catalysts and is considered an important step in the development of sustainable energy technologies [8, p. 826].

Table 1. **Molecular Design of Hydrotreating Catalysts and the Role of Rare Earth Elements (REE-POM)**

Factor	Description
Hydrotreating Process	A method used to remove sulfur and other contaminants from crude oil and its derivatives to improve fuel quality and reduce harmful emissions.
Catalyst Role	Catalysts enhance reaction rates, making the process more energy-efficient and effective, enabling cleaner fuel production.
Molecular Design	Custom-designed catalysts that improve performance, lifespan, and stability, often using novel materials and structures for better efficiency.
Rare Earth Elements (REE-POM)	Elements such as Cerium (Ce), Lanthanum (La), and Neodymium (Nd) improve the catalytic activity, thermal stability, and long-term durability of catalysts.
REE Benefits	REE provide more active sites on the catalyst, leading to faster and more efficient reactions. They also improve the catalyst's resistance to degradation.
Environmental Impact	REE-POM-enhanced catalysts help reduce carbon emissions and other pollutants, contributing to cleaner energy production.
Sustainability Concerns	The extraction of REE-POM is costly and environmentally challenging, raising concerns about the long-term sustainability of their use.
Future Directions	Research is focused on improving the efficiency of REE-POM use in catalysis, as well as finding alternative materials and methods for more sustainable energy production.

The table 1 outlines key elements involved in the molecular design of hydrotreating catalysts, focusing on the role of rare earth elements (REE-POM) in improving catalyst efficiency. The hydrotreating process itself is a vital method used in refining crude oil, aimed at removing sulfur and other contaminants to improve fuel quality and reduce harmful emissions. Catalysts in this process are essential because they accelerate the chemical reactions, making the process more energy-efficient while ensuring cleaner fuel production [9, p. 15].

Molecular design refers to the process of tailoring catalysts to enhance their performance, stability, and lifespan. This involves selecting appropriate materials and structures

that optimize catalytic activity. One of the most significant advancements in this area is the integration of rare earth elements into the catalyst structure. Elements like Cerium (Ce), Lanthanum (La), and Neodymium (Nd) are incorporated due to their ability to increase catalytic activity, improve thermal stability, and extend the catalyst's operational life [10, p. 15].

The use of rare earth elements in catalysis has a dual benefit. They not only enhance the reaction speed by providing more active sites for the reaction to occur but also increase the catalyst's resistance to degradation over time. This leads to a more durable catalyst that performs consistently, reducing the need for frequent replacements. From an environmental perspective, catalysts

enhanced with rare earth elements contribute to cleaner fuel production by reducing carbon emissions and other pollutants.

However, while rare earth elements improve catalytic performance, there are sustainability concerns. The extraction and processing of these elements are resource-intensive and can have significant environmental impacts. Therefore, while their use in catalysis provides substantial benefits in terms of performance and emissions reduction, the industry must balance this with efforts to develop more sustainable practices for sourcing and utilizing these materials.

In conclusion, the molecular design of hydrotreating catalysts incorporating rare earth elements represents a significant leap forward in improving energy efficiency and reducing environmental impact in the refining industry. However, it also highlights the need for ongoing research to ensure that the benefits of these materials do not come at an ecological cost. The continued advancement of these technologies will be crucial for developing more sustainable and effective catalytic processes [11, p. 20].

Conclusion

In conclusion, the molecular design of hydrotreating catalysts and the application of REE-POMs provide more efficient and environmentally friendly oil refining processes. REE-POMs increase the activity of catalysts, improve their longevity and thermal stability, while reducing carbon emissions and other harmful substances. This is an important advance in ensuring clean energy production and environmental protection.

However, there are environmental and economic problems associated with the extraction and use of REE-POM. Extraction of REE-POM requires expensive and environmentally difficult processes. Therefore, the development of more efficient and sustainable methods for the sustainable use and recycling of these elements is necessary.

The role of REE-POM in this field constitutes an important stage in the research towards clean energy production and environmental protection.

References:

1. Kwao, S., Vedachalam, S., Dalai, A. K., & Adjaye, J. (2024). Review of current advances in hydrotreating catalyst support. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. (review article, ~20–30 p.).
2. Deactivation of hydrotreating catalysts: A review. (2020). ResearchGate PDF (review article, ~25–30 p.).
3. Oliviero, L., & Maugé, F. (2020). Organic additives for hydrotreating catalysts: review of main families and mechanisms. HAL Archive (review article, ~18–25 p.).
4. Topsøe, H., Clausen, B. S., & Massoth, F. E. (1996). Hydrotreating Catalysis (Handbook chapter). SpringerVerlag (book chapter, ~23–30 p.).
5. Haque, N., Hughes, A., Lim, S., & Vernon, C. (2014). Rare Earth Elements: Overview of Mining, Mineralogy, Uses, Sustainability and Environmental Impact. *Resources*, 3(4), 614–635.
6. Kadam, V. V., Thakare, S. D., & Suryawanshi, G. V. (2026). Rare earth elements: synthesis methods and applications — A brief review. *Journal of Advanced Chemical Sciences*, 12(3), 951–954.
7. Aryee, E. N. A. (2019). Hydrotreating of Gas Oils using NiMo Catalyst (master's thesis, University of Saskatchewan). (~80–100 p.).
8. Tuktin, B., Omarova, A., Saidilda, G., et al. (2024). Modified Polymetallic ZeoliteBased Catalysts for Hydroprocessing Diesel Oil Fraction and Tetradecane. *International Journal of Technology*, 15(4), 812–826.
9. Hydrotreating — an overview. (n.d.). ScienceDirect topic overview (general reference, ~10–15 pages summary).
10. Manousi, N., et al. (2020). Determination of rare earth elements by inductively coupled plasma spectrometry (review). *Journal of Rare Earths* (review article, ~12–15 p.).
11. Grange, P. (1997). Hydrotreating catalysts, an old story with new challenges. *Applied Catalysis A* (review paper, ~15–20 p.).

Эффективный метод получения каустической соды

Курбанова Джемал Мыратгелдиевна, студент

Туркменский государственный архитектурно-строительный институт (г. Ашхабад, Туркменистан)

В статье описываются химические свойства гидроксида натрия, его применение в народном хозяйстве, а также химические и электрохимические методы получения гидроксида натрия и используемые в них технологии. На основе проведенного анализа обосновывается выбор наиболее оптимального метода.

Ключевые слова: гидроксид натрия, химия, мембрана, электролизатор, хлор, водород.

Щелочи известны человечеству с древнейших времен. Они получили широкое распространение в процессах варки стекла, обезжиривания кож, производстве мыла, бумаги и в других отраслях. В 1736 году французский химик

и ботаник Анри Луи Дюамель де Монсо впервые сумел выделить чистую соду из воды, содержащей содовую золу. До XVIII века потребность в соде удовлетворялась за счет природных ресурсов, однако в дальнейшем спрос на нее возрос, что поставил вопрос о необходимости промышленного синтеза. Русский химик Эрик Густав Лаксман связал способ получения соды с процессом взаимодействия сульфата натрия с древесным углем [1].

В 1791 году французский врач и химик-технолог Никола Леблан, независимо от метода Лаксмана, получил патент на «превращение глауберовой соли в соду». Первый содовый завод в России был открыт промышленником М. Прангом в 1864 году. В настоящее время в мировой промышленности получение гидроксида натрия или едкого натрия, (NaOH) хлора, соляной кислоты (HCl) и водорода осуществляется преимущественно методом электролиза раствора хлорида натрия.

Как отмечалось выше, каустическая сода является самой распространенной щелочью. Ежегодный объем ее мирового производства составляет порядка 56–58 миллионов тонн. Чаще всего гидроксид натрия встречается в порошкообразном виде, однако также широко применяется в форме различных растворов, получаемых химическим, ртутным или диафрагменным методами.

В различных отраслях народного хозяйства потребление перерабатываемой щелочи распределяется следующим образом: нефтехимическая промышленность — 12 %; целлюлозно-бумажная промышленность — 3 %; металлургия — 9 %; химическая промышленность — 76 %. Сферы применения гидроксида натрия:

Целлюлозно-бумажная промышленность: едкий натрий широко используется в процессах производства картона, бумаги и древесно-волоконных плит [2].

В производстве необходимых каждому из нас мыла и шампуней также используется гидроксид натрия, он применяется для омыления жиров

Нефтеперерабатывающая промышленность использует каустическую соду в производстве масел. Гидроксид натрия используется в качестве катализатора в производстве биодизельного топлива. Канализационные трубы время от времени засоряются, каустическая сода способна успешно справиться с этой проблемой, так как во многом отмечается её способность разъедать вещества. Зачастую гидроксид натрия входит в состав гелей или сухих гранул, предназначенных для удаления загрязнений труб.

Натрий широко распространен, в основном, в виде NaCl , Na_2SO_4 , Na_2CO_3 и других солей. Их также много в Туркменистане. Важным природным соединением натрия является поваренная соль NaCl ; она служит основным сырьем для получения других соединений хлора. Важными минералами натрия являются галит — NaCl , мирабилит — $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$, сильвинит — $\text{NaCl} \cdot \text{KCl}$. Они содержатся в огромных количествах в морской воде, входят в основной состав всех живых организмов и прочего. В морских водах также содержится от 0,8 до 3,5 % поваренной соли.

Натрий зачастую, в виде NaCl — поваренной соли — находится не только в виде минерала, но и в больших количествах содержится во всех водах: реках, озерах, океанах и подземных водах. В виде минерала NaCl — каменная соль, галит — встречается в природе в виде отложений толщиной 100 м. В Туркменистане поваренная соль NaCl в основном имеется в Западном Туркменистане: в Джебеле, на востоке — в Койтендагском (Чаршангынском) этрапе. Другая широко распространенная соль натрия — мирабилит, глауберова соль $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$. Её месторождение в Туркменистане также имеется в Гарабогазе.

NaCl — поваренная соль — используется в пищевой, рыбной промышленности, в химической промышленности: в производствах металлического натрия, едкого натра, соды, хлора и прочего, в фармацевтической промышленности; гидроксид натрия NaOH (едкий натр, каустическая сода) используется в производстве мыла, красителей, целлюлозы и других производствах; NaNO_3 , KCl используются в продукции, необходимой для сельского хозяйства

Основным сырьем для электролитического производства гидроксида натрия выступают растворы поваренной соли (NaCl), получаемые из природных рассолов или путем растворения твердой соли. Различают три вида залежей такой соли: ископаемая соль (составляет около 99 % запасов); соляные озера, представляющие собой отложения самосадочных солей (0,77 %); остальную часть составляют подземные рассолы.

В настоящее время в мировой промышленности получение гидроксида натрия (едкого натра, NaOH), хлора, соляной кислоты (HCl) и водорода осуществляется методом электролиза раствора хлорида натрия. В основе данного метода лежат свойства водных растворов хлоридов щелочных металлов разлагаться под воздействием постоянного тока, в результате чего на электродах выделяются газообразный хлор и водород. При этом в электролитической ванне накапливается гидроксид натрия [2, 4]. Существует несколько разновидностей метода электролиза:

1. Метод с ртутным катодом;
2. Мембранный метод;
3. Диафрагменный метод.

Условия электролиза. Аноды для хлорных электролизеров должны обладать высокой химической стойкостью. Этому требованию соответствуют магнетит, диоксид марганца, углерод, графит и платина. В производстве хлора применяются графитовые аноды или аноды на основе оксидов рутения и титана. До 1970-х годов основным материалом анода был графит. Недостатком таких анодов является их значительный износ, составляющий 3,5–6,0 кг на тонну хлора,

что приводит к увеличению межэлектродного расстояния и, как следствие, к росту напряжения электролиза. Диоксид углерода, образующийся в результате химического износа, загрязняет хлор. Срок службы графитовых анодов не превышает 12–14 месяцев. В последние годы графитовые аноды были заменены на ОРТА (оксидные рутениево-титановые аноды) — титановые аноды, покрытые слоем оксидов рутения и титана толщиной в несколько микрон. Скорость износа таких анодов составляет всего 0,1 г на тонну хлора, что обеспечивает срок службы от 4 до 6 лет [1, 5].

В качестве питающего раствора для процесса электролиза с катионообменной мембраной используется раствор хлорида натрия с концентрацией NaCl 300–315 кг/м³. На рисунке 1 представлена схематическая диаграмма электролитических ячеек с ионообменной мембраной.

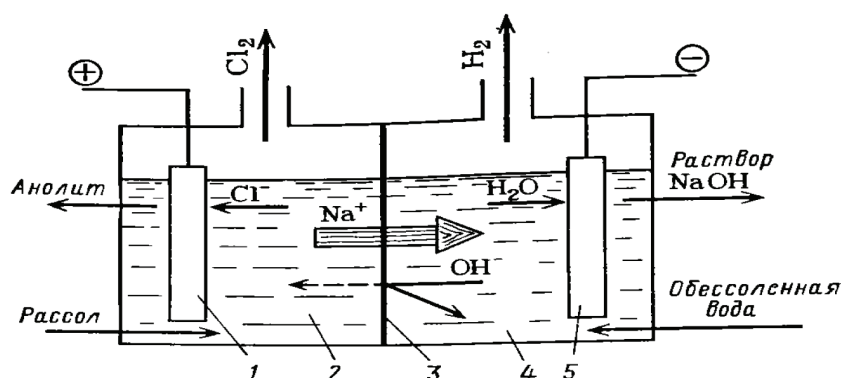


Рис. 1. Электролитический элемент с катионообменной мембраной: 1 — анод; 2 — анодная камера; 3 — катионообменная мембрана; 4 — катодная камера; 5 — катод

В статье описана часть экспериментальных исследований, проведенных по мембранному методу производства гидроксида натрия. В результате была разработана конструкция электролизеров и в ходе многократных экспериментальных испытаний была создана оптимальная модель получения 15 %-го раствора каустической соды. Показатель pH полученного раствора составил 12.

Литература:

1. Якименко Л. М. Производство хлора, каустической соды и неорганических хлорпродуктов. М. : Химия, 1974
2. Атрощенко В. И. Технология связанного азота. М. : Химия, 1969.
3. Амелин А. Г. Производство серной кислоты. М. : Химия, 1971.
4. Семенова Т. А. и др. Очистка технологических газов. М. : Химия, 1977.
5. Степин Б. Д. И др. Методы получения особо чистых веществ. М. : Химия, 1969.

Электролитический метод получения каустической соды и соляной кислоты

Курбанова Джемал Мыратгелдиевна, студент

Туркменский государственный архитектурно-строительный институт (г. Ашхабад, Туркменистан)

В статье рассматривается электролитический метод получения раствора гидроксида натрия и соляной кислоты, а также демонстрируются преимущества данного способа.

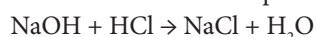
Ключевые слова: гидроксид натрия, соляная кислота, электролиз, химия, хлор, водород.

Существует несколько разновидностей метода электролиза:

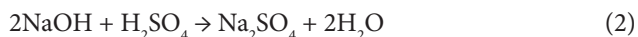
1. Метод с ртутным катодом;
2. Мембранный метод;
3. Диафрагменный метод.

Каустическая сода крайне опасна в сочетании с аммиаком. При взаимодействии NaOH со следующими веществами:

1. С кислотами — с образованием солей и воды



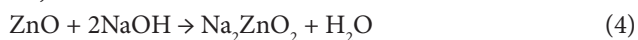
(1)



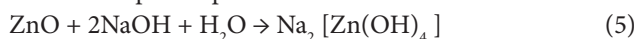
2. С кислотными оксидами



3. С амфотерными оксидами, обладающими как основными, так и кислотными свойствами.



Также с их растворами



Едкий натр образует с водой несколько кристаллогидратов. При температуре -28°C из 19,1 % водного раствора гидроксида натрия кристаллизуется соль $\text{NaOH} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; при 20°C из 2,5 % раствора в твердую фазу переходит $\text{NaOH} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; при 80°C из 75 % раствора в кристаллы превращается безводный NaOH.

Первоначально сырьем для производства гидроксида натрия служили растворы природной поваренной соли. В настоящее время для крупномасштабного производства хлора и каустической соды используются как природные рассолы, так и растворы, полученные путем подземного выщелачивания соляных пластов [1, 2].

Туркменистан чрезвычайно богат месторождениями минеральных солей. По запасам некоторых из них наша Родина занимает одно из ведущих мест в мире. Крупные месторождения поваренной соли расположены в юго-восточной части страны — в Магданлы-Койтендагском регионе. К химическим методам получения гидроксида натрия относятся известковый и ферритный способы. Известковый метод получения гидроксида натрия заключается во взаимодействии раствора соды с известковым молоком при температуре 80°C . Этот процесс называется каустификацией и описывается следующей реакцией:



В соответствии с реакцией получают раствор гидроксида натрия, при этом образуется осадок карбоната кальция. Карбонат кальция отделяют от раствора, который затем упаривают до получения расплавленного продукта с содержанием NaOH около 92 %. Расплавленный NaOH разливают в железные барабаны, где происходит его охлаждение.

Данный метод получения каустической соды был известен еще в Древнем Египте. Основные этапы реализации этого метода в промышленных условиях включают:

- каустификацию содового раствора;
- отделение и промывку шлама;
- выпаривание щелочи;
- плавление соды и высокотемпературное гранулирование гидроксида натрия.

В последнее время химический метод не находит широкого применения из-за значительных энергетических затрат при выпаривании низкотемпературных щелочных растворов.

Каустификация относится к гетерогенным некаталитическим процессам и широко используется в химической технологии, например, при производстве целлюлозы сульфатным методом.

Производство NaOH электрохимическим путем считается наиболее технически совершенным и экономически эффективным среди всех химических способов. Процесс получения NaOH электролизом заключается в следующем: при прохождении постоянного тока через раствор хлорида натрия на аноде выделяется хлор, а на катоде происходит образование водорода и щелочи. Установка диафрагмы между анодом и катодом обеспечивает разделение продуктов электролиза [1, 3].

В первых типах промышленных электролизеров неподвижный электролит разделялся на катодный и анодный отсеки с помощью пористой диафрагмы. Данная электрохимическая система не позволяла производить хлор и каустическую соду со стабильным выходом по току, так как было невозможно предотвратить диффузию и электроперенос гидроксид-ионов, накапливающихся в катодном отделении, в анодное отделение, что приводило к снижению эффективности тока. Предотвратить эти потери можно путем проведения электролиза с пористой диафрагмой и твердым катодом, используя принцип противотока. Это подразумевает непрерывную подачу электролита в анодный отсек и его фильтрацию через диафрагму в катодный отсек для противодействия потоку гидроксид-ионов (рисунок 1, «а»). В этом случае направление движения электролита в порах диафрагмы будет противоположным направлению движения ионов OH^- , а скорость подачи электролита в электролизер (скорость противотока) будет равна или выше скорости электролитического переноса и диффузии гидроксид-ионов из катодного пространства.

Сравнение методов электролиза. В мировой промышленной практике для производства хлора и каустической соды используются три метода, при этом наблюдается тенденция к росту использования мембранного электролиза. В таблице 1 приведено сравнение трех способов производства каустической соды и хлора.

Ртутный метод производства хлора и гидроксида натрия позволяет получать высококонцентрированный раствор гидроксида натрия с низким содержанием хлорида натрия (0,01–0,05 % по массе). Однако, несмотря на эти преимущества, данный метод имеет ряд существенных недостатков, наиболее важными из которых являются ртутное загрязнение и повышенная опасность условий труда для обслуживающего персонала. Щелочь, произведенная методом мембранного электролиза, по своему качеству сопоставима со щелочью, полученной методом с ртутным катодом, и постепенно вытесняет её с рынка. Таблица показывает, что уровень энергопотребления при этом методе значительно ниже по сравнению с ртутным и диафрагменными способами. Мембранный метод производства каустической соды и хлора является наиболее энергоэффективным, однако он сложен в установке и эксплуатации. С точки зрения электрохимических процессов мембранный метод схож с диафрагменным, но анодное и катодное пространства в нем полностью разделены катионообменной мембраной, непроницаемой для анионов

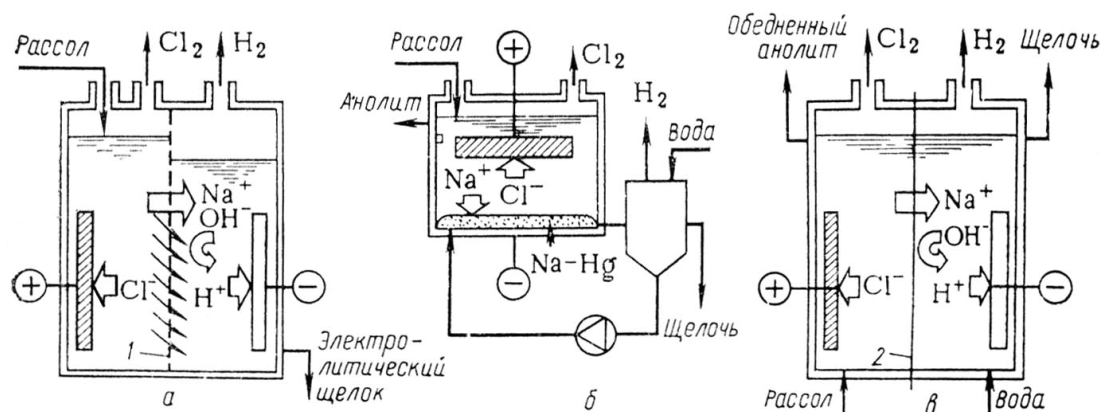


Рис. 1. Схемы производства хлора, щелочи и водорода: а — электролиз с твердым анодом и фильтрующей диафрагмой; б — электролиз с ртутным катодом; в — электролиз с ионообменной мембраной

Таблица 1

Показатели на 1 тонну NaOH	Мембранный метод	Ртутный метод	Диафрагменный метод
Выход хлора, %	98,5	99	96
Электроэнергия, кВт·ч	2520	3150	3260
Концентрация NaOH, %	35–50	50	12
Чистота хлора, %	99,3	99,2	98
Чистота водорода, %	99,9	99,9	99,9
Массовая доля O ₂ в хлоре, %	0,3	0,3	1–2
Массовая доля Cl в NaOH, %	0,005	0,003	1–1,2

[5, 6]. Поэтому в мембранном электролизере, в отличие от диафрагменного, имеется не один, а два потока. Кроме того, ограниченная геометрическая форма, низкая механическая прочность и термическая стабильность ионообменных мембран обуславливают относительно сложную конструкцию мембранных электролизных установок. По этой причине мембранное оборудование требует наличия самых совершенных систем автоматического контроля и управления. Мембранный электролиз не требует большого количества персонала для технического обслуживания и ремонта. При использовании мембранных электролизеров (по сравнению с диафрагменными) отпадает необходимость в специальном оборудовании для

подготовки и перекачки фильтрующих диафрагм, значительно снижается мощность подъемно-транспортных механизмов и существенно сокращается время простоя при ремонте. Колебания токовой нагрузки не оказывают существенного влияния на работу мембранного электролизера. В результате проведенных экспериментальных исследований была разработана оптимальная модель получения 15 %-го раствора каустической соды. Показатель pH полученного раствора составил 12. Также при использовании оптимальных условий утилизации выделяющихся хлор-водородных газов путем их растворения в дистиллированной воде была получена соляная кислота, показатель pH которой составил 1.

Литература:

1. Якименко Л. М. Производство хлора, каустической соды и неорганических хлорпродуктов. М. : Химия, 1974
2. Атрощенко В. И. Технология связанного азота. М. : Химия, 1969.
3. Амелин А. Г. Производство серной кислоты. М. : Химия, 1971.
4. Семенова Т. А. и др. Очистка технологических газов. М. : Химия, 1977.
5. Степин Б. Д. И др. Методы получения особо чистых веществ. М. : Химия, 1969.
6. Шокин И. Н., Крашенинников С. А. Технология соды. М. : Химия, 1975.

Влияние типа восстановителя и pH среды на синтез и свойства хитозан-медных нанокмпозитов

Наранбаатар Гэгээн, студент магистратуры

Научный руководитель: Жамбалдорж Болдбаатар, кандидат медицинских наук, доцент;

Научный руководитель: Хишигжаргал Тэгшжаргал, кандидат инженерных наук, доцент

Монгольский государственный университет (г. Улан-Батор, Монголия)

Нанокмпозиты на основе наночастиц меди в матрице хитозана (CuNPs@chitosan) были синтезированы с использованием аскорбиновой кислоты и гидразингидрата в водной среде и этиленгликоле при различных значениях pH. Спектры UV-Vis продемонстрировали полосы поверхностного плазмонного резонанса (SPR) в диапазоне 590–640 нм, что подтверждает образование наночастиц меди. Системы гидразин–этиленгликоль обеспечили формирование более мелких (~334 нм) и однородных частиц, тогда как при использовании аскорбиновой кислоты наблюдалось образование более крупных и агрегированных структур. Данные FTIR подтвердили наличие взаимодействий Cu–N и Cu–O, а результаты XRD показали более высокую кристалличность Cu^0 в образцах, полученных с применением гидразина. Термический анализ (TG–DTA) выявил повышенную термическую стабильность при pH ~7. В целом установлено, что использование гидразингидрата в этиленгликоле при слабощелочных условиях приводит к образованию наиболее стабильных и однородных нанокмпозитов.

Ключевые слова: хитозан, наночастицы меди, нанокмпозиты, гидразингидрат, аскорбиновая кислота, этиленгликоль, влияние pH.

Введение

Наночастицы меди (CuNPs) широко изучаются благодаря их высокой электропроводности, каталитической активности и антимикробным свойствам [1–3]. Кмпозиты на основе хитозана с наночастицами меди обладают повышенной стабильностью и функциональностью вследствие сильного координационного взаимодействия между ионами меди и функциональными группами хитозана [4]. Однако наночастицы меди склонны к окислению и агрегации [5]. Их свойства существенно зависят от параметров синтеза, таких как тип восстановителя, значение pH и растворитель [2]. Этиленгликоль рассматривается как среда, способствующая повышению стабильности по сравнению с водными системами [1].

В данной работе исследовано влияние типа восстановителя (аскорбиновая кислота и гидразингидрат), pH среды и растворителя на синтез и свойства нанокмпозитов CuNPs@Chitosan с целью определения оптимальных условий их получения.

Материалы и методы

$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, хитозан (Ch), NaOH, HCl, гидразингидрат и аскорбиновая кислота использовались без дополнительной очистки. Этиленгликоль (EG) применялся в качестве растворителя. Все реагенты имели аналитическую степень чистоты и использовались без дальнейшей очистки. Общая схема синтеза представлена на рисунке 1.

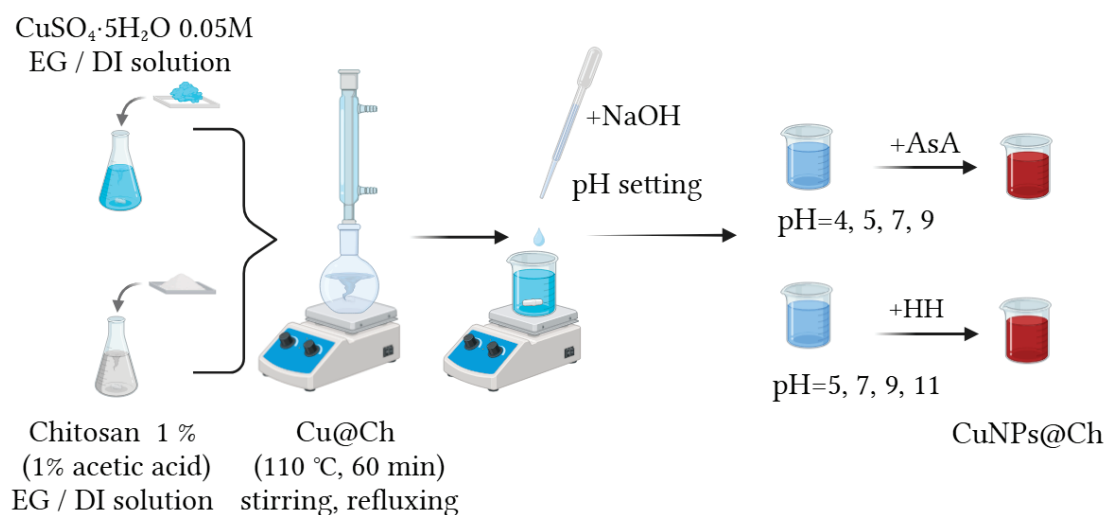


Рис. 1. Схематическое представление процесса синтеза CuNPs@Ch .

Синтез нанокompозитов CuNPs@Chitosan. Раствор CuSO_4 (0,05 M) готовили в воде, а хитозан (1 мас. %) растворяли в смеси этиленгликоля и воды (80:20) с добавлением уксусной кислоты. Раствор Cu^{2+} добавляли к раствору хитозана по каплям при постоянном перемешивании. Полученную смесь подвергали рефлюксу при 110 °C в течение 1 часа, после чего делили на части и доводили до различных значений pH. Восстановление осуществляли с использованием аскорбиновой кислоты (60 °C, 1 ч) и гидразингидрата (40–60 мин). Все полученные продукты центрифугировали, промывали и высушивали. Образцы либо хранили в виде дисперсий в этиленгликоле, либо сушили в сушильном шкафу при 60 °C в течение ночи для последующей характеристики.

Характеризация. Для исследования образцов использовались следующие методы: UV-Vis спектроскопия (400–800 нм, UV-1650PC, Shimadzu Corp.), FTIR спектроскопия (500–4000 cm^{-1} , IR Prestige, Shimadzu Corp.), PCCS/DLS (определение размера частиц, Nanophox NX0137), TG-DTA (термическая стабильность, TG-DTA8122, Shimadzu Corp.), XRD (кристалличность, Maxima 7000, Shimadzu Corp.) и AFM (морфология, AA5500 Advanced Angstrom Inc.).

Результаты и обсуждение

Анализ UV-Vis. В данном исследовании в качестве восстановителей использовались гидразингидрат (HH) и аскорбиновая кислота (AsA), а влияние среды растворителя (этиленгликоль (EG) и деионизованная вода (DI)) и pH было сравнительно проанализировано, как показано на рисунке 2. Все образцы продемонстрировали характерные пики поверхностного плазмонного резонанса в диапазоне 590–640 нм, что подтверждает образование наночастиц меди и согласуется с ранее опубликованными данными [3,4]. Образцы, восстановленные аскорбиновой кислотой, показали bathochromный сдвиг пика (~637 нм), что указывает на формирование более крупных частиц, тогда как образцы, восстановленные гидразином, характеризовались гипсохромным сдвигом (~590 нм), соответствующим меньшему размеру наночастиц.

Системы на основе этиленгликоля обеспечили получение наиболее мелких и однородных наночастиц.

Анализ FTIR. Инфракрасные спектры с преобразованием Фурье (FTIR) для Cu@Ch и композитов, синтезированных с использованием различных восстановителей (CuNPs@Ch AsA и CuNPs@Ch HH), представлены на рисунке 3. Результаты FTIR подтвердили наличие взаимодействия между хитозаном и наночастицами меди. Смещение полос $-\text{NH}_2$ и $-\text{OH}$ указывает на образование координационных связей. Аналогичная интерпретация приводится в литературе, где отмечается, что при координации аминных и гидроксильных функциональных групп хитозана с ионами металлов наблюдается гипсохромный сдвиг колебательных полос O–H и N–H [4].

Образцы, полученные с использованием гидразина, продемонстрировали более выраженные взаимодействия Cu–N и Cu–O, что свидетельствует об улучшенной стабилизации нанокompозитов.

Размер частиц и стабильность. Анализ методом фотонно-корреляционной спектроскопии (PCCS) показал, что размер частиц и их распределение в композитах CuNPs@Chitosan существенно зависят от типа восстановителя, значения pH и условий растворителя. Результаты PCCS представлены на рисунке 4 и в таблице 1. Система AsA–EG (710 нм) указывает на преобладание более крупных частиц, формирование которых обусловлено процессами роста, тогда как система AsA–DI (1540 нм) демонстрирует значительную агрегацию вследствие снижения протонирования хитозана и за-

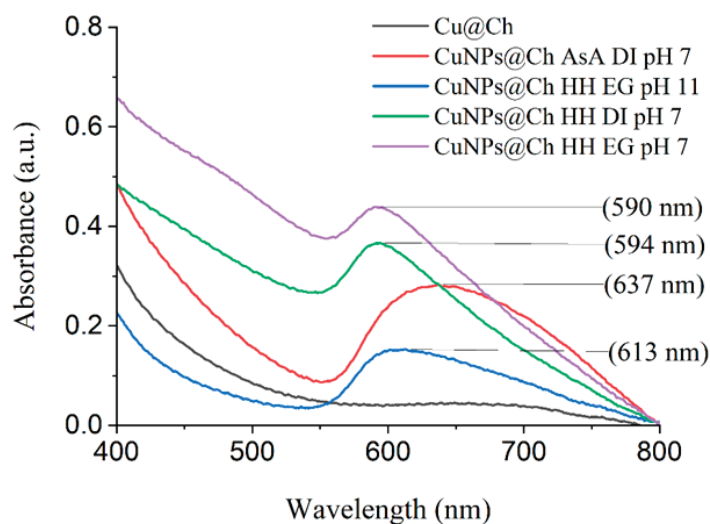


Рис. 2. Сравнение спектров UV-Vis при различных условиях синтеза

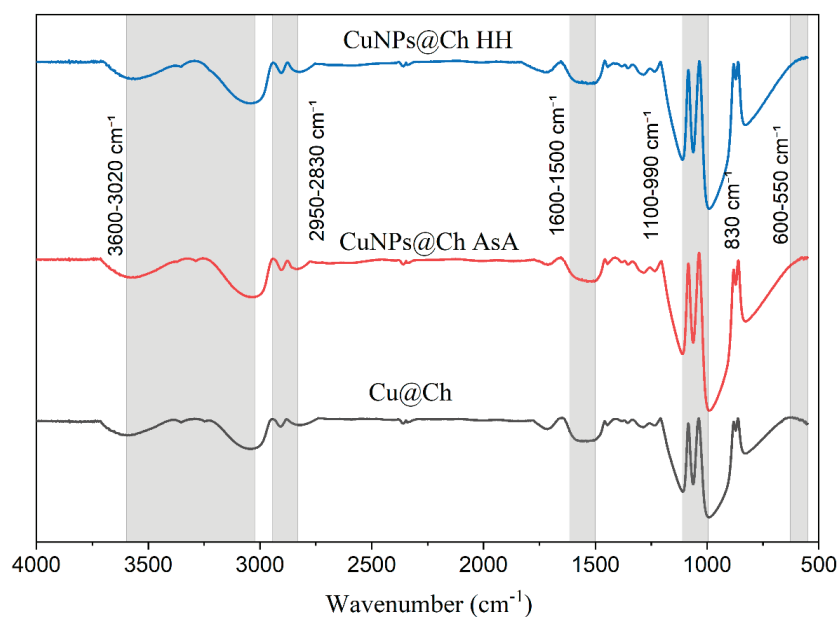


Рис. 3. FTIR-спектры CuNPs@Ch HH (синий), CuNPs@Ch AsA (красный) и Cu@Ch (чёрный). Все образцы были синтезированы при pH 7

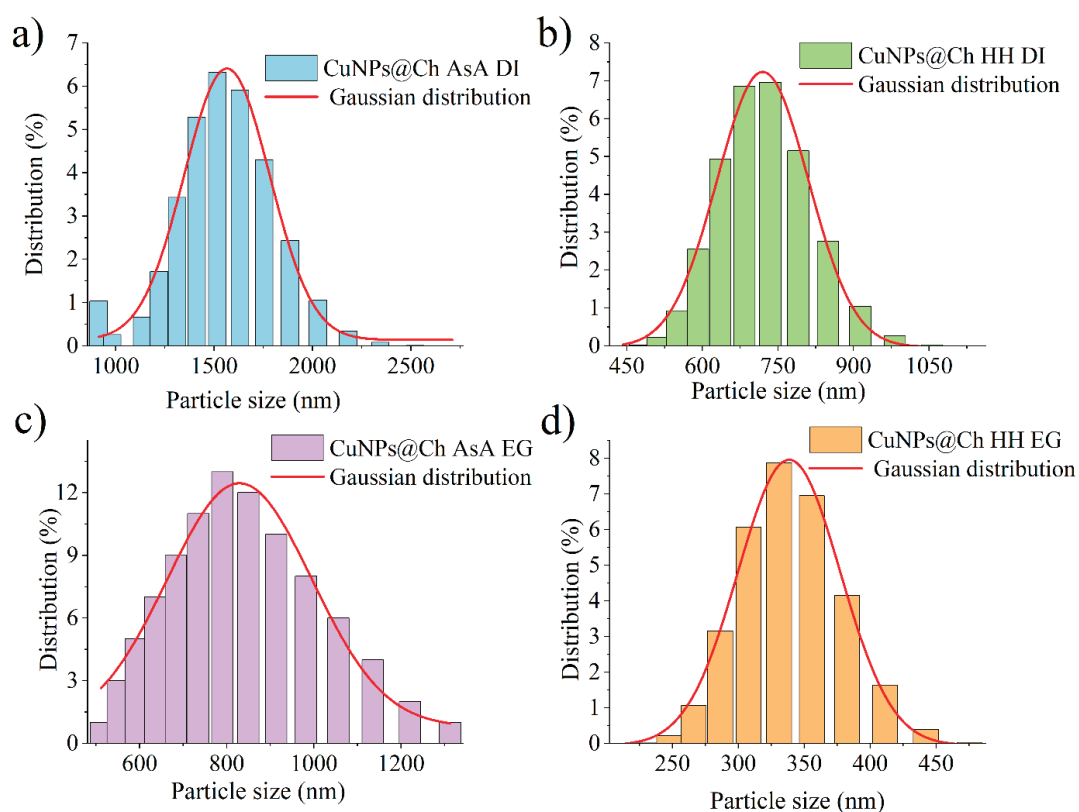


Рис. 4. Размер и распределение частиц композита CuNPs@Chitosan при pH 7: а) CuNPs@Ch AsA DI, б) CuNPs@Ch HH DI, в) CuNPs@Ch AsA EG и г) CuNPs@Ch HH EG

медленной кинетики восстановления. Напротив, система HH-EG (330 нм) обеспечивает получение более мелких, стабильных и монодисперсных частиц, в то время как система HH-DI (710 нм) характеризуется умеренной агрегацией, обусловленной слабой ионизацией хитозана [1].

В целом использование гидразингидрата способствует формированию более мелких и равномерно распределённых композитов CuNPs@Ch.

Таблица 1. Средний размер частиц, определённый методом PCCS

Условия синтеза	Средний размер частиц (нм)
AsA DI	~1540
AsA EG	~710
HH DI	~710
HH EG	~330

Результаты измерения ζ -потенциала представлены в таблице 2. Немодифицированная система Cu@Ch продемонстрировала ζ -потенциал $+2,28 \pm 3,08$ мВ, что указывает на минимальный поверхностный заряд и крайне слабую электростатическую стабильность.

Система CuNPs@Ch AsA показала ζ -потенциал $-6,08 \pm 2,27$ мВ, где слабый отрицательный заряд обусловлен адсорбцией карбоксилатных групп, что приводит к низкой или умеренной коллоидной стабильности.

В отличие от этого, система CuNPs@Ch HH продемонстрировала ζ -потенциал $+21,46 \pm 6,78$ мВ, что свидетельствует о наибольшем положительном поверхностном заряде и самой высокой электростатической стабильности среди исследованных образцов.

Значение ζ -потенциала в диапазоне 20–30 мВ указывает на электростатически стабильную коллоидную систему [6].

Таблица 2. Результаты измерения ζ -потенциала композита CuNPs@Ch

Образец	ζ -потенциал (мВ)
Cu@Ch	2.28 ± 3.08
CuNPs@Ch Asc	-6.08 ± 2.27
CuNPs@Ch HH	21.46 ± 6.78

Термическая стабильность. Термогравиметрический и дифференциально-термический анализ (TG–DTA) выявил влияние типа восстановителя и условий растворителя на композиты CuNPs@Ch. Композиты Cu@Ch показали потерю влаги ниже 100 °C, разложение хитозана в диапазоне 250–400 °C и образование остатка Cu/Cu₂O при температурах выше 400 °C [7]. Образец Cu@Ch продемонстрировал ступенчатое разложение с экзотермическим пиком при 497 °C и общей потерей массы 95.6 %. Системы AsA EG (pH5 и 7) показали начало разложения при 260–280 °C с выраженными экзотермическими пиками в диапазоне 460–477 °C и потерей массы 90–94 %, что свидетельствует о сравнительно равномерном процессе деградации. В отличие от этого, образец HH–EG (pH7) продемонстрировал максимальный экзотермический пик при 451.5 °C (+364,0 мВ) и наименьшую потерю массы (~81 %), что указывает на наиболее высокую термическую стабильность структуры.

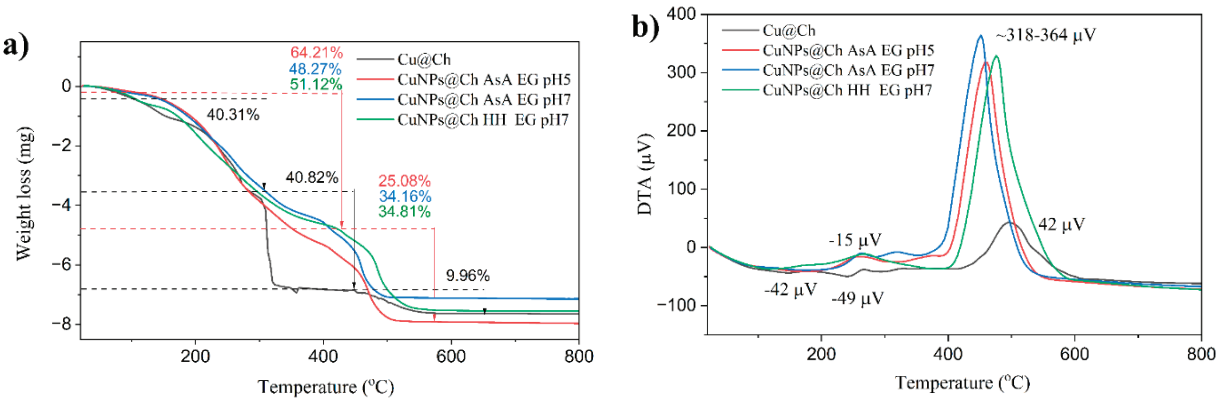


Рис. 5. Сравнение различных условий синтеза: (а) результаты TG и (b) результаты DTA

В целом все образцы показали типичное поведение разложения хитозана. Однако образцы HH–EG характеризуются наивысшей температурой разложения и наименьшей потерей массы (~81 %), что подтверждает их превосходную термическую стабильность.

Анализ XRD. Рентгенодифракционный анализ (XRD) использовался для определения фазового состава, кристаллической структуры, а также наличия Cu_2O и CuO в медьсодержащих наноструктурах (рисунок 6, таблица 3). Для хитозана широкие аморфные пики при $10,32^\circ$ и $20,57^\circ$ подтвердили преимущественно некристаллическую структуру. В образце CuNPs@Ch HH наблюдался слабый пик при $37,77^\circ$, соответствующий CuO (110), а также интенсивные пики при $43,24^\circ$, $50,37^\circ$ и $74,05^\circ$, относящиеся к плоскостям Cu (111), (200) и (220), что указывает на сосуществование металлической меди и оксидных фаз. В отличие от этого, образец CuNPs@Ch AsA продемонстрировал преобладание металлической фазы Cu ($42,87^\circ$ — (111)), наряду с незначительными пиками CuO ($36,41^\circ$ — (110)) и Cu_2O ($74,04^\circ$ — (220)) [8]. Результаты XRD подтвердили формирование кристаллической фазы Cu^0 . Образцы, полученные с использованием гидразина, характеризовались более острыми пиками и более высокой степенью кристалличности, тогда как наличие слабых пиков $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}$ указывает на незначительную степень окисления.

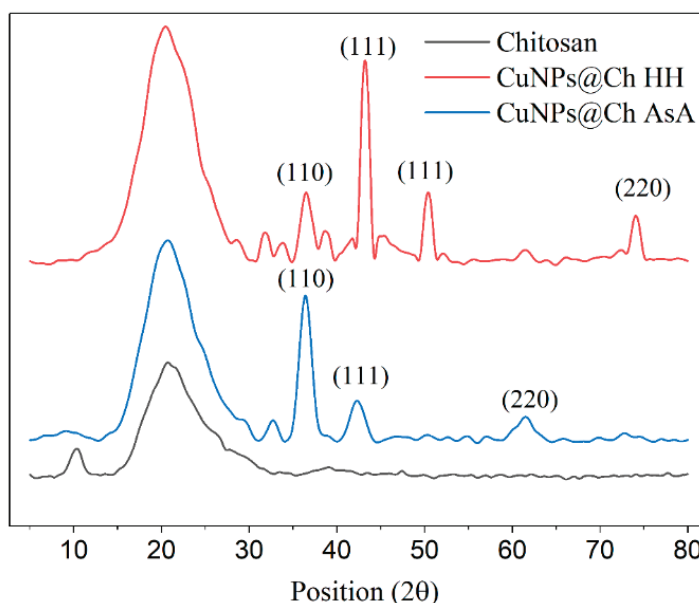


Рис. 6. Рентгенодифракционные (XRD) дифрактограммы хитозана и восстановленных композитов CuNPs@Ch

Таблица 3. Положения дифракционных пиков XRD и результаты фазовой идентификации образцов CuNPs@Ch

Образец	Положение ($2\theta^\circ$)	Индексы Миллера (hkl)	Фаза
Chitosan	10.07° , 20.54°	-	Amorphous organic
CuNPs@Ch HH	37.77°	(110)	CuO
	43.24°	(111)	Cu
	50.37°	(111)	Cu
	74.05°	(220)	Cu
CuNPs@Ch AsA	36.41°	(110)	CuO
	42.87°	(111)	Cu
	61.54°	(220)	Cu_2O

Результаты AFM. В анализе методом атомно-силовой микроскопии (AFM) в качестве подложки использовалась атомарно-гладкая мусковитовая слюда, что позволило получить высокоразрешённые изображения равномерного распределения CuNPs@Ch , как показано на рисунке 7.

AFM-изображения показали, что при использовании гидразингидрата формируются более однородные структуры; поперечный анализ указал на средний размер частиц около ~ 301 нм, что свидетельствует о том, что, несмотря на быструю реакцию восстановления, вязкая среда этиленгликоля замедляет процессы зародышеобразования и роста, обеспечивая более равномерное распределение. В случае аскорбиновой кислоты наблюдалось образование более крупных частиц (~ 420 нм) и их агрегация. Ранее сообщалось, что растворители типа полиолов могут замедлять скорость кристаллизации металлических частиц за счёт более равномерного распределения тепла [9]. Полученные результаты хорошо согласуются с данными UV-Vis и PCCS.

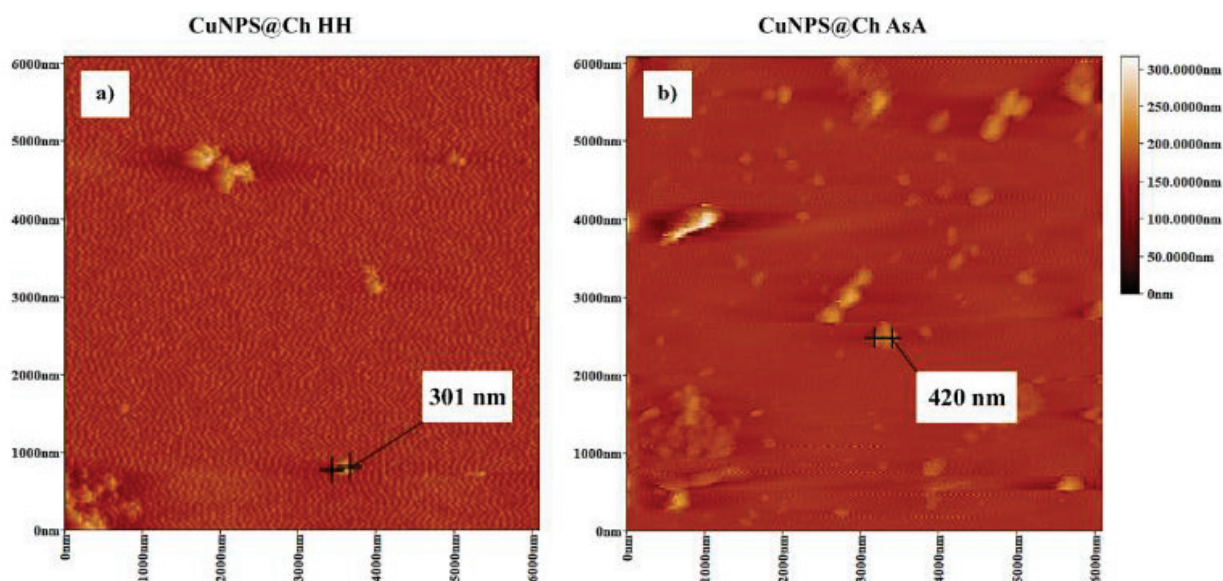


Рис. 7. Результаты AFM-анализа образцов CuNPs@Ch в зависимости от условий восстановителя:
(a) гидразингидрат и (b) аскорбиновая кислота

Заключение

В данной работе показано, что тип восстановителя, значение pH и выбор растворителя существенно влияют на формирование и свойства хитозан–медных нанокомпозитов. Использование гидразингидрата обеспечивает быстрое восстановление, приводя к образованию более мелких, однородных и высококристаллических наночастиц меди, тогда как аскорбиновая кислота способствует формированию более крупных и агрегированных частиц. Нейтральные и слабощелочные условия способствуют улучшенной координации Cu^{2+} с хитозаном и повышению коллоидной стабильности, в то время как кислые условия приводят к агрегации. Этиленгликоль обеспечивает более контролируемую среду роста по сравнению с водными системами. Среди всех исследованных условий комбинация гидразингидрата и этиленгликоля при $\sim\text{pH}7$ обеспечивает получение нанокомпозитов с наименьшим размером частиц, наиболее узким распределением, однородной морфологией и наивысшей термической стабильностью. Полученные результаты формируют эффективную стратегию синтеза стабильных и хорошо диспергированных хитозан–медных нанокомпозитов.

Литература:

1. T. M. Dung Dang, T. T. Tuyet Le, E. Fribourg-Blanc, M. Chien Dang, The influence of solvents and surfactants on the preparation of copper nanoparticles by a chemical reduction method, *Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol.* 2 (2011) 025004.
2. T. A. Gonçalves Martins, A. B. Botelho Junior, V. T. De Moraes, D.C. R. Espinosa, Study of pH Influence in the Synthesis of Copper Nanoparticles Using Ascorbic Acid as Reducing and Stabilizing Agent, in: *The Minerals, Metals & Materials Society (Ed.), TMS 2020 149th Annu. Meet. Exhib. Suppl. Proc., Springer Int. Pub., Cham, 2020*: pp. 1547–1557.
3. K. Tokarek, J. L. Hueso, P. Kuśtrowski, G. Stochel, A. Kyzioł, Green Synthesis of Chitosan-Stabilized Copper Nanoparticles, *Eur. J. Inorg. Chem.* 2013 (2013) 4940–4947.
4. M. Usman, N. Ibrahim, K. Shameli, N. Zainuddin, W. Yunus, Copper Nanoparticles Mediated by Chitosan: Synthesis and Characterization via Chemical Methods, *Molecules* 17 (2012) 14928–14936.
5. M. El Zowalaty, N. A. Ibrahim, M. Salama, K. Shameli, M. Usman, N. Zainuddin, Synthesis, characterization, and antimicrobial properties of copper nanoparticles, *Int. J. Nanomedicine* (2013) 4467.
6. M. J. Vold, Zeta potential in colloid science. Principles and applications, *J. Colloid Interface Sci.* 88 (1982) 608.
7. I. Corazzari, R. Nisticò, F. Turci, M. G. Faga, F. Franzoso, S. Tabasso, G. Magnacca, Advanced physico-chemical characterization of chitosan by means of TGA coupled on-line with FTIR and GCMS: Thermal degradation and water adsorption capacity, *Polym. Degrad. Stab.* 112 (2015) 1–9.
8. S. Atanda, O. Shaibu, F. Agunbiade, XRD analysis and antibacterial activity of Chitosan from *Archachatina marginata* shells: a novel approach to sustainable antimicrobial materials, *J. Mater. Sci. Compos.* 6 (2025).
9. M. Tsuji, Y. Yoshida, M. Matsunaga, K. Uto, M. Hattori, J.-I. Hayashi, T. Tsuji, Syntheses of Cu_2O and Cu Nanoparticles by Using a Polyol Method, 42 (2020) 27–34.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Assessment of the theoretical small hydropower potential of the Alamedin River (Kyrgyz Republic)

Kiizbaev Bekbolot Ulanbekovich, master's student
Kazakh-German University (Almaty, Kazakhstan)

The paper presents a compact reach-based assessment of the theoretical small hydropower potential of the Alamedin River in the Kyrgyz Republic. The empirical basis is the author's water-energy cadastre of the basin, supported by GIS materials and a map of basin boundaries. Twenty-two river reaches were analysed using discharge, channel slope and cumulative distance from the source. The applied calculation scheme follows the standard hydropower relationship $P = \rho g Q H$ and its derivative form for specific reach power, which are widely used in small hydropower studies and engineering manuals [1, p. 44; 3]. The total gross theoretical potential of the investigated reaches is estimated at 53.81 MW, while the mean reach power equals 2.45 MW. The results show a strong spatial concentration: the five most powerful reaches account for 53.4 % of the total value, and the ten leading reaches account for 81.2 %. At the same time, the available data are insufficient for a technical or economic feasibility study; therefore, the article is limited to theoretical potential only.

Keywords: small hydropower, theoretical hydropower potential, Alamedin River, GIS, river cadastre, Kyrgyz Republic.

1. Introduction

Hydropower remains one of the most established renewable energy technologies in the world energy system. According to IRENA, global hydropower capacity exceeded 900 GW by the beginning of the 2010s, while hydropower contributed roughly one sixth of global electricity generation [2, p. 12]. In mountainous countries, where rivers combine steep gradients with relatively high runoff, the assessment of local small hydropower resources is still important for both regional planning and engineering education.

The concept of “small hydropower” is not fully uniform across the literature. ESHA and many recent academic studies use an upper threshold of 10 MW [1, p. 10; 3]. In some national systems, however, higher thresholds are also found. This contradiction matters methodologically, because the same river may be discussed as a micro-, mini- or small-hydropower resource depending on the adopted classification. In this paper, the narrower and more common threshold of up to 10 MW per plant is accepted.

For Kyrgyzstan, such assessments are relevant because the country is mountainous and hydropower-oriented, yet many local streams and tributaries remain poorly represented in published reach-based inventories. The Alamedin River is of particular interest because it belongs to the northern slope of the Kyrgyz Ala-Too, is linked to the Bishkek area, and demonstrates a combination of steep upper reaches and increasing discharge downstream. In the author's research practice, the river was also used as a case study for constructing a water-en-

ergy cadastre and checking its calculation logic against institutional materials.

The purpose of the article is to estimate the gross theoretical hydropower potential of the Alamedin River on the basis of the author's cadastre calculations, to identify the reaches with the highest energy concentration, and to compare the result with approaches used in similar studies. The paper does not attempt to calculate installed capacity, annual generation, cost indicators or ecological constraints. If such data are not available, this is stated directly.

2. Review of Relevant Studies

The literature used in the present article can be divided into two groups: methodological sources that explain the formulas and categories of hydropower potential, and case studies that demonstrate how the approach is implemented in practice.

A key methodological source is the ESHA guide on small hydropower development. It explains the standard dependence of hydraulic power on discharge and gross head and presents the practical engineering formulation $P = Q H \gamma$, where γ is the specific weight of water [1, p. 44]. IRENA, in turn, distinguishes gross theoretical, technically exploitable and economically exploitable hydropower potential and explicitly notes that these categories should not be mixed [2, p. 12–14]. This distinction is essential for the Alamedin River case, because the available spreadsheet makes it possible to estimate theoretical values, but does not contain the full set of technical and economic parameters needed for deeper screening.

Among similar articles, Jung et al. (2021) are especially relevant. Working with three small hydropower plants in South Korea, they assessed potential in ungauged basins and discussed both theoretical and technical potential. Their selected plants had capacities from 2.214 to 2.6 MW [3]. The article is important not because the Korean values can be copied to Kyrgyzstan, but because it demonstrates a clean structure for small hydropower assessment: problem statement, method, reach or site characteristics, results, and discussion of uncertainty.

Korkovelos et al. (2018) provided a much broader GIS-based assessment for Sub-Saharan Africa. Their study covered 44 countries, analysed 712,615 km of perennial rivers, used 1,393 gauging stations for validation, and identified 15,599 potential sites with a combined technical potential of 25,221 MW [4]. The scale is entirely different, yet the article shows how spatial hydropower screening benefits from consistent reach segmentation and transparent assumptions. Another recent example is the work of Punys et al. (2023) for Uganda, where multisource geospatial data were used to identify around 500 high-energy reaches or development points, with explicit screening against protected areas and distance to the grid [5].

A more focused single-site example is provided by Bezabih (2021), who evaluated a small hydropower opportunity at the Ribb irrigation dam in Ethiopia. That study reported an average flow of 14.6331 m³/s, a net head of 70.37 m, and an average nominal power of 5.53 MW [6]. The result is again not directly comparable to Alamedin, but it illustrates an important point: once flow duration curves, head losses and machine parameters are introduced, the research moves from theoretical resource estimation to engineering feasibility. The present paper remains at the earlier stage.

3. Materials and Methods

The empirical basis of the paper is the author's water-energy cadastre of the Alamedin River compiled in spreadsheet form during master's research work [7]. The cadastre contains 22 calculation reaches and records the following variables: elevation, cumulative distance from the source, tributary catchment area, cumulative catchment area, mean discharge in the reach, channel slope, specific power, and gross reach power. The terminal values in the spreadsheet indicate a cumulative basin area of 354.97 km² and a mean annual discharge of 6.36 m³/s at the downstream end of the analysed river profile [7].

For publication purposes, the column labels of the spreadsheet require harmonisation. The raw file labels the two final indicators as "specific power, kW/km" and "power, kW". However, the applied formulas and the numerical values show that the physically consistent interpretation is MW/km for the specific indicator and MW for reach power. In other words, the publication version corrects the unit presentation while preserving the original numerical values. This is one of the main technical corrections introduced after reviewing the draft article.

The principal formula is the standard theoretical hydropower equation: $P_{th} = \rho g Q H$, where ρ is water density, g is grav-

itational acceleration, Q is discharge, and H is gross head [1, p. 44; 3]. In practical units, reach power in megawatts can be written as $P_{th} = 9.81 Q H / 1000$, where Q is in m³/s and H is in metres. For a river profile represented by a slope I and a reach length ΔL , $H = I \cdot \Delta L$. Therefore, the specific hydropower potential per kilometre of river can be written as $N_{sp} = 9.81 Q I$, expressed in MW/km, and gross theoretical reach power as $P_r = N_{sp} \cdot \Delta L_{km}$.

The study area is illustrated by the basin-boundary map prepared by the author in GIS (Figure 1). The figure is not an external literature source but an authorial research product used to spatially delimit the catchment. The analytical procedure consisted of four steps: (1) checking the spreadsheet structure and excluding summary rows from the calculation array; (2) recalculating descriptive statistics for all reaches; (3) ranking reaches by gross theoretical power; and (4) comparing the resulting pattern with the logic reported in published small hydropower studies. No turbine efficiency was applied, because the available data are insufficient for a reliable technical-potential assessment.

It is important to state the limitations explicitly. The spreadsheet contains mean discharge values, but does not contain a flow duration curve, seasonal hydrographs, environmental flow requirements, head losses, conveyance options, turbine selection, costs, or grid-connection parameters. Consequently, the present paper estimates only gross theoretical potential. Any statement about technical feasibility, annual generation, payback period, NPV or LCOE would go beyond the available evidence.

4. Results

The analysed cadastre includes 22 reaches. The cumulative profile length is 37.635 km, the terminal cumulative catchment area is 354.97 km², and the mean annual discharge at the lower end of the profile is 6.36 m³/s [7]. After harmonising the units, the total gross theoretical hydropower potential of the analysed reaches equals 53.81 MW. The mean reach power is 2.45 MW, and the mean specific power is 0.132 MW/km. The maximum gross reach power is 8.85 MW, while the maximum specific power is 0.718 MW/km.

The spatial distribution of the resource is uneven. The five most powerful reaches account for 53.4 % of the total potential, and the ten leading reaches account for 81.2 %. This concentration is one of the central findings of the article. It means that, even at the theoretical stage, a limited number of reaches control most of the hydropower value of the river.

Two different patterns can be observed. In the upper part of the river, steep gradient produces very high specific power even under relatively low discharge. This is why the reach at 7.448 km has the highest specific power, 0.718 MW/km, although its discharge is only 0.534 m³/s. Downstream, the river benefits from larger discharge, and this raises gross reach power even where the slope is more moderate. As a result, one of the most powerful reaches appears at 31.353 km, where discharge reaches 4.509 m³/s and gross theoretical power rises to 8.846 MW.

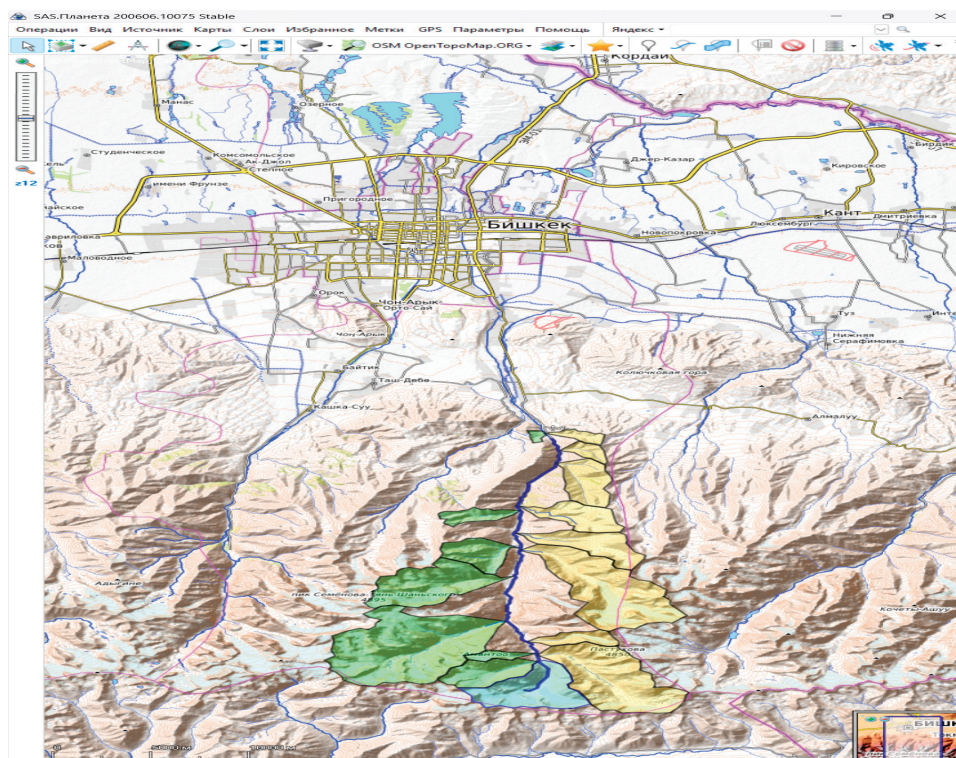


Fig. 1. Boundaries of the Alamedin River basin (source: author's GIS material)

Table 1. The eight reaches with the highest gross theoretical hydropower potential

Rank	Reach no.	Chainage, km	Q, m ³ /s	Slope, m/m	Specific power, MW/km	Gross power, MW
1	17	31.353	4.509	0.00638	0.282	8.846
2	22	37.635	6.360	0.00239	0.149	5.615
3	2	7.448	0.534	0.13695	0.718	5.348
4	11	20.785	3.571	0.00722	0.253	5.255
5	15	25.513	4.142	0.00353	0.143	3.657
6	10	17.823	2.912	0.00673	0.192	3.428
7	18	32.858	4.561	0.00213	0.095	3.132
8	7	12.490	2.275	0.01041	0.232	2.901

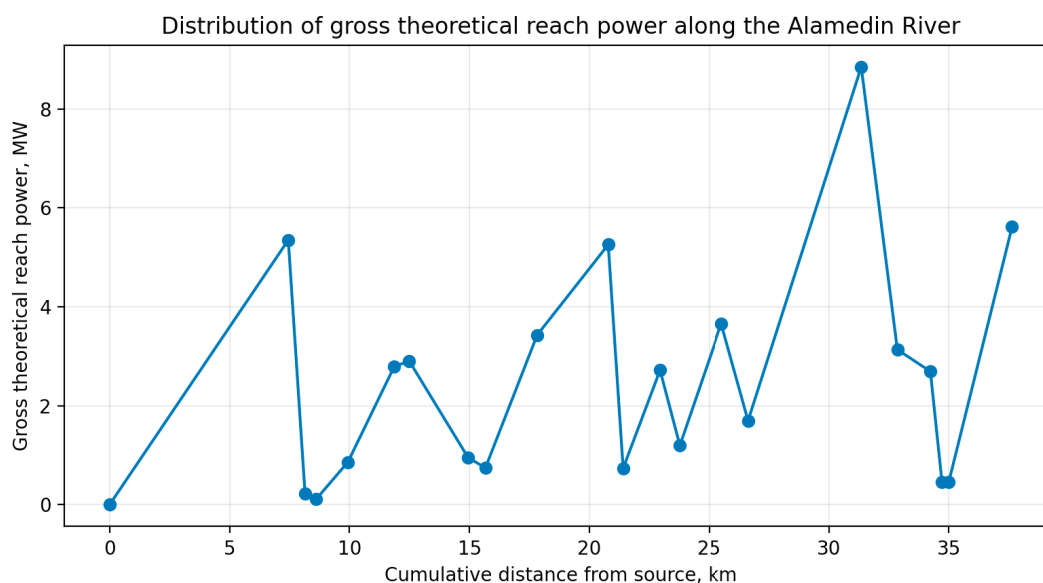


Fig. 2. Distribution of gross theoretical reach power along the Alamedin River

Table 1 confirms the concentration effect numerically. The most powerful reach is reach 17 (31.353 km from the source), with 8.846 MW, followed by reach 22 (37.635 km), with 5.615 MW, and reach 2 (7.448 km), with 5.348 MW. The fourth and fifth positions are occupied by reaches 11 and 15, with 5.255 and 3.657 MW respectively. These values are high enough to justify detailed follow-up screening, but not high enough to justify immediate engineering conclusions without additional hydrological and topographic data.

A final result worth stressing is the difference between the mean specific indicator and the mean reach indicator. The average specific power of 0.132 MW/km characterises the energy density of the river profile. The average reach power of 2.45 MW reflects both energy density and actual reach length. For publication purposes, this distinction is more informative than reporting only a single aggregate number.

5. Discussion

The obtained result should be interpreted as a theoretical upper estimate rather than as a ready project portfolio. This distinction is supported by the literature. IRENA explicitly separates theoretical, technical and economic potential [2, p. 12–14]. Jung et al. (2021) moved beyond theoretical estimation because they had site-specific information for existing or planned facilities [3]. Punys et al. (2023) added spatial constraints such as protected areas and proximity to the electricity grid [5]. In the Alamedin case, those additional filters are currently absent, so any direct conversion of 53.81 MW into feasible installed capacity would be methodologically incorrect.

Still, the result is useful. First, it identifies where future work should be concentrated. Second, it shows that different parts of the river perform differently: steep upper reaches dominate the specific indicator, while lower reaches with larger discharge contribute strongly to total gross power. Third, it helps distinguish between two research tasks that are often confused in student work: the mapping of a river's energy resource and the preparation of a hydropower feasibility study. The first task has been completed here; the second requires more data.

A comparison with similar studies reinforces this point. The Korean cases analysed by Jung et al. (2021) involved plants with capacities between 2.214 and 2.6 MW [3]. In the Ethiopian case analysed by Bezabih (2021), the average nominal power reached 5.53 MW [6]. By contrast, the Alamedin River assessment yields a chain of theoretical reach values, not final plant capacities. Some individual reaches lie in a comparable magnitude range, yet this does not mean that equivalent proj-

ects can be built there. The available evidence is insufficient for that claim.

The article also reveals an educationally important issue: spreadsheet hydropower cadastres require critical review before publication. In the initial working file, the last two columns were labelled in kW/km and kW, while the formulas and values corresponded to MW/km and MW. Such inconsistencies are common in student-generated engineering tables. Correcting them is not a minor editorial change but a substantive scientific requirement. The practical lesson is clear: every table heading and unit must be checked against the embedded formula, not only against habit.

Finally, the study reflects a real educational practice in applied water and energy research. The cadastre was produced as part of master's work and cross-checked during research training related to hydropower analysis. This kind of university-practice linkage is valuable because it trains students to move from Excel computation to scientific interpretation. At the same time, the publication format forces an additional discipline: clear terminology, explicit limits of inference, and comparison with the literature rather than reliance on raw calculations alone.

6. Conclusion

The article presented a reach-based assessment of the gross theoretical small hydropower potential of the Alamedin River using the author's water-energy cadastre and GIS materials. After harmonising the spreadsheet units and analysing 22 reaches, the total gross theoretical potential was estimated at 53.81 MW. The resource is unevenly distributed: five reaches account for 53.4 % of the total potential, and ten reaches account for 81.2 %.

The main methodological conclusion is that the Alamedin River spreadsheet can support a scientifically defensible estimate of theoretical potential, but not a full technical or economic feasibility study. Data are insufficient for head-loss calculations, seasonal reliability assessment, turbine selection, environmental-flow analysis, and financial evaluation. Therefore, the present result should be treated as a first-stage screening output.

For a first student article, this scope is adequate and academically honest. The next logical step is not to inflate the result, but to narrow further work to the strongest reaches and supplement the cadastre with hydrological verification, topographic profiling, environmental constraints and cost data. Only after that would estimates of technical potential, annual generation and economic performance become methodologically justified.

References:

1. European Small Hydropower Association. Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant. Brussels: ESHA, 2004.
2. International Renewable Energy Agency. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. Hydropower. Abu Dhabi: IRENA, 2012.
3. Jung S., Bae Y., Kim J., Joo H., Kim H. S., Jung J. Analysis of Small Hydropower Generation Potential: (1) Estimation of the Potential in Ungaged Basins // *Energies*. 2021. Vol. 14. No. 11. Article 2977.

4. Korkovelos A., Mentis D., Siyal S. H., et al. A Geospatial Assessment of Small-Scale Hydropower Potential in Sub-Saharan Africa // *Energies*. 2018. Vol. 11. No. 11. Article 3100.
5. Punys P., Dumbrasukas A., Kvaraciejus A., Vyciene G. Small Hydropower Assessment of Uganda Based on Multisource Geospatial Data // *Water*. 2023. Vol. 15. No. 11. Article 2051.
6. Bezabih B. Evaluation of Small Hydropower Plant at Ribb Irrigation Dam in Amhara Regional State, Ethiopia // *Journal of the Ethiopian Institution of Water Resources*. 2021. Vol. 1. Article 5.
7. Kiizbaev B. Water-Energy Cadastre of the Alamedin River: author's spreadsheet calculations. Unpublished dataset, 2026.

Аэрогелевые материалы: классификация, сферы применения, анализ рынка

Рузов Максим Олегович, студент магистратуры

Научный руководитель: Иванова Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

В статье представлен всесторонний анализ рынка аэрогелевых материалов, их классификации и сферы применения. Произведена классификация изделий на основе аэрогелей по нескольким признакам: химическому составу (кремниевые, углеродные, оксидные, полимерные, композитные), функциональному назначению (теплоизоляция, звукоизоляция, адсорбенты, носители катализаторов, оптические элементы, электроды) и области применения (строительство, нефтегазовая промышленность, аэрокосмическая отрасль, электроника, медицина, экология).

Особое внимание уделено состоянию мирового и российского рынков аэрогелевых материалов: Региональные лидеры — Северная Америка, Европа и Азиатско-Тихоокеанский регион. В России рынок находится в начальной стадии формирования.

Обзор участников рынка включает как международных производителей (Aspen Aerogels, Cabot Corporation, Matsushita Electric, Joda New Materials), так и российских научных институтов, занимающихся разработками и опытным производством.

Ключевые слова: аэрогель, теплоизоляция, нанопористые материалы, рынок аэрогелей, инновационные материалы.

Аэрогели — уникальные нанопористые материалы с плотностью, близкой к плотности воздуха, и рекордно низкой теплопроводностью. Благодаря сочетанию высокой пористости (до 99,8 %) и низкой плотности (0,003–0,5 г/см³) они находят применение в различных отраслях промышленности. [2]

Изделия на основе аэрогелей можно классифицировать по нескольким критериям:

1. По химическому составу:

- кремниевые (на основе SiO₂) — наиболее распространённые, обладают высокой прозрачностью и низкой теплопроводностью [2] [5];
- углеродные — электропроводящие, с высокой адсорбционной способностью [2];
- оксидные (Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃ и др.) — термостойкие и каталитически активные [2];
- полимерные (резорцинолформальдегидные, полиуретановые) — эластичные и ударопрочные [2];
- композитные — сочетают свойства разных материалов [9].

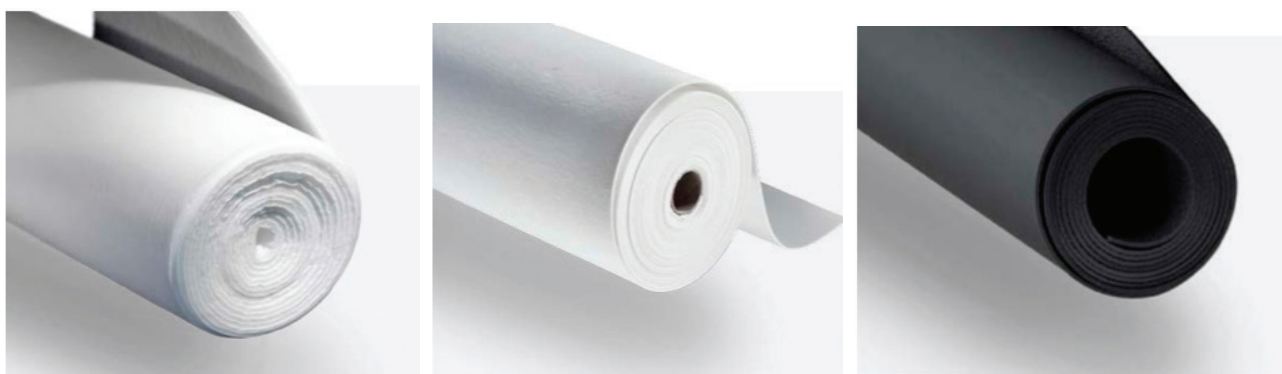


Рис. 1. Аэрогель на основе стеклохолста; аэрогель на основе холста из керамического волокна; аэрогель на основе карбонового волокна

2. По функциональному назначению:

- теплоизоляционные материалы [5] [6];
- звукоизоляционные панели [9];
- адсорбенты и фильтры [2];
- носители катализаторов [2];
- оптические элементы [7];
- электроды для суперконденсаторов.

3. По областям применения:

- строительство (теплоизоляция зданий, труб, резервуаров) [8];
- нефтегазовая промышленность (изоляция нефтепроводов, СПГ терминалов) [5];
- аэрокосмическая отрасль (теплозащита космических аппаратов) [9];
- электроника (диэлектрики, подложки) [7];
- медицина (фильтры, носители лекарств) [2];
- экология (сорбенты для очистки воды от нефти и тяжёлых металлов) [2].

На строительном рынке представлены следующие основные виды изделий:

- Рулоны и маты (например, Aspen Aerogels Pyrogel XT) — гибкие теплоизоляционные материалы с армированием стекловолокном. Применяются для изоляции трубопроводов, оборудования, строительных конструкций.



Рис. 2. Аэрогелевое полотно WE650 и WE450

- Плиты и панели (например, Cabot Corporation Nanogel) — жёсткие теплоизоляционные элементы для строительства. Обладают высокой прочностью и низкой теплопроводностью.

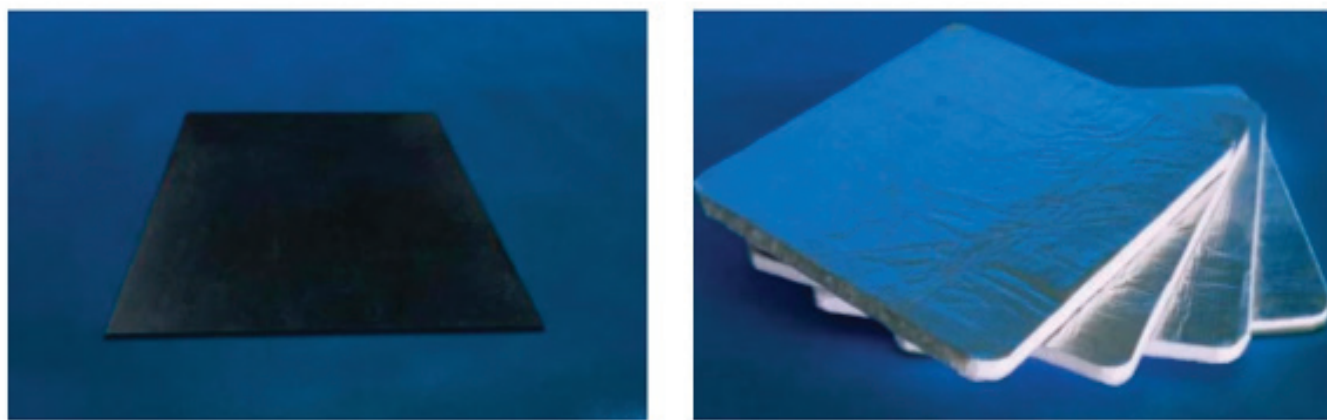


Рис. 3. Аэрогелевое полотно с карбоновым волокном и изоляционный войлок из аэрогеля

- Гранулированные материалы — используются как насыпная изоляция, наполнитель для композитов, сорбенты.
- Покрывания и краски с добавлением частиц аэрогеля — создают тонкий теплоизоляционный слой на поверхностях сложной формы.

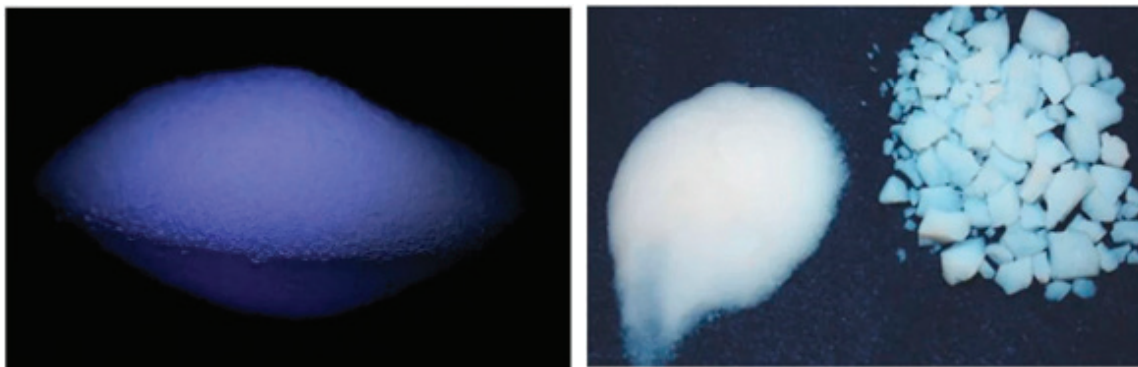


Рис. 4. Порошок/частицы nano-аэрогеля

— Специализированные изделия для экстремальных условий (криогенная изоляция, огнезащита).

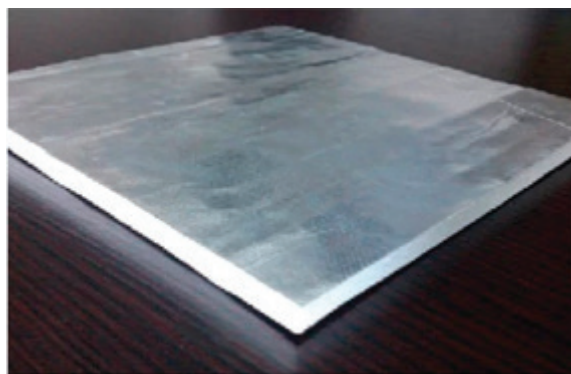


Рис. 5. Модульная огнеупорная изоляция

Объём мирового рынка аэрогелей в 2026 году оценивался в ~450 млн долларов США. Прогнозируемый среднегодовой темп роста (CAGR) на период 2027–2030 гг. — 12–15 %. Ключевые регионы: Северная Америка (США, Канада), Европа (Германия, Франция), Азиатско-Тихоокеанский регион (Китай, Япония, Южная Корея).

Основные факторы, которые способствуют развитию аэрогелей в строительстве: ужесточение требований к энергоэффективности зданий; развитие нефтегазовой отрасли (особенно СПГ-проектов); рост спроса на лёгкие и прочные материалы в аэрокосмической отрасли; экологические инициативы по снижению выбросов CO₂.

Российский рынок аэрогелей находится на стадии формирования. Объём рынка в 2026 году — около 5–7 млн долларов США (менее 2 % мирового). Основные потребители: нефтегазовый сектор (изоляция трубопроводов), строительство (энергоэффективные здания), научные исследования.

Участники рынка:

- отечественные научные институты (ИХФ РАН, ИФТТ РАН, ИК СО РАН);
- малые инновационные предприятия, производящие опытные партии;
- дистрибьюторы зарубежных производителей (Aspen Aerogels, Cabot Corporation).

Основные производители строительных материалов на основе аэрогеля:

- Aspen Aerogels (США) — лидер рынка, специализируется на гибких аэрогелевых матах для промышленности.
- Cabot Corporation (США) — производит гранулированные аэрогели Nanogel.
- Matsushita Electric (Япония) — разрабатывает аэрогели для электроники.
- Joda New Materials (Китай) — крупный производитель кремниевых аэрогелей.
- российские научные центры — выпускают опытные партии для НИОКР.

Ключевые тренды рынка:

- снижение стоимости производства за счёт совершенствования технологий сверхкритической сушки;
- разработка гибких и эластичных аэрогелевых материалов;
- создание композитных аэрогелей с заданными свойствами (гидрофобность, электропроводность);
- расширение применения в строительстве и ЖКХ;
- рост спроса в сегменте электромобилей (теплоизоляция батарей);
- развитие «зелёных» технологий и экологических материалов.

Перспективные направления производства аэрогелей:

- аэрогели с фотокаталитическими свойствами для очистки воздуха;
- биосовместимые аэрогели для медицины и биотехнологий;
- умные аэрогели с сенсорными функциями;
- аэрогелевые композиты для 3Дпечати.

Дальнейшее развитие технологий производства аэрогелей позволит расширить их использование в промышленности и строительстве, способствуя повышению энергоэффективности и экологической безопасности.

Аэрогели представляют собой перспективный класс наноматериалов с уникальными теплоизоляционными и другими функциональными свойствами, что делает их актуальными для различных отраслей промышленности и строительства.

Рынок аэрогелевых материалов демонстрирует устойчивый рост, особенно в развитых странах, благодаря развитию технологий производства и повышенному спросу на энергоэффективные решения.

В России рынок находится на начальной стадии развития, однако обладает значительным потенциалом, особенно в нефтегазовой и строительной сферах, что создаёт возможности для расширения производства и внедрения аэрогелей.

Основные барьеры для широкого внедрения — высокая себестоимость производства и технологические сложности, требующие дальнейших научных и инженерных решений.

Перспективы развития связаны с созданием новых составов, снижением стоимости производства, расширением сфер применения и внедрением инновационных аэрогелевых технологий, таких как фотокаталитические и биосовместимые материалы.

Дальнейшее развитие технологий производства и расширение ассортимента аэрогелевых изделий будут способствовать повышению энергоэффективности зданий, снижению экологического воздействия и развитию новых отраслей, таких как медицина, электроника и экологические технологии.

Литература:

1. Kistler S. S. Coherent Expanded Aerosols and Gels // *Nature*. 1931. Vol. 127. P. 741. — основополагающая работа по аэрогелям, где впервые описаны принципы их получения.
2. Смирнов Б. М. Аэрогели // *Успехи физических наук*. 1987. Т. 152. Вып. 1. С. 133–157. — обзор свойств, методов получения и перспектив применения аэрогелей.
3. ISO 14025:2010. Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures. — международный стандарт для составления экологических деклараций продукции (EPD), применимый в т.ч. к аэрогелевым материалам.
4. EN 15804:2019+A1:2021. Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products. — европейский стандарт расчёта экологических показателей строительных материалов.
5. Aspen Aerogels, Inc. Pyrogel XT Technical Data Sheet. Revision 10. 2023. — официальный технический паспорт гибких матов с аэрогелем: данные по теплопроводности, диапазону рабочих температур, огнестойкости.
6. Cabot Corporation. Nanogel Aerogel Insulation: Product Specifications & Safety Data Sheet. 2022. — документация на гранулированные кремниевые аэрогели: физикохимические характеристики и рекомендации по применению.
7. Advanced Glazings Ltd. SOLERA® with Lumira® Aerogel: Product Brochure & Technical Guide. 2022. — описание светопрозрачных конструкций с интегрированным аэрогелем Lumira, данные по энергоэффективности.
8. Кадырбеков А. Ж., Рекунов В. С. Инновационные материалы на основе аэрогеля в строительстве // *Научнопрактический электронный журнал «Аллея Науки»*. 2022. № 4(67). — анализ применения аэрогелей в строительной отрасли, сравнение с традиционными изоляционными материалами.
9. Фаликман В. Р. Наноматериалы и нанотехнологии в производстве строительных материалов // *Строительные материалы*. 2013. № 9. С. 77–81. — обзор современных наноструктурированных материалов, включая аэрогели, и возможностей их внедрения в строительную индустрию.

Оптимизация систем теплозащиты трубопроводов

Рузов Максим Олегович, студент магистратуры

Научный руководитель: Иванова Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Статья посвящена вопросам оптимизации систем теплоизоляции трубопроводов и моделирования тепловых процессов в различных эксплуатационных условиях. В ней рассматриваются современные методы анализа тепловых потерь, создание тепловых расчетных моделей и применение компьютерных программных комплексов для повышения энергоэффективности и надежности трубопроводных систем. Особое внимание уделяется использованию методов численного анализа, таких как метод конечных элементов, а также интеграции цифровых двойников для многокритериальной оптимизации параметров теплоизоляции. В статье представлены отечественные и зарубежные программные продукты, применяемые для моделирования тепловых процессов, включая ANSYS Fluent, MATLAB Simulink, Pipe Flow Expert и TERA-SOL. Также рассматриваются основные показатели эффективности трубопровода, такие как коэффициент полезного действия, потеря давления и тепловые потери. Проведен анализ современных подходов к оптимизации теплоизоляционных систем с целью минимизации затрат энергии, повышения надежности и долговечности инженерных коммуникаций.

Ключевые слова: теплоизоляция, трубопроводы, моделирование, оптимизация.

Оптимизация систем теплозащиты трубопроводов и моделирование тепловых процессов в различных условиях являются важными направлениями в обеспечении энергоэффективности и надежности эксплуатации инженерных коммуникаций. Основная цель оптимизации — это минимизация тепловых потерь, поддержание необходимой температуры транспортируемых веществ, защита труб от коррозии и продление срока эксплуатации трубопроводных систем. Для достижения этих целей разрабатываются и внедряются современные материалы и конструкции теплоизоляции, учитывающие особенности эксплуатации, климатические условия и технологические требования.

К методам оптимизации можно отнести [1]:

- тепловые расчетные модели, для анализа тепловых потоков и определения оптимальной толщины изоляции.
- индикаторы эффективности (коэффициенты теплопотерь) в оценке систем теплоизоляции.
- оценка затрат на установку изоляции против эксплуатационных затрат на нагрев и сохранение тепла.

Моделирование тепловых процессов в трубопроводах включает создание математических и численных моделей, позволяющих предсказывать распределение температуры, тепловые потери и влияние внешних факторов на динамику теплопередачи. Использование компьютерных методов и программных комплексов позволяет анализировать различные сценарии эксплуатации, оптимизировать параметры теплоизоляции и выбирать наиболее эффективные решения, учитывая положение трубопровода относительно источников тепла и холода, сокращая потери минимальными поворотами и переходами трубопровода при проектировании.

Важным аспектом является также моделирование условий воздействия экстремальных температурных режимов, влажности и механических нагрузок, что способствует повышению надежности и безопасности трубопроводных систем в различных климатических зонах и технологических условиях.

Программы для моделирования тепловых процессов в России [2]:

1. ANSYS Fluent — мощное программное обеспечение для вычислительного моделирования течений и тепловых процессов. Используется для анализа теплообмена, аэродинамики и других сложных физических явлений.
2. MATLAB Simulink — платформа для моделирования и симуляции систем, включая тепловые процессы. Позволяет создавать модели на основе математических уравнений и проводить их анализ.
3. Pipe Flow Expert — специализированное программное обеспечение для моделирования теплообмена и гидравлических расчетов в трубопроводных системах.
4. TERA-SOL — российское программное обеспечение, предназначенное для моделирования тепловых процессов и теплообмена в различных инженерных системах.

ANSYS Fluent (Разработана компанией ANSYS, Inc. в 1980-х годах. На российском рынке широко используется с 1990-х годов.)

Достоинства: высокая точность и надежность моделирования, поддержка широкого спектра физических процессов и сложных условий, большое сообщество пользователей и обширная документация, возможность интеграции с другими программными продуктами ANSYS.

Недостатки: высокая стоимость лицензий, требовательность к аппаратным ресурсам.

MATLAB и Simulink (Появился в 1984 году, активно используется в России с 1990-х годов.) Достоинства: простота использования для математического моделирования, гибкость в создании моделей, возможность интеграции с другими инструментами MATLAB, подходит для системного и динамического моделирования.

Минусы: ограниченное применение для сложных CFD-расчетов по сравнению с Fluent, высокая стоимость лицензий, требует знания MATLAB и системного моделирования.

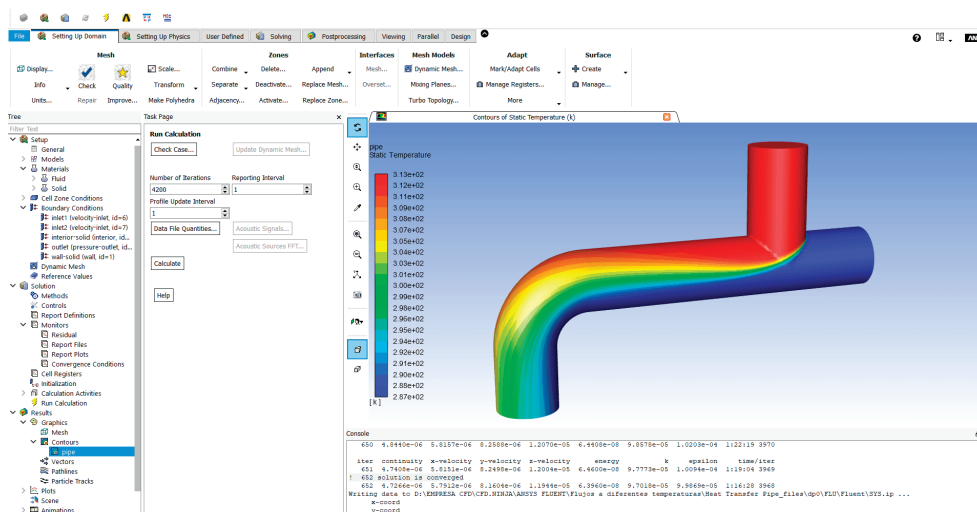


Рис. 1. Программа для моделирования ANSYS Fluent

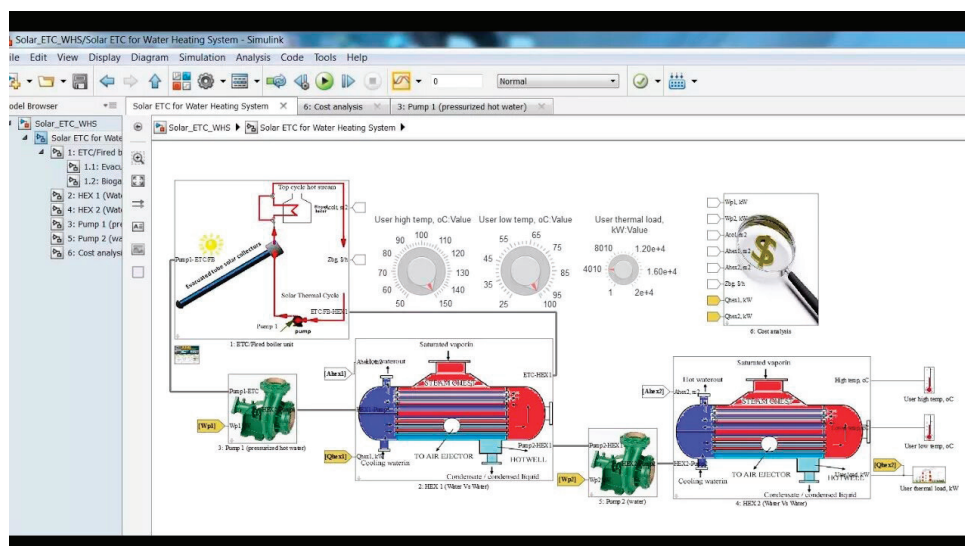


Рис. 2. Программа для моделирования MATLAB Simulink

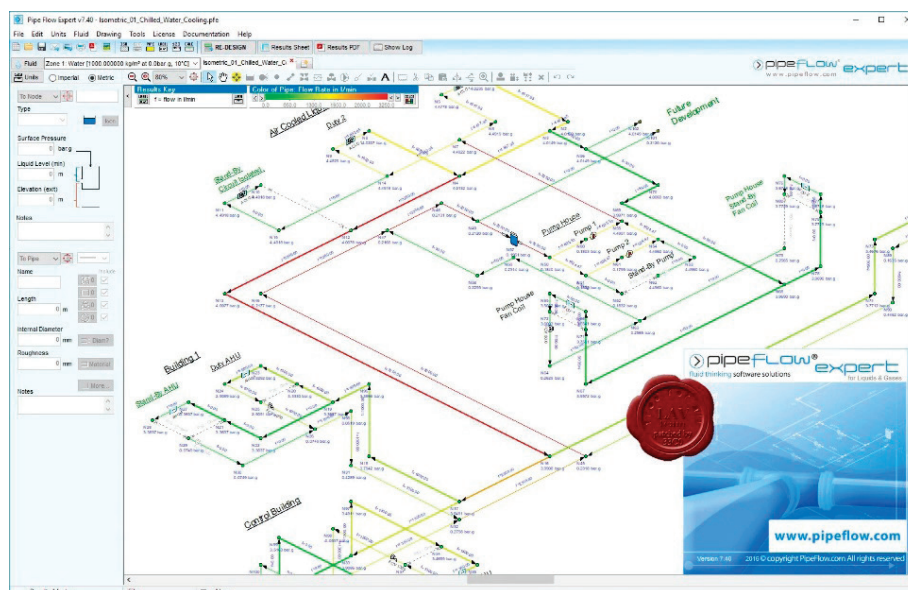


Рис. 3. Программа для моделирования Pipe Flow Expert

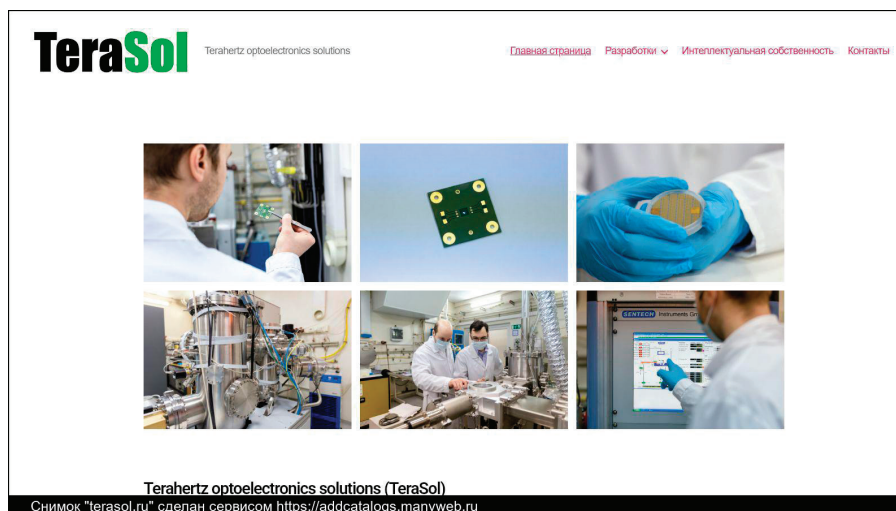


Рис. 4. Программа для моделирования Terasol

Pipe Flow Expert (Разработан российскими компаниями, примерно в начале 2000-х годов.)

Достоинства: специализация на гидравлике и теплообменных системах в трубопроводах, удобный интерфейс для инженеров-теплоэнергетиков, быстрый расчет гидравлики и теплообмена в трубных системах.

Недостатки: Ограничена область применения (в основном, трубопроводы), Меньшее сообщество и ограниченная модельная база по сравнению с Fluent.

TERASOL (Появился в России в начале 2000-х годов, развивается как отечественный продукт.)

Достоинства: российское программное обеспечение, адаптированное под российский рынок, хорошо подходит для моделирования теплообмена в различных системах, меньшая стоимость по сравнению с международными аналогами.

Недостатки: меньшее распространение и сообщество пользователей, меньше возможностей для сложных CFD-расчетов по сравнению с Fluent.

В Европе используют программы COMSOL Multiphysics (для научных исследований промышленного применения), TRNSYS (в исследованиях энергоэффективности), AFT Fathom (для анализа трубопроводных систем и их оптимизации).

Предпочтения в выборе программ различаются спецификой отрасли и норм, экологическими и энергетическими решениями.

Оптимизация систем теплозащиты трубопроводов на основе цифрового моделирования, рассмотрена в статье Карпова Н. В., Кулиненко А. Ю. включает использование методов численного анализа, таких как метод конечных элементов (МКЭ). Этот подход позволяет создавать высокоточные модели распределения температур, тепловых потоков и напряжений внутри конструкции теплоизоляции и окружающей среды [2].

Модели, построенные по методу конечных элементов, позволяют имитировать реальные условия эксплуатации, включая изменение климатических факторов, влажность,

динамику тепловых нагрузок и механических воздействий. Это дает инженерам возможность анализировать теплообмен в различных сценариях, выявлять критические зоны с повышенными тепловыми потерями, а также оценивать воздействие различных конфигураций изоляционных слоев.

Благодаря интеграции МКЭ с концепцией цифровых двойников и мультифизического моделирования, можно проводить многокритериальную оптимизацию параметров системы теплоизоляции. Это включает подбор толщины и состава слоев, материалов с учетом их теплопроводности, а также стратегий утепления и вентиляции для минимизации затрат энергии и повышения надежности системы в условиях переменных эксплуатационных факторов.

Основные индикаторы эффективности трубопровода [3]:

— Коэффициент полезного действия (КПД): Оценка общего уровня потерь энергии и эффективности транспортировки. Чем выше КПД, тем меньше потерь и лучше работа трубопровода.

— Потеря давления (ΔP): Измеряет снижение давления в системе из-за трения, коррозии и других факторов. Низкие потери давления свидетельствуют о хорошем состоянии трубопровода.

— Коэффициент потерь тепла: Отношение тепловых потерь к передаваемой энергии. Важен для систем теплоносителей и горячих линий.

— Удельные расходы энергии (на транспортировку единицы продукта): Энергозатраты на перемещение определенного объема или массы вещества. Низкие показатели свидетельствуют об экономичности.

— Степень износа и коррозии: Оценка состояния металла и возможных повреждений. Влияет на безопасность и долговечность.

— Объем пропущенного или утекшего продукта: Потери из-за утечек, аварий или неправильной эксплуатации. Важный показатель экологической безопасности и экономической эффективности.

— Время безотказной работы (надежность): Показатель надежности системы за определенный период. Чем выше, тем лучше эффективность эксплуатации.

— Объем перекачиваемого продукта: Производительность системы. Оценивает способность трубопровода удовлетворять потребности.

Выводы:

Оптимизация систем теплоизоляции трубопроводов является важным направлением повышения энергоэффективности и эксплуатации инженерных систем. Использование современных программных комплексов и методов численного моделирования, особенно метода конечных элементов, позволяет создавать высокоточные модели распределения температур и тепловых

потоков. Интеграция моделирования с концепцией цифровых двойников и мультифизического моделирования дает возможность проводить многокритериальную оптимизацию параметров теплоизоляции, что способствует снижению затрат и повышению надежности систем.

Основные показатели эффективности, такие как КПД, потери давления и тепловые потери, являются важными критериями оценки состояния и эффективности работы трубопроводных систем.

В условиях российского рынка предпочтение отдается отечественным программным продуктам, таким как TERASOL и Pipe Flow Expert, благодаря их адаптированности к местным условиям и стоимости.

Литература:

1. Колосов М. В., Михайленко С. А. Сравнительный анализ методов оптимизации параметров и конфигураций тепловых сетей // Вестник КрасГАУ. 2011. № 9
2. Карпов Н. В., Кулиненко А. Ю. Оптимизация систем теплозащиты трубопроводов на основе цифрового моделирования // Вестник науки. 2025. № 12
3. Продоус О. А., Шлычков Д. И. Оценка гидравлической эффективности эксплуатации трубопроводов — новое научное направление в сфере водоснабжения и водоотведения // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2024. № 4.
4. Январев, И. А., Татевосян, А. А., Сентемов, Д. В., Божко, И. С. Цифровое моделирование при проектировании теплотехнических систем и теплоэнергетических установок. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. — 228 с

Влияние условий твердения и защитного покрытия на свойства дорожного бетона

Семенов Николай Геннадьевич, студент магистратуры

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

В статье приведены результаты лабораторного исследования дорожного бетона, предназначенного для работы в условиях транспортных нагрузок, переменного увлажнения, высушивания и морозного воздействия [3–5]. Рассмотрены два состава бетонной смеси: контрольный состав и состав с защитным покрытием. Для каждого состава испытаны две серии образцов: образцы, твердевшие в нормальных условиях, и образцы, подвергавшиеся после начального твердения попеременному увлажнению и высушиванию. Оценивались прочность при изгибе, прочность при сжатии, плотность, водопоглощение, истираемость и морозостойкость [3–5]. Установлено, что переменное увлажнение и высушивание существенно ухудшает показатели контрольного состава: прочность при изгибе снизилась на 18,8 %, прочность при сжатии — на 13,4 %, водопоглощение увеличилось на 61,9 %, а марка морозостойкости снизилась с F₂ 300 до F₂ 200. Состав с защитным покрытием показал более стабильные результаты: снижение прочности при изгибе и сжатии составило около 2,8 %, а рост водопоглощения — 16,4 %. Наиболее благоприятное сочетание свойств получено у состава № 2 серии 2.1, который имел прочность при изгибе 7,1 МПа, прочность при сжатии 53,7 МПа, водопоглощение 3,71 %, истираемость 0,700 г/см² и марку морозостойкости F₂ 300.

Ключевые слова: *дорожный бетон, цементобетонное покрытие, защитное покрытие, прочность при изгибе, водопоглощение, истираемость, морозостойкость, долговечность.*

Введение

Дорожный бетон является материалом, работающим в условиях комплексного воздействия транспортных, климатических и химических факторов. В отличие от бетонов общего строительного назначения, бетон дорожного по-

крытия должен обеспечивать не только высокую несущую способность, но и устойчивость к изгибающим напряжениям, циклическому замораживанию и оттаиванию, водонасыщению, действию противогололедных реагентов и истиранию колесами транспорта. Поэтому оценка дорожного бетона только по прочности при сжатии явля-

ется недостаточной. Для прогноза долговечности необходимо учитывать комплекс характеристик: прочность при изгибе, плотность, водопоглощение, истираемость и морозостойкость [3–5].

Актуальность исследования связана с повышением требований к срокам службы дорожных покрытий и необходимостью применения материалов, устойчивых к неблагоприятным условиям эксплуатации. Для регионов с частыми переходами температуры через 0 °C особое значение приобретают показатели водопоглощения и морозостойкости. Вода, проникающая в поровую структуру бетона, при замерзании создает внутреннее давление, способствует развитию микротрещин и снижает сопротивление бетона истиранию [2–4]. Дополнительным фактором является механический износ верхнего слоя покрытия, особенно при воздействии шипованных шин.

Одним из способов повышения долговечности дорожного бетона является применение пластифицирующих добавок и защитных покрытий [3–5]. Пластифицирующие добавки на основе поликарбоксилатов позволяют снизить водоцементное отношение при сохранении удобоукладываемости смеси, что способствует формированию более плотной структуры цементного камня. Средства ухода и защитные покрытия уменьшают испарение влаги, улучшают условия гидратации цемента и могут снижать чувствительность бетона к неблагоприятным влажностным воздействиям [3–5].

Целью работы является анализ влияния условий твердения и защитного покрытия на физико-механические и эксплуатационные свойства дорожного бетона по результатам лабораторных испытаний.

Материалы и методы

В работе исследовались два состава бетонной смеси. Расход основных компонентов на 1 м³ был одинаковым: цемент — 390 кг, песок — 820 кг, щебень — 1040 кг, вода — 140 кг. Отличие составов заключалось в расходе добавки и применении защитного покрытия: для состава № 1 расход добавки составлял 3,12 кг, для состава № 2 — 3,9 кг. В качестве пластифицирующей добавки применялась добавка на основе поликарбоксилатов Sika® ViscoCrete®-200.

Для ухода и защиты поверхности применялся состав Sikafloor® CC 721.

Перед изготовлением бетонных образцов были проанализированы заполнители. Для песка строительного установлен модуль крупности 2,30, содержание пылевидных и глинистых частиц составило 1,15 %. Для гранитного щебня фракции 5–20 мм определены полные остатки на контрольных ситах: 99,58 % на сите 2,5 мм, 97,56 % на сите 5,0 мм, 57,82 % на сите 12,5 мм, 4,32 % на сите 20,0 мм и 0,30 % на сите 25,0 мм. Полученные значения соответствуют установленным требованиям к зерновому составу фракции [1].

Испытывались четыре серии образцов. Состав № 1 серия 1.1 представлял собой контрольный состав, твердевший в нормальных условиях. Состав № 1 серия 1.2 после 7 суток твердения в нормальных условиях подвергался попеременному высушиванию и увлажнению. Состав № 2 серия 2.1 представлял собой состав с защитным покрытием, твердевший в нормальных условиях. Состав № 2 серия 2.2 после 7 суток нормального твердения также подвергался попеременному высушиванию и увлажнению.

Комплекс испытаний включал определение прочности при изгибе, прочности при сжатии, плотности, водопоглощения по массе, истираемости и морозостойкости [2–5]. Каждый показатель определялся по трем образцам с расчетом среднего значения. Истираемость рассчитывалась по потере массы, отнесенной к площади поверхности образца. Морозостойкость оценивалась dilatометрическим методом по максимальному относительному увеличению разности объемных деформаций [2].

Результаты и обсуждение

Сводные результаты испытаний приведены в таблице 1.

По прочности при изгибе наилучший результат показал состав № 2 серии 2.1–7,1 МПа. Состав № 1 серии 1.1 и состав № 2 серии 2.2 имели одинаковое среднее значение 6,9 МПа. Минимальная прочность при изгибе получена у состава № 1 серии 1.2–5,6 МПа. Следовательно, попеременное увлажнение и высушивание наиболее заметно повлияло на контрольный состав. Для состава № 1 снижение

Таблица 1. Средние значения показателей исследованных серий

Состав и серия	Изгиб, МПа	Сжатие, МПа	Плотность, кг/м ³	Водопоглощение, %	Истираемость, г/см ²	Морозостойкость
Состав № 1 серия 1.1	6,9	53,9	2500	3,67	0,701	F ₂ 300
Состав № 1 серия 1.2	5,6	46,7	2446	5,94	0,830	F ₂ 200
Состав № 2 серия 2.1	7,1	53,7	2484	3,71	0,700	F ₂ 300
Состав № 2 серия 2.2	6,9	52,2	2481	4,32	0,803	F ₂ 200

прочности при изгибе составило 18,8 %, тогда как для состава № 2 — только 2,8 %.

По прочности при сжатии максимальное значение получено у состава № 1 серии 1.1–53,9 МПа. Близкий результат имел состав № 2 серии 2.1–53,7 МПа. После циклического воздействия прочность контрольного состава снизилась до 46,7 МПа, а состава с покрытием — до 52,2 МПа. Таким образом, снижение прочности при сжатии у контрольного состава составило 13,4 %, а у состава с покрытием — 2,8 %. Это подтверждает, что защитное покрытие и повышенный расход добавки способствовали сохранению прочностных характеристик [3–5].

Плотность бетона также изменилась под влиянием условий выдерживания. Наибольшая средняя плотность получена у состава № 1 серии 1.1–2500 кг/м³. После циклического увлажнения и высушивания плотность контрольного состава снизилась до 2446 кг/м³, то есть на 54 кг/м³. Для состава № 2 изменение плотности было незначительным: с 2484 до 2481 кг/м³. Это указывает на большую стабильность структуры состава с покрытием.

Особое значение для дорожного бетона имеет водопоглощение. Минимальные значения были получены у серий, твердевших в нормальных условиях: 3,67 % для состава № 1 серии 1.1 и 3,71 % для состава № 2 серии 2.1. После переменного увлажнения и высушивания водопоглощение контрольного состава увеличилось до 5,94 %, а состава с покрытием — до 4,32 %. Рост водопоглощения контрольного состава составил 61,9 %, тогда как

для состава с покрытием — 16,4 %. Это является одним из наиболее показательных результатов исследования, так как водопоглощение напрямую связано с открытой пористостью и потенциальной морозостойкостью материала [2–4].

Истираемость в нормальных условиях у обоих составов была практически одинаковой: 0,701 г/см² для состава № 1 и 0,700 г/см² для состава № 2. После циклического воздействия истираемость увеличилась до 0,830 г/см² у контрольного состава и до 0,803 г/см² у состава с покрытием. Увеличение истираемости составило 18,4 % и 14,7 % соответственно. Следовательно, переменное увлажнение и высушивание снижает сопротивление бетона поверхностному износу, однако состав с покрытием сохраняет несколько более высокий уровень стойкости [3–5].

Результаты испытаний на морозостойкость показали, что серии, выдержанные в нормальных условиях, соответствуют марке F₂ 300. После воздействия переменного увлажнения и высушивания марка морозостойкости обеих серий снизилась до F₂ 200. Среднее относительное увеличение разности объемных деформаций составило 0,133×10⁻³ для состава № 1 серии 1.1, 0,287×10⁻³ для состава № 1 серии 1.2, 0,140×10⁻³ для состава № 2 серии 2.1 и 0,293×10⁻³ для состава № 2 серии 2.2.

Для более наглядной оценки влияния условий выдерживания рассчитаны относительные изменения показателей при переходе от нормального твердения к переменному увлажнению и высушиванию.

Таблица 2. Изменение свойств после переменного увлажнения и высушивания

Показатель	Состав № 1	Состав № 2
Прочность при изгибе	–18,8 %	–2,8 %
Прочность при сжатии	–13,4 %	–2,8 %
Плотность	–2,16 %	–0,12 %
Водопоглощение	+61,9 %	+16,4 %
Истираемость	+18,4 %	+14,7 %
Морозостойкость	F ₂ 300 → F ₂ 200	F ₂ 300 → F ₂ 200

Полученные данные показывают, что переменное увлажнение и высушивание оказывает комплексное отрицательное влияние на бетон [4]. Наиболее чувствительными показателями оказались водопоглощение и прочность при изгибе. Это закономерно, так как увлажнение и высушивание способствует развитию микродефектов, изменению поровой структуры и снижению сцепления между цементным камнем и заполнителем. В дорожном покрытии такие изменения могут приводить к ускоренному развитию трещин и повышенному износу верхнего слоя.

Состав с защитным покрытием показал более устойчивое поведение. Несмотря на снижение марки морозостойкости после циклического воздействия, прочностные характеристики и плотность изменились незначительно.

Особенно важно, что водопоглощение состава № 2 серии 2.2 оказалось на 27,3 % ниже, чем у состава № 1 серии 1.2. Это позволяет сделать вывод о положительном влиянии защитного покрытия на ограничение влагонакопления и сохранение структуры материала [3–5].

В целом наиболее сбалансированные результаты получены у состава № 2 серии 2.1. Он показал максимальную прочность при изгибе, высокую прочность при сжатии, низкое водопоглощение, минимальную истираемость и марку морозостойкости F₂ 300. Для дорожного бетона такое сочетание показателей является более значимым, чем отдельное максимальное значение прочности при сжатии, поскольку долговечность покрытия определяется совокупностью эксплуатационных свойств [3–5].

Заключение

На основании анализа экспериментальных данных можно сделать следующие выводы.

1. В нормальных условиях твердения оба исследованных состава обеспечивают высокие прочностные характеристики. Состав № 2 серии 2.1 показал наибольшую прочность при изгибе — 7,1 МПа, а состав № 1 серии 1.1 — наибольшую прочность при сжатии — 53,9 МПа.

2. Переменное увлажнение и высушивание существенно ухудшает свойства контрольного состава. Для состава № 1 прочность при изгибе снизилась на 18,8 %, прочность при сжатии — на 13,4 %, плотность — на 2,16 %, водопоглощение увеличилось на 61,9 %, истираемость — на 18,4 %, а марка морозостойкости снизилась с F₂ 300 до F₂ 200.

3. Состав с защитным покрытием оказался более устойчивым к неблагоприятному влажностному воздействию.

Для состава № 2 снижение прочности при изгибе и сжатии составило только 2,8 %, плотность практически не изменилась, а рост водопоглощения был значительно ниже, чем у контрольного состава.

4. Наиболее благоприятное сочетание эксплуатационных характеристик получено у состава № 2 серии 2.1: прочность при изгибе — 7,1 МПа, прочность при сжатии — 53,7 МПа, плотность — 2484 кг/м³, водопоглощение — 3,71 %, истираемость — 0,700 г/см², морозостойкость — F₂ 300.

5. Результаты подтверждают, что для дорожного бетона необходима комплексная оценка качества [3–5]. Прочность при сжатии должна рассматриваться совместно с прочностью при изгибе, плотностью, водопоглощением, истираемостью и морозостойкостью, так как именно совокупность этих показателей определяет долговечность цементобетонного покрытия [3–5].

Литература:

1. ГОСТ 8267. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия.
2. ГОСТ 10063.3–95. Бетоны. Дилатометрический метод ускоренного определения морозостойкости.
3. ГОСТ 59300–2021. Дороги автомобильные общего пользования. Бетон цементный. Технические требования.
4. ОДМ 218.3.081–2016. Методические рекомендации по применению цементобетонных покрытий автомобильных дорог.
5. Материалы лабораторных испытаний бетонных образцов.

Сравнительный анализ технических характеристик телеметрической приемной станции «Источник-М» и МРТК-4А, используемых в настоящее время на космодроме Плесецк

Терещатов Антон Юрьевич, старший инженер-испытатель (г. Мирный, Архангельская обл.)

В статье представлен анализ и сравнение технических характеристик телеметрических станций МРТК-4А и «Источник-М», используемых в настоящее время на космодроме Плесецк.

Введение

В настоящее время для обработки телеметрической информации при подготовке ракет-носителей 14А14, 14А15 на техническом и стартовых комплексах площадки 43 космодрома Плесецк, используется комплекс автоматизированной обработки телеметрической информации (КАО ТМИ-С), введенный в эксплуатацию в 2023 году. Комплекс предназначен для приема, регистрации и автоматизированной обработки телеметрической информации бортовой системы радиотелеметрических измерений РТСЦ. Прием телеметрической информации осуществляется от наземных приемно-регистрирующих систем МРТК-4А (при работе с изделием 14А15) и ТМС «Источник-М» (при работе с изделием 14А14).

Область применения комплекса:

- проведение автоматизированной обработки и оценки результатов подготовки изделия на техническом и стартовом комплексе;
- проведение автоматизированной обработки при пуске в целях оперативной оценки ТМИ и ведение репортажа о полете изделия;
- проведение послеполетного анализа, подготовка отчетных материалов и обеспечение работ по выявлению причин замечаний в работе бортовых систем.

Телеметрическая станция МРТК-4А

Малогабаритные радиотелеметрические комплексы МРТК-4 (МРТК-4А) предназначены для приема в диапа-



Рис. 1. Рабочее место оператора системы МРТК-4А

зонах М, Д1, Д4 радиосигналов, поступающих на антенные системы, и приема сигналов по кабельным радио и видеотрактам, поступающих на входы приемных устройств, регистрации и отображения на средствах ПЭВМ принятой телеметрической информации в структурах КИМ-Ц, БИТС-2, РТСЦМ.

Комплекс МРТК-4 имеет три канала приема, предварительной обработки, регистрации и отображения телеметрической информации (ТМИ). При этом два канала являются основными (рабочими), а один используется для «горячего» резерва.

Комплекс МРТК-4 обеспечивает одновременный прием радиосигналов с линейной взаимно-ортогональной поляризацией на антенну дециметрового диапазона волн и антенну метрового диапазона волн.

Комплекс МРТК-4А обеспечивает прием радиосигналов, поступающих по кабелю на вход с передатчиков бортовых систем измерений на частотах диапазонов М, Д1, Д4 или видеосигналов с бортовых систем измерений, работающих в структурах КИМ-Ц, БИТС-2, РТСЦМ.

Комплексы МРТК-4 и МРТК-4А обеспечивают:

- демодуляцию принятых радиосигналов и выделение информационных слов и синхросигналов из принятого потока ТМИ;
- формирование последовательного кода текущего (наземного) времени, совмещенного с импульсами тактовой частоты 1 кГц и привязку этого кода к сигналам СЕВ;
- ввод в ПЭВМ полного потока принимаемой телеметрической информации, поступающего в виде информационных слов, импульсов синхронизации и сопровождающих ТМИ импульсов кода текущего времени;
- регистрацию (запоминание) принимаемой информации на жесткий магнитный диск (ЖМД) ПЭВМ в темпе приема ТМИ;
- архивирование зарегистрированной информации на дисках DVD-RW по окончании сеанса связи путем перезаписи информации с ЖМД ПЭВМ;

— воспроизведение зарегистрированной информации как с ЖМД ПЭВМ, так и с диска DVD-RW, вывод ее на экран монитора ПЭВМ для контроля поступления при записи;

— видеоконтроль принимаемого потока ТМИ на экране монитора ПЭВМ как во время приема ТМИ, так и при воспроизведении зарегистрированной ТМИ с ЖМД ПЭВМ, либо с диска DVD-RW;

— отображение текущего (наземного) времени на мониторе ПЭВМ в виде часов, минут и секунд либо непрерывного счета секунд (как при записи, так и при воспроизведении информации);

— отображение на экране ПЭВМ для каждого потока уровня АРУ приемника, соотношение сигнал-шум и другой служебной информации;

— выдачу полного потока принятой и зарегистрированной информации на средства обработки телеметрической информации через локальную вычислительную сеть (ЛВС).

Чувствительность комплекса МРТК-4 не хуже 10 мкВ на входе антенных усилителей и 30 мкВ на входе приемных устройств при вероятности ошибки приема информации не более 10^{-4} .

Электропитание комплексов МРТК-4 (МРТК-4А) осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 вольт. Мощность потребления электроэнергии не превышает 500 Вт.

Время непрерывной работы составляет не более 30 часов, с последующим перерывом не менее часа. Для проведения автономных тестовых проверок комплекса по радио и по видеосигналу в составе комплекса имеется оборудование, обеспечивающее имитации радио и видеосигналов в заданных структурах.

Процедуры настройки комплекса на выбранную несущую частоту радиосигнала и структуру БРТС и декоммутация назначенной структуры ТМ кадра выполняется установленной программой «МРТК-3» [МРТК-4. Руководство по эксплуатации. ИВЯФ.461271.044 РЭ].

На данный момент времени комплекс МРТК-4А применяется для приема ТМИ с бортовых систем измерений РКН «Союз-2» этапа 1В, и передачи потока ТМИ на комплекс автоматизированной обработки ТМИ (КАО ТМИ-С) для последующего анализа и обработки телеметрической информации.

Телеметрическая станция «Источник-М»

Телеметрическая станция «Источник-М» БЛИЖ. 401270.001.002 изготовлена на предприятии НПП «Мера» в 2019 году и предназначена для приёма, демодуляции, регистрации, декоммутации, документирования одновременно до 8 потоков телеметрической информации (ТМИ) от антенно-фидерных устройств (АФУ) измерительных пунктов, стартовых комплексов, и при проведении тестовых проверок систем телеизмерений изделий РКТ в условиях ТП, стендов.

ТМС-М должна выполнять:

- приём радиосигналов (высокочастотных (ВЧ) сигналов) телеметрических структур,
- приём низкочастотных (НЧ) сигналов телеметрических структур,
- демодуляцию радиосигналов,
- регистрацию полученных данных на жёсткие магнитные и оптические диски,
- воспроизведение, обработку и представление данных,
- обмен данными по каналу Ethernet.

Технические характеристики:

ТМС-М обеспечивает одновременный приём от двух до восьми радиопотоков в диапазоне 120...250 МГц следующих бортовых радиотелеметрических систем (БРТС):

- СКУТ с информативностью 640 тыс.изм/с — в виде двух потоков (т. е.одновременный приём до 4 потоков по 640 тыс.изм/с);

- СКУТ с информативностью 320 тыс. изм/с;
- «Сириус» с информативностью 320 тыс. изм/с;
- «Пирит» с информативностью 32, 64, 128, 256 кбит/с;
- «Орбита» с информативностью 196608, 393216, 786432, 1572864, 3145728 бит/с;
- РТС9 КИМ-Ц с информативностью 32, 64, 128, 256, 512 кбит/с;
- РТСЦ-М2 с информативностью 512, 1024 кбит/с;
- РТС9 ВИМ с информативностью 32, 64, 128, 256 кбит/с;
- РТС-9Ц с информативностью от 2 до 1024 кбит/с;
- БИТС-2 с информативностью от 2 до 1024 кбит/с.

ТМС-М обеспечивает совместную работу со следующими АФУ: «Изумруд», «Жемчуг-МС», ТНА-57У, Б-529, «Дельта», «Кедр».

Захват и удержание синхронизации ТМС-М осуществляется при следующих отклонениях несущей частоты от номинала:

- БРС-4 (СКУТ, Сириус) не более 1 МГц;
- РТС-9 ВИМ, РТС-9 КИМ-Ц, РТС-9Ц, БИТС-2, «Пирит», «Орбита-ТМ» не более 250 КГц;

Динамический диапазон входного сигнала по напряжению — 90 дБ.

Избирательность по соседнему каналу более 60 дБ.

Избирательность по зеркальному каналу более 60 дБ.

Максимальный уровень входного сигнала — 1 В.

Чувствительность каждого канала ТМС-М:

- а) для цифровых БРТС не хуже 10 мкВ при вероятности ошибки приема информации на символ не более 10^{-5} – 10^{-6} ;
- б) для аналоговой БРТС не хуже 30 мкВ при величине шумов и взаимовлияний по каждому каналу не более 5 %.

Время вхождения ТМС-М в связь не более 30 мс.

Время восстановления приема ТМС-М после кратковременных пропаданий радиосигнала не более 20 мс.

ТМС-М обеспечивает возможность одновременного приема НЧ и ВЧ сигналов.



Рис. 2. Рабочее место оператора станции «Источник-М»

ТМС-М регистрирует ТМИ не менее трех часов.

ТМС-М перезаписывает в выбранном объеме ТМИ с жёсткого диска на оптический.

ТМС-М обеспечивает обработку и представление ТМИ в соответствии с выбранными алгоритмами в реальном времени или при воспроизведении.

ТМС-М обеспечивает приём и передачу данных по каналу Ethernet.

Временная привязка ТМИ к сигналам СЕВ с погрешностью <100 мкс.

Временная привязка ТМИ к сигналам автономного времени с дискретностью 1 мс.

Потребляемый ТМС-М ток не более 3 А.

Электропитание ТМС-М — напряжение переменного тока 198...242 В частотой 50 Гц.

Состав ТМС-М

В состав ТМС-М входят:

- устройство приёма и демодуляции «МІС-ТМ» — от одного до четырёх;
- устройство регистрации ТМИ (ТМР);
- коммутатор Ethernet;
- имитатор телеметрических сигналов ME-718;
- конвертер ВЧ ME-710 БЛИЖ.403530.010.001;
- принтер;
- источник бесперебойного питания (ИБП);
- сетевой фильтр;
- стойка промышленная;

— комплект кабелей и переходных соединителей;

— комплект ЗИП;

— эксплуатационная документация в соответствии с ведомостью эксплуатационных документов.

Процедуры настройки ТМС-М на выбранную несущую частоту радиосигнала и структуру БРТС и декоммутация назначенной структуры ТМ кадра выполняется установленной в ТМР программой «ТМ Регистратор». Конфигурация программы создаётся оператором в диалоговом режиме и содержит данные для настройки установленных в МІС-ТМ модулей, сетевых подключений и параметров декоммутации ТМ потоков.

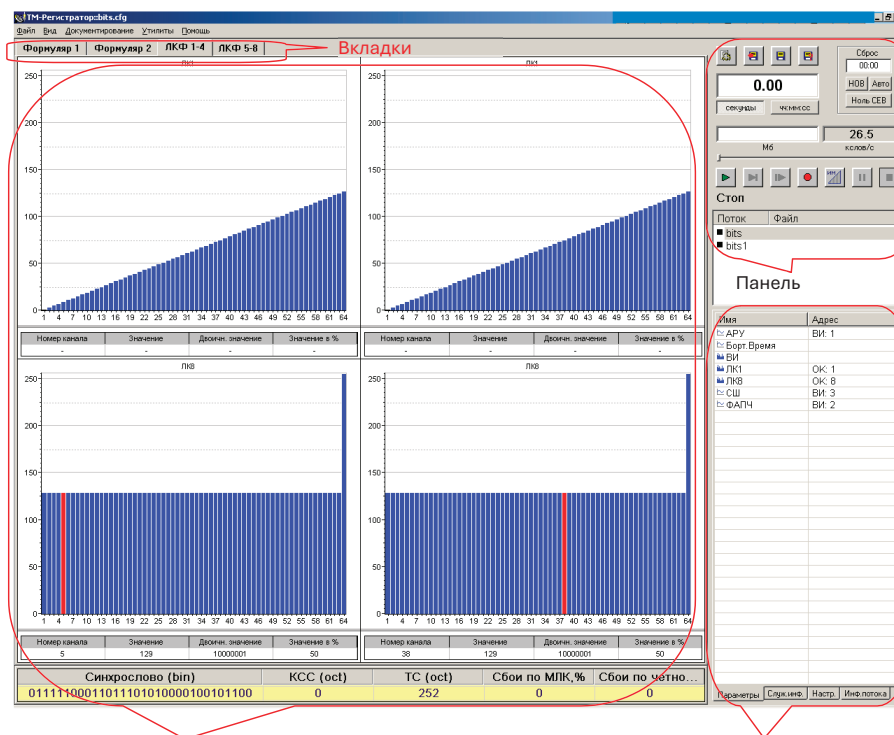
Главное окно программы «ТМ Регистратор» (рис. 3), разделено на три части:

а) правая верхняя часть — панель управления работой программы с кнопками управления и полями отображения служебной информации;

б) правая нижняя часть — панель отображения настроек текущего сеанса работы;

в) левая часть — область отображения обработанной информации, в виде гистограмм информации локальных коммутаторов, осциллограмм и списков значений параметров.

1. Способы представления на экране компьютера декоммутированных элементов ТМ кадра и значений телеметрируемых параметров выбираются на вкладках формуляров, создаваемых на основе установленных шаблонов. [«ТМ Регистратор». Руководство оператора БЛИЖ.409802.001–01 34].



Область отображения обработанной информации, в виде гистограмм, осциллограмм, списка значений параметров

Панель отображения настроек текущего сеанса работы

Рис. 3

Для размещения ТМС-М требуется площадь не менее 4 м².

Размещение устройств ТМС-М — произвольное, исходя из удобства оператора и длины кабелей, входящих в комплект поставки.

Заземление (или зануление) устройств выполняется через разъёмы питания 220 В и клемму заземления на корпусе МПС-ТМ.

Соединение устройств ТМС-М осуществляется с помощью штатных кабелей в соответствии со схемой электрической общей. [Станция «Источник-М». Руководство по эксплуатации. БЛИЖ.401270.001.002 РЭ].

Заключение

Таким образом, станция «Источник-М» имеет простое исполнение в структуре компоновки составных частей. Она более современна (работает на ОС WINDOWS 11, в то время как на МРТК-4А устанавливается ОС WINDOWS XP). Также не маловажным фактором является простота настройки и использования в штатной работе станции «Источник-М» благодаря устанавливаемой программе «ТМ Регистратор» (программа «МРТК-3» менее удобна и оснащена меньшим количеством функций). Время работы комплекса МРТК-4А ограничено 30 часами непрерывной работы. Использование ТМС-М по времени не ограничено.

МРТК-4 имеет три канала приема, регистрации и отображения информации, обеспечивает прием радиосигналов или видеосигналов с бортовых систем измерений, работающих в структурах КИМ-Ц, БИТС-2, РТСЦМ, в то время, как «Источник-М» может принимать, регистрировать и документировать до восьми потоков телеметрической информации в структурах СКУТ, «Пирит», «Си-

риус», «Орбита», РТС9 КИМ-Ц, РТСЦ-М2, РТС9 ВИМ, РТС-9Ц и БИТС-2.

Таким образом, при сравнении технических характеристик телеметрической станции «Источник-М» и комплекса МРТК-4А, можно с уверенностью сделать вывод, что ТМС-М более современная, универсальная и удобная система для приема, регистрации и обработки телеметрической информации.

Перечень сокращений

АФУ — антенно-фидерное устройство.
БРТС — бортовая радиотелеметрическая система.
ВЧ — высокая частота.
ЖМД — жесткий магнитный диск.
ЗИП — запасные инструменты и принадлежности.
ИБП — источник бесперебойного питания.
КАО — комплекс автоматизированной обработки.
ЛВС — локальная вычислительная сеть.
МЗУ — магнитное запоминающее устройство.
МРТК — малогабаритный радиотелеметрический комплекс.
НЧ — низкая частота.
ПЭВМ — персональная электронная вычислительная машина.
РКН — ракета космического назначения.
РКТ — ракетно-космическая техника.
РТСЦ — радиотелеметрическая система цифровая.
СЕВ — система единого времени.
ТМИ — телеметрическая информация.
ТМР — телеметрический регистратор.
ТМС — М — станция «Источник-М».
ТП — техническая позиция.
УСД — устройство сбора и декоммутации.

Литература:

1. МРТК-4. Руководство по эксплуатации. ИВЯФ.461271.044 РЭ.
2. Станция «Источник-М». Руководство по эксплуатации. БЛИЖ.401270.001.002 РЭ.
3. «ТМ Регистратор». Руководство оператора БЛИЖ.409802.001-01 34.

Сравнительный обзор нормативных требований к расчету усиления железобетонных конструкций композитными материалами по российским и зарубежным стандартам

Шибяев Яков Александрович, студент магистратуры
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

В статье проводится обзор и систематизация требований трех ключевых нормативных документов, регламентирующих проектирование усиления железобетонных конструкций внешним армированием из композитных материалов: российского СП 164.1325800.2014, американского руководства ACI 440.2R-17 и европейского технического отчета fib Bulletin 90. Основное внимание уделено различиям в назначении, коэффициентам условий работы, подходам к ограничению напряжений в композите, учету длительных нагрузок и требованиям к анкерровке. Выделены принципиальные отличия

коэффициентного и деформационного подходов к обеспечению надежности. Представлена сводная таблица для наглядного сравнения расчетных параметров.

Ключевые слова: композитные материалы, внешнее армирование, усиление конструкций, нормативная база, СП 164, ACI 440.2R, fib Bulletin 90.

A comparative review of code requirements for the design of FRP-strengthened reinforced concrete structures based on Russian and International standards

Shibaev Iakov Alexandrovich, master's student

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (St. Petersburg)

Введение

Применение внешнего армирования из фиброармированных полимеров (FRP) остается одним из наиболее востребованных методов восстановления несущей способности железобетонных элементов. Технология позволяет избежать значительного увеличения массы конструкции и сократить сроки производства работ, что критически важно при реконструкции существующих зданий.

Несмотря на широкое распространение метода, единая международная методика расчета до сих пор не выработана. Различные научные школы сформировали собственные подходы к оценке надежности композитных материалов и прогнозирования механизмов их разрушения. Цель настоящей статьи — привести сопоставительный анализ трех наиболее авторитетных нормативных документов и выявить их ключевые особенности, формируя целостное представление о текущем состоянии нормативной базы.

Общая характеристика рассматриваемых документов

Первый документ, обязательный к применению на территории России, — свод правил СП 164.1325800.2014 [2]. Он полностью регламентирует проектирование усиления железобетонных конструкций композитными материалами и методически опирается на базовые нормы СП 63.13330.2018 [1]. Российский подход основан на методе предельных состояний с введением системы понижающих коэффициентов к прочностным характеристикам.

Второй документ — американское руководство ACI 440.2R-17 [3]. Хотя формально это пособие, в международной практике оно применяется как полноценный стандарт. Документ обобщает обширный экспериментальный опыт североамериканских исследовательских центров и отличается детальной проработкой механизмов отслоения композитов от бетонной поверхности.

Третий документ — европейский технический отчет fib Bulletin 90 [4], разработанный Международной федерацией по бетону. Он создавался как основа для будущих редакций Еврокода 2. В отличие от первых двух, европейские рекомендации стремятся отойти от жестких эмпирических коэффициентов в пользу прямого расчета ме-

ханики разрушения, что делает этот подход наиболее наукоемким.

Сравнение ключевых расчетных критериев

Ограничение напряжений и деформаций в композите

Вопрос о допустимой доле использования паспортной прочности материала является принципиальным при проектировании.

СП 164 вводит систему понижающих коэффициентов условий работы ($\gamma_f, \gamma_{f1} - \gamma_{f4}$), которые суммарно могут снижать расчетное сопротивление композита на 30–50 % от заводской прочности. Такой подход закладывает запас, компенсирующий возможные дефекты наклейки, температурные воздействия и особенности конкретного типа конструкции. Проектировщик оперирует «урезанным» расчетным сопротивлением R_f [2, п.5.2.5].

ACI 440.2R-17 наряду с понижающими коэффициентами вводит ключевое ограничение по предельной деформации. Предотвращение отслоения обеспечивается условием [3, п. 10.1.1]:

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9\varepsilon_{fu}$$

Где:

ε_{fd} — предельная деформация FRP, ограниченная отслоением;

f'_c — прочность бетона;

n — число слоев;

E_f — модуль упругости композита;

t_f — толщина одного слоя;

ε_{fu} — предельная деформация разрыва FRP.

Fib Bulletin 90 предлагает более гибкую иерархию методов: от упрощенного ограничения напряжений до нелинейного расчета с учетом закона сцепления. Вводится понятие эффективной длины анкеровки l_e и энергии разрушения G_f сцепления, что позволяет получать менее консервативные результаты при сложных схемах усиления. Максимальная деформация композита определяется по формуле, учитывающей геометрию элемента и свойства контактной зоны [4, п. 5.2.2, 5.3.2, 5.3.3 и 6.2.1.3.1]:

$$\varepsilon_{fd} = k_m k_b \sqrt{\frac{f_{cm}^{2/3}}{n E_f t_f}}$$

Где:

ε_{fd} — расчетная предельная деформация композита по условию сохранения сцепления с бетоном;

k_m — коэффициент, учитывающий тип наклейки (сухое/мокрое нанесение);

k_b — геометрический коэффициент, зависящий от ширины и расположения композита;

$f_{cm}^{2/3}$ — прочность бетона;

n — число слоев;

E_f — модуль упругости композита;

t_f — толщина одного слоя.

Учет длительных воздействий

При действии постоянной нагрузки ключевое значение приобретает склонность материала к ползучести.

СП 164 реализует концепцию длительного сопротивления через табличные коэффициенты, ограничивающие напряжения в композите. Для углепластиков, наиболее часто используемых при усилении перекрытий, потеря прочности от ползучести практически отсутствует, поэтому соответствующий коэффициент близок к единице.

ACI 440.2R-17 предлагает учитывать коэффициент длительной прочности C_E , который умножается на предельную прочность материала. Для углепластиков (CFRP) обычно составляет порядка 0.95 — влияние ползучести минимально. Однако для стекловолокна и арамидных волокон этот коэффициент ощутимо ниже (0,3–0,7), что делает их применение под длительной нагрузкой менее рациональным.

fib Bulletin 90 рассматривает временные эффекты через несколько уровней приближения. В упрощенных методах

применяется коэффициент конверсии, аналогичный подходу ACI. В более точных — вводятся кривые усталостной прочности и анализ циклической ползучести.

Обеспечение анкеровки и предотвращение отслоения

Наиболее опасным видом разрушения при внешнем армировании является не разрыв волокна, а его внезапный отрыв от бетонной поверхности

СП 164 регламентирует проверку анкеровки через эмпирические формулы, связывающие требуемую длину заведения композита с прочностью бетона основания и толщиной защитного слоя. Подход сравнительно прост и удобен для типовых расчетов.

ACI 440.2R-17 уделяет повышенное внимание механизму промежуточного отслоения. Проверка основана на параметре жесткости композита $E_f \cdot t_f$. Анализ обязателен как для концевых зон, так и для участков в середине пролета, где отрыв может начинаться с наклонной трещиной.

fib Bulletin 90 содержит наиболее детально проработанную классификацию механизмов отслоения, включающую три сценария: концевое отслоение, промежуточное и отслоение, вызванное критической наклонной трещиной. Для каждого предложены аналитические решения, что, с одной стороны, усложняет ручной расчет, а с другой — позволяет точнее определить слабое место конструкции.

Сводная таблица коэффициентов условий работы

Для наглядного сопоставления ниже приведены основные параметры, используемые в трех документах для углепластиков при нормальных условиях эксплуатации внутри помещений.

Таблица 1. Сравнение понижающих коэффициентов и ограничений для углеволокна

Сравниваемый параметр	СП 164.135800.2014	ACI 440.2R-17	fib Bulletin 90
Основной принцип	Снижение прочности через систему коэффициентов	Снижение прочности и жесткое ограничение деформаций	Расчет через механику сцепления и контроль деформаций
Коэффициент надежности по материалу	$\gamma_f \approx 1,2$ (зависит от типа волокна и производителя)	$C_E = 0,95$ (для углеволокна внутри здания)	Зависит от уровня приближения, ориентировочно 1,2–1,5
Максимальная деформация	Прямого лимита нет. Ограничение косвенное, через понижение расчетного сопротивления	$\varepsilon_{fd} \leq 0,005$ (0,5 %)	Вычисляется из условия сцепления. Зависит от жесткости ленты и прочности бетона
Учет длительной ползучести	Табличный коэффициент, для карбона близок к 1,0	Учтен в C_E	Отдельный расчет по уровням приближения. Для карбона снижение минимально
Сложность применения	Низкая. Оптимален для типовых задач	Средняя. Требуется проверка по деформациям и отслоению	Высокая. Требуется знание механики контактной зоны

Рассмотрим типовую ситуацию: в расчет вводится углепластик с паспортной прочностью 4000 МПа. По российским нормам, после применения коэффициента условий работы и дополнительных понижающих факторов, расчетная величина составит порядка 2800–3000 МПа. Такой запас обеспечивает надежность даже при отклонениях, неизбежных в реальных условиях строительства.

Американский подход при близком значении коэффициента запаса по прочности часто вводит дополнительный барьер по деформациям. Ограничение в 0.5 % относительного удлинения может включиться в работу раньше, чем исчерпается запас по напряжениям. В этом проявляется философия ACI: приоритет отдается контролю прогибов и ширины трещин, а не только формальному запасу прочности.

Европейская методика делает следующий шаг в развитии этой логики, отказываясь от универсальных лимитов в пользу индивидуального расчета для каждого узла. При хорошем качестве бетона основания можно обоснованно принимать более высокие значения напряжений. Если же основание слабое — проблема решается не увели-

чением количества слоев композита, а дополнительной анкерровкой или предварительным усилением самого бетона.

Заключение

Отечественный СП 164 представляет собой надежный инженерный инструмент для массового проектирования. Коэффициентный подход прост, прозрачен и обеспечивает высокий уровень надежности, хотя в отдельных случаях может приводить к перерасходу материала.

Американские рекомендации ACI 440.2R близки к российским по философии, но смещают акцент на управление деформациями и детальную проверку отслоения. Это дает более полный контроль эксплуатационной пригодности конструкции.

Европейский fib Bulletin 90 демонстрирует переход на новый уровень научного осмысления проблемы. Отказ от жестких эмпирических барьеров в пользу механики сцепления открывает возможности для более экономичных решений, однако требует от проектировщика более высокой квалификации.

Литература:

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2018. 120 с.
2. СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования. М.: Минстрой России, 2014. 76 с.
3. ACI 440.2R-17. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. — American Concrete Institute, 2017.
4. FIB Bulletin 90. Externally applied FRP reinforcement for concrete structures. Technical Report. — Federation Internationale du Beton, 2019.

АРХИТЕКТУРА, ДИЗАЙН И СТРОИТЕЛЬСТВО

Геометрическая нелинейность при расчетах внецентренно сжатых железобетонных элементов

Егоров Алексей Романович, студент магистратуры
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

В соответствии с СП63.13330 при расчете внецентренно сжатых элементов следует учитывать влияние прогиба на их несущую способность путем расчета конструкций по деформированной схеме.

В данной работе проведено исследование влияния применения деформированной схемы путем учета геометрической нелинейности на напряженно-деформированное состояние внецентренно-сжатого элемента, и сравнение полученных данных с расчетом по недеформированной схеме.

Ключевые слова: внецентренно-сжатый железобетонный элемент, геометрическая нелинейность, несущая способность, критическая сила, устойчивость.

Вычисление критической силы стержня с упругими физическими характеристиками

Для того, чтобы выяснить влияние деформированной схемы на НДС конструкции будут решены задачи по определению критической силы, при которой происходит потеря устойчивости по упругой схеме и по деформированной схеме, сравнение и анализ данных случаев при схожих условиях.

Для вычисления критической силы было выполнено моделирование колонны с геометрической длиной 9 метров и поперечным сечением 400х400 мм в ПК ЛИРА-САПР с консольным закреплением. Общий вид расчетной схемы представлен на рис. 1:



Рис. 1. Общий вид расчетной схемы

Для определения критической силы в упругой постановке использован 10 тип КЭ — Универсальный пространственный стержневой КЭ.

Для вычисления коэф. запаса устойчивости к колонне приложена нагрузка 150 т. Полученное значение коэффициента запаса устойчивости составляет 0,858 (см. рис. 2).

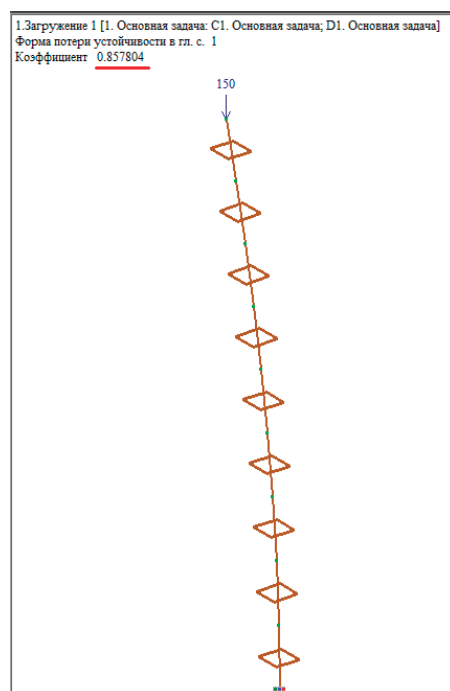


Рис. 2. Коэффициент запаса устойчивости

Значение критической силы, при которой происходит потеря устойчивости составляет:

$$150 \cdot 0,858 = 128,7 \text{ т}$$

Моделирование геометрически нелинейного стержня и анализ

Для сравнения характера деформирования, выполнено моделирование аналогичного стержня, учитывая при этом геометрическую нелинейность. Для этого был использован 309 тип КЭ — Геометрически нелинейный универсальный пространственный сильно изгибаемый стержневой КЭ (см. рис. 3).

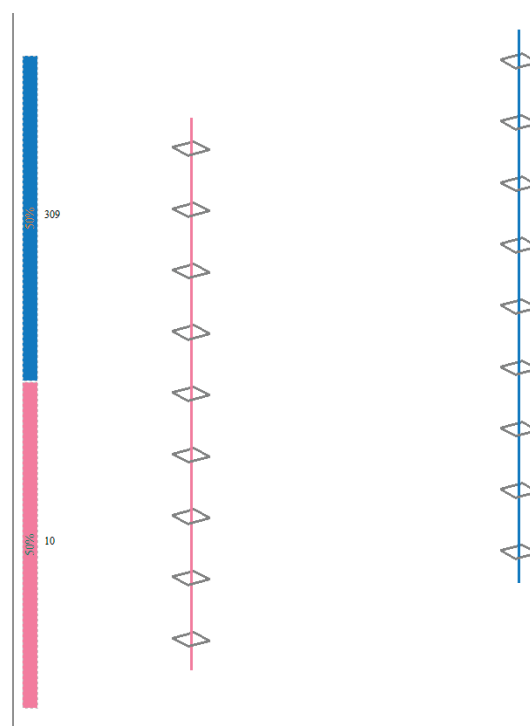


Рис. 3. Типы КЭ-стержней

Как известно, потеря устойчивости происходит при возникновении малейшей внешней горизонтальной нагрузки, действующей из плоскости. Для учета этого в верхнем сечении была задана горизонтальная нагрузка величиной 0,001 т.

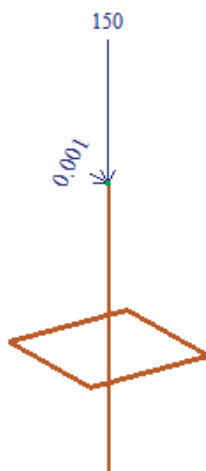


Рис. 4. Нагрузки при геометрически нелинейном расчете

Также для корректного учета геометрической нелинейности задана шаговая нагрузка с автоматическим делением шага (см. рис. 5):

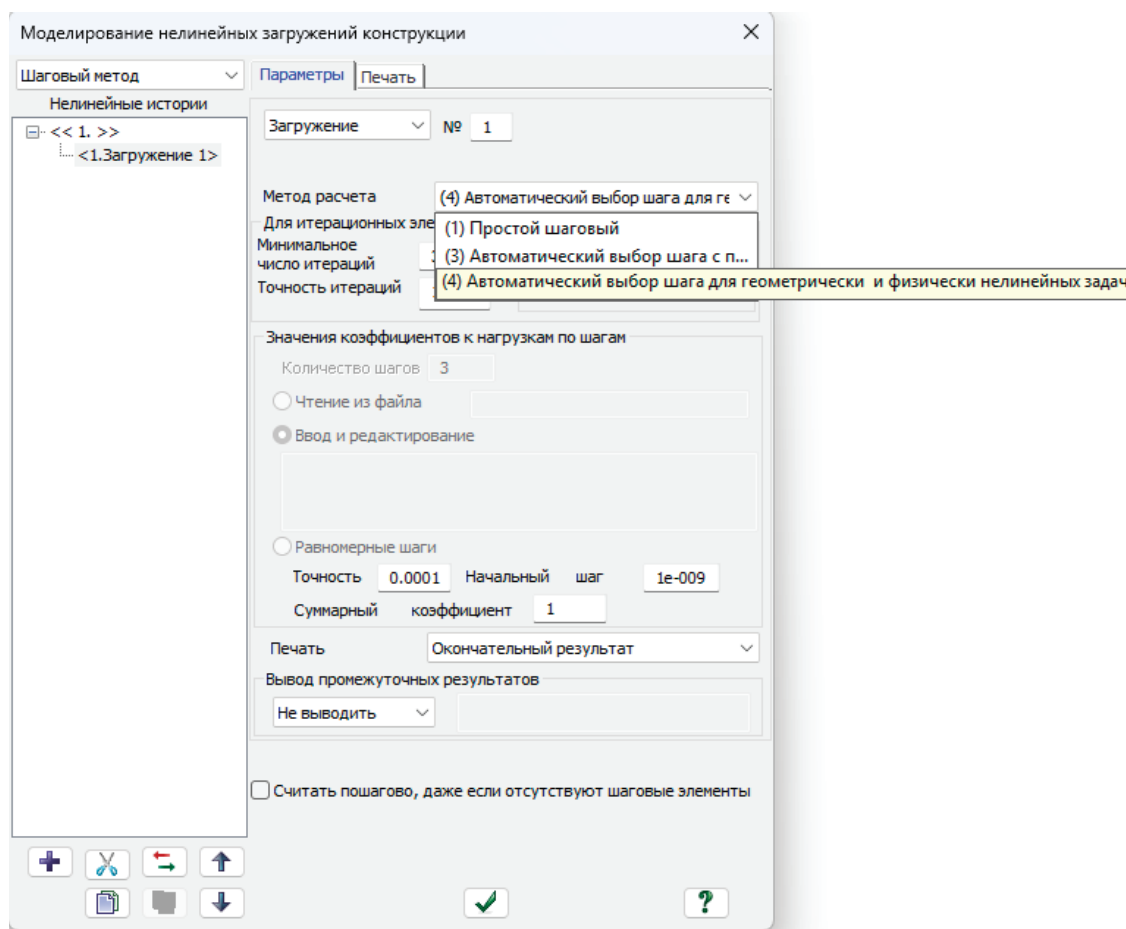


Рис. 5. Задание шаговой нагрузки

Выполнив расчет, при полном (100 %-ом) приложении нагрузки наблюдается разный характер деформирования двух аналогичных стержней — левый стержень — стержень без учета геометрической нелинейности, правый — с учетом геометрической нелинейности (см. рис. 6).

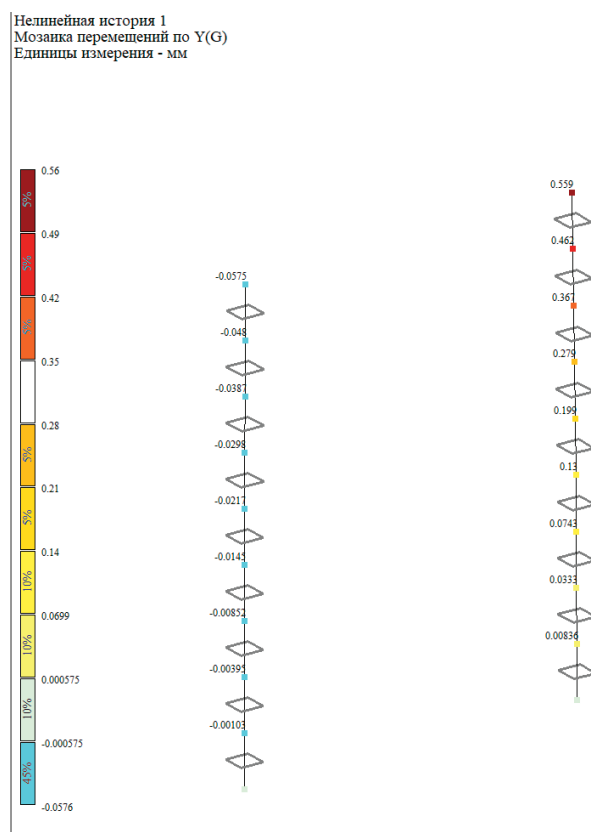


Рис. 6. Мозаика горизонтальных перемещений стержней

Для более наглядного изучения процесса деформирования обоих стержней, построим графики перемещения верхних узлов этих стержней по шагам нагрузки:

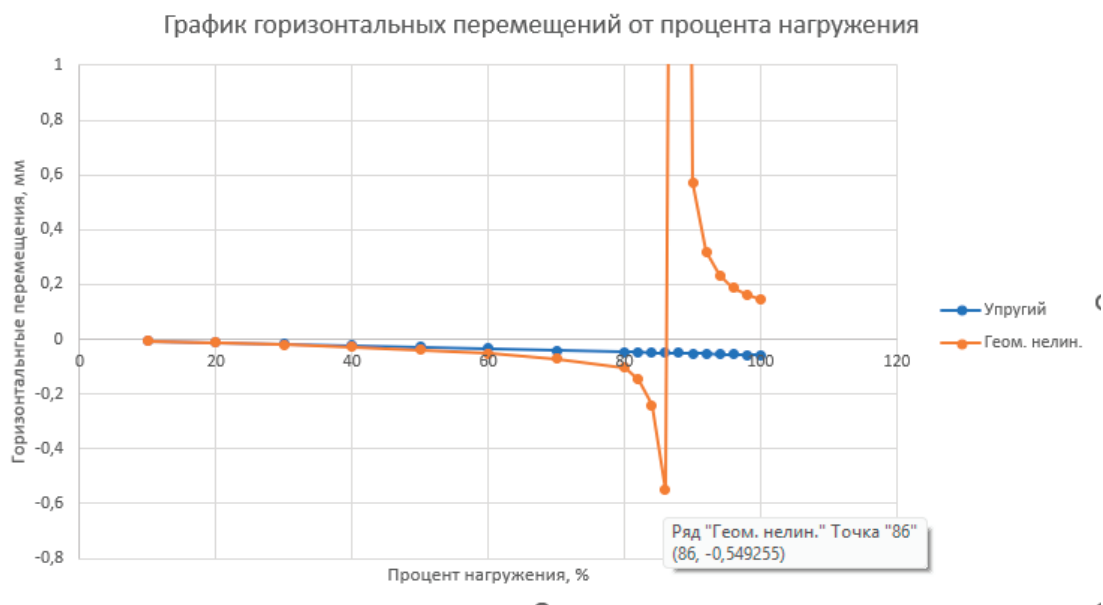


Рис. 7. График горизонтальных перемещений от процента нагрузки

Указанная точка, при которой происходит резкое изменение и увеличение деформаций является так называемой «точкой бифуркации». Именно в этот момент и происходит потеря устойчивости.

Критическая сила для геометрически нелинейного стержня составляет:

$$150 \cdot 0,86 = 129 \text{ т}$$

Данное значение критической силы очень близко к значению, вычисленному для упругого стержня — 128,7 т.

При этом, несущая способность данного железобетонного элемента будет существенно ниже, чем значение критической силы, при которой происходит потеря устойчивости. По графику на рис. 7 видно, что до примерно 60 % нагрузки от критической силы, характер деформирования для обоих стержней практически идентичен. На основе всего вышеописанного можно утверждать, что:

1. Для железобетонных элементов потеря устойчивости будет достигаться сильно позже исчерпания несущей способности, то есть влияние эффектов второго порядка при работе элемента в пределах несущей способности существенно мало.
2. Расчет с учетом расчетной длины по недеформированной схеме достаточно сильно совпадает с расчетом по деформированной схеме (с учетом геометрической нелинейности) и в целом дает схожий результат.

Литература:

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. — Текст: электронный // docs.cntd.ru: [сайт]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082> (дата обращения 25.04.2025).
2. Расчет железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям / А. С. Залесов, Э. Н. Кодыш, Л. Л. Лемыш, И. К. Никитин. — М.: Стройиздат, 1988. — 320 с. — Текст: непосредственный.

Применение робототехники в строительной отрасли

Задорожная Ольга Анатольевна, студент магистратуры;
Шиманская Марианна Станиславовна, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

На данный момент робототехника широко применяется во многих областях: в сельском хозяйстве, в медицине, в военном деле, в промышленности и т. д. Немаловажной сферой применения является строительная отрасль, требующая постоянной автоматизации рабочих процессов для обеспечения точности, скорости выполнения задач и для минимизации рисков, связанных с травмированием работников при проведении строительных работ. В данной статье рассматриваются основные виды робототехники, которые применяются в строительстве, освещены их преимущества внедрения и возможные недостатки.

Ключевые слова: строительные роботы, коботы, беспилотные летательные аппараты, преимущества роботизации, аддитивное производство.

Application of robotics in the construction industry

At the moment, robotics is widely used in many fields: agriculture, medicine, military, industry, etc. An important field of application is the construction industry, which requires constant automation of work processes to ensure accuracy, speed of task completion and to minimize the risks associated with injury to workers during construction work. This article discusses the main types of robotics that are used in construction, highlights their advantages and possible disadvantages.

Keywords: construction robots, cobots, unmanned aerial vehicles, advantages of robotics, additive manufacturing.

Строительство по сей день остается одной из самых трудоемких отраслей в мире и сталкивается с проблемами, связанными с качеством, сроками, безопасностью и сложными условиями. Роботизированные решения в строительстве могут автоматизировать проведение земляных работ, транспортировки, подъема грузов, бетонных работ и сноса. Так же следует понимать, что роботизация в данном случае не должна сопровождаться сокращением рабочих мест, роботы в строительной отрасли рассматриваются как вспомогательные средства, направленные на улучшение процесса работы и ее результатов, а также на упрощение адаптации к быстро изменяющимся внешним условиям. [1]. Передовые строительные технологии также используют преимущества робототехники и машинных решений для таких видов деятельности, как управление отходами, автоматизация задач, промышленное строительство и 3D-печать.

Рассмотрим основные категории роботов, используемых в строительстве:

1. Промышленные роботы. Внешне и своими движениями они очень похожи на человеческую руку [2], к их основным функциям в производстве строительных материалов включают лазерную резку, сварку различными способами, фрезерование, сверление, полировку и зачистку, нанесение клея, герметиков и т. д. Ниже, на рис. 1, а) представлен

робот-манипулятор QJAR QJR6–3, имеющий следующие сферы применения: аддитивные технологии, сборка, дозированная подача материала, финишная обработка, обработка материалов, паллетирование, сварка. На рис. 1, б) данный робот используется для проведения сварочных работ на производстве.



а)



б)

Рис. 1. Робот-манипулятор для проведения сварочных работ QJAR QJR6–3.

Промышленные роботы-манипуляторы имеют возможность выполнять функции каменщика, что представлено на рис. 2. Такая машина способна класть 1000 кирпичей в час, их возможность работать 24 часа позволяет без снижения качества работы быстро завершить строительство загородного дома. На основе предварительно запрограммированных данных роботы, установленные на длинных стрелах, точно размещают каждый кирпич с помощью системы лазерного наведения. Эта технология позволяет эффективно использовать силы и ресурсы на строительной площадке. Программа пишется по чертежам дома, а работа может осуществляться от электрогенератора или другого источника тока на стройплощадке [7].



Рис. 2. Робот-каменщик

2. 3D-печать с использованием декартовых роботов. Технологии аддитивного строительства включают в себя применение 3D-принтеров для наслоения материала и создания конструкций. Эти методы позволяют быстрее и эффективнее строить жилые и коммерческие здания. 3D-принтеры могут использоваться для различных проектов, от индивидуальных домов до временного жилья. Декартовые роботы, применяемые в строительстве, оснащены суставными органами, которые двигаются в трехмерной системе координат. [3]. На рис. 3 представлен типичный представитель данного типа роботов — строительный робот для 3D-печати HC1018. Это современное интеллектуальное строительное оборудование для мелкозернистой печати павильонов, скамеек, беседок, террас, цветников и других компонентов архитектурного ландшафта сложной геометрической формы, как на каменной поверхности, так и на бетонной. Устройство автоматически, быстро и точно печатает различные компоненты архитектурного ландшафта на основе трехмерной дизайнерской модели. В качестве материала можно использовать печатный цементный раствор, бетон, геоплимер и другие аналогичные материалы. Использование 3D-печати для изготовления опалубки открывает совершенно новый уровень свободы в дизайне.



Рис. 3. Строительный робот для 3D-печати HC1018

3. Коллаборативные роботы, или коботы, представляют собой современные механизмы, способные работать в команде с людьми и выполнять сложные задачи, которые были бы сложно выполнить человеку или роботу по отдельности. В строительной отрасли, где всегда не хватает рабочей силы, коботы могут стать эффективным решением этой проблемы, выполняя неквалифицированную или монотонную работу, такую как сварка, укладка на поддоны и другие задачи. Это позволит освободить человеческий ресурс для выполнения более креативных и менее физически трудоемких задач. Кроме того, коботы могут быть установлены в различных позициях и направлениях, что делает их универсальными инструментами для автоматизации различных процессов строительства. [5]. На рис. 4 представлен коллаборативный робот Doosan A0912 вместе с DC-контроллером (устройство управления) и планшетным ПК, позволяющим легко программировать, а также настраивать различные приложения.



Рис. 4. Кобот Doosan A0912, предназначенный для выполнения однообразных задач в ограниченном рабочем пространстве

4. Беспилотные летательные аппараты (далее — БПЛА). Используются для выполнения различных задач, обеспечивая безопасность и ускорение реализации проектов. Управляемые дистанционно, они предоставляют актуальные данные о ходе работ без необходимости присутствия человека на месте. Это позволяет в реальном времени контролировать процесс строительства [2] на объекте.

С помощью БПЛА проводится 3D-картографирование, т. е. подробная аэрофотосъемка различных участков, по результатам которой с помощью информационного моделирования строительных объектов (BIM) можно построить

подробную и точную 3D-модель. Это метод значительно упрощает процесс территориального планирования и подготовки участка к строительству. Кроме того, детальная 3D-модель помогает более точно планировать бюджет и экономить средства в долгосрочной перспективе [2]. Так же их применяют для осуществления удаленного мониторинга и проведения воздушных инспекций стройплощадок без лишних затрат на аренду подъемного оборудования, причем данный вид роботов подойдет и для мониторинга труднодоступных конструкций: систем вентиляции, фасадов и т. д. На рис. 5 представлен геодезический БПЛА DJI PHANTOM 4 PRO RTK-PPK, используемый для аэрофотосъемки строительных объектов.



Рис. 5. БПЛА DJI PHANTOM 4 PRO RTK-PPK, используемый для аэрофотосъемки строительных объектов.

Источник: <https://slysky.ru/>

5. Самоходные строительные машины. В то время, как автопромышленность сейчас еще только работает над разработкой беспилотных автомобилей общего пользования, в строительной отрасли автономные машины довольно активно уже используются [2].

Существует несколько основных категорий самоходных машин, каждая из которых имеет свое назначение и область применения: тракторы, самоходные дорожно-строительные машины, внедорожные автомототранспортные средства и другие наземные безрельсовые механические транспортные средства. Одним из самых популярных и востребованных видов спецтехники при строительстве является колёсный трактор, на базе которого сзади устанавливается экскаваторное оборудование, а спереди машина укомплектовывается ковшом погрузчика. Таким образом, машина становится универсальной: способной выполнять широкий спектр строительных и дорожных работ, начиная от разработки, рыхления грунта и заканчивая погрузкой и разгрузкой сыпучих материалов.

6. Гуманоидные роботы. Развитие гуманоидных роботов представляет собой перспективный путь замещения человеческого труда. Несмотря на то, что их создание пока еще остается в основном на стадии проекта, уже существуют функционирующие человекоподобные машины, такие как робот-строитель HRP-5P из Японии, которые могут стать отправной точкой для новой эры кибернетики, представленный на рис. 6. Он был создан специалистами Национального института передовой промышленной науки и технологии как образец, приспособленный к гражданскому использованию. Благодаря искусственному интеллекту и продуманной функциональности робот HRP-5P способен фиксировать и перемещать тяжелые объекты, использовать двери и лестницы, обнаруживать препятствия и обходить их, а также работать с ручным инструментом. Он оснащен сложным комплексом технологий машинного зрения и распознавания объектов для ориентации в пространстве. Однако на данный момент этот робот все еще не может полностью заменить человеческого работника, так как его искусственный интеллект еще недостаточно мощный и не обладает способностью к самообучению. [2].

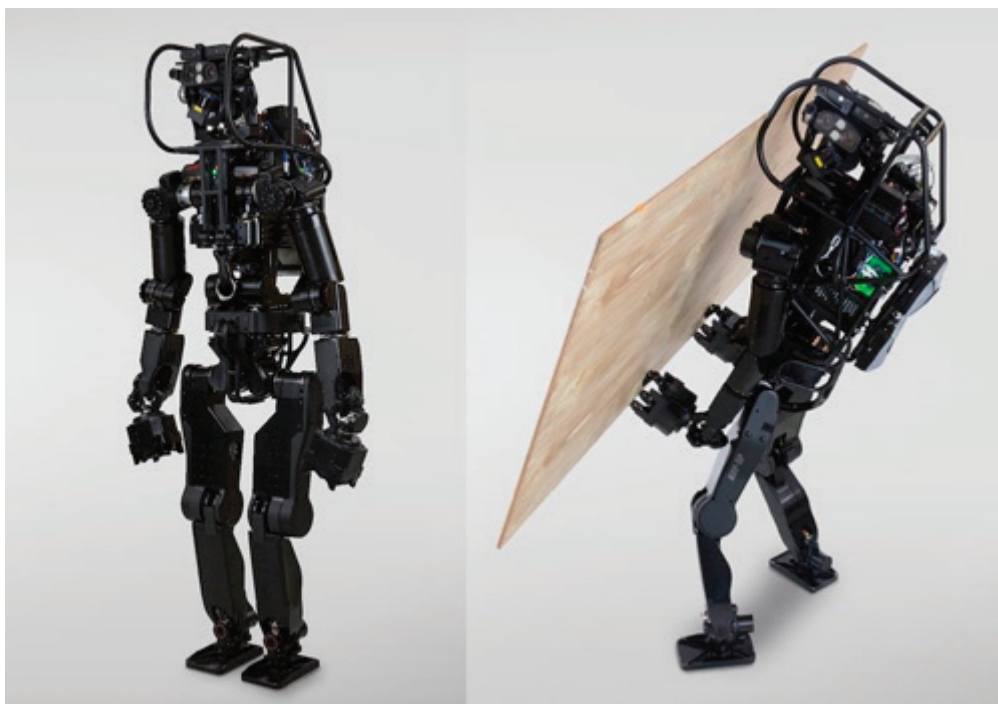


Рис. 6. Робот-строитель из Японии HRP-5P [8]

Далее рассмотрим основные преимущества внедрения роботов в строительную отрасль:

- увеличение интенсивности труда: машины способны заменить на производстве людей, выполняющих трудоемкие и однообразные операции;
- увеличение стабильности выполнения производственных операций: роботы, используемые в строительстве, в отличие от людей не нуждаются в перерыве на отдых и продолжительность их работы не ограничена трудовым законодательством, поэтому процесс производства может быть постоянным;
- гарантия более высоких качественных стандартов, которые недоступны работнику-человеку: внедрение роботов в строительство позволяет повысить скорость, точность и сложность различных операций [6];
- сглаживание человеческого фактора: люди устают, теряют внимательность, отвлекаются и непроизвольно допускают погрешности, у роботов же нет таких недостатков;
- уменьшение производственных затрат: благодаря высокой производительности, обеспечиваемой [6] роботами, возможно сократить издержки предприятий.

Тем не менее, не смотря на ряд неоспоримых преимуществ внедрения робототехники в строительстве, есть и существенные недостатки:

- высокие затраты на внедрение: приобретение и внедрение роботов в производственный процесс требует значительных финансовых затрат [6];
- техническое обслуживание: роботы требуют регулярного обслуживания и ремонта, что может повлечь за собой дополнительные расходы и простои;
- сложность обучения и программирования: программирование роботов может потребовать специальных навыков и обучения.

В качестве заключения хочется отметить, что, несмотря на описанные выше недостатки, интеграция роботизированных технологий в строительную отрасль представляет собой значительный шаг вперед на пути к улучшению процессов и повышению эффективности в сфере строительства, к которым, несомненно, стремятся передовые производственные предприятия и строительные компании Российской Федерации.

Литература:

1. Иванчук Е. В. Актуальность и направления развития робототехники в сфере дорожного строительства / Иванчук Е. В., Гайдай Р. Р. // Актуальные проблемы науки и техники: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, г. Ростов-на Дону, 2023. — С. 1022–1023.
2. Применение роботов в строительной отрасли в наши дни [Электронный ресурс]. URL: <https://pacs.ru/blog/tekhnologii/kak-roboty-menyayut-stroitelnyuyu-otrasl-uzhe-seychas/> (дата обращения: 10.09.2024).

3. Аддитивные технологии в строительстве: применение, преимущества и недостатки [Электронный ресурс]. URL: <https://gectaro.com/blog/tpost/bsb6idfvz1-additivnie-tehnologii-v-stroitelstve-pri> (дата обращения: 10.09.2024).
4. Более 10 примеров применения коботов JAKA на производстве [Электронный ресурс]. URL: <https://top3dshop.ru/blog/primenenija-kobotov-jaka-na-proizvodstve.html> (дата обращения: 03.09.2024).
5. Роботы в промышленности: преимущества и области применения [Электронный ресурс]. URL: <https://www.alpha-intech.com/blog/robotechnical/rooty-v-promyshlennosti/> (дата обращения: 03.09.2024).
6. Гулякин, Д. В. Использование роботов в строительстве / Д. В. Гулякин, А. А. Ковалева, М. Д. Мавропуло // Сборник статей Международного научно-практического конкурса, г. Пенза, 2018. — Т. 1. — С. 48–51.
7. Степанов, М. А. Особенности применения роботов в строительстве / М. А. Степанов, Е. В. Беликова // Строительные и дорожные машины. — 2020. — № 11. — С. 48–53.
8. <https://robotrends.ru/robopedia/1840-shagayushie-gumanoidnye-roboty-vse-sovershennee-hrp-5-mozhet-pomoch-na-stroyke>

Совершенствование расчета монолитной плиты перекрытия с пустотообразователями прямоугольной формы

Старыгина Ирина Дмитриевна, студент магистратуры
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

В статье представлены результаты сравнительного анализа пяти способов расчёта монолитной железобетонной плиты перекрытия с прямоугольными пустотообразователями (размером 500×500×100 мм, шаг 200 мм, толщина плиты 200 мм). Исследование выполнено в ПК «ЛИРА-САПР 2022» с использованием метода конечных элементов, а также по нормативным формулам [2]. Установлено, что модель в виде эквивалентной пластины-оболочки с приведёнными жёсткостными и инерционными характеристиками даёт результаты, наиболее близкие к точной объёмной модели (разница по прогибу ~30 %), но при этом на порядок проще в реализации. Упрощённые методы (приведённая высота сечения, моделирование нишами) приводят к завышению прогибов в 5–6 раз и не рекомендуются. Ручной расчёт по [2] ожидаемо даёт консервативные значения. Разработана пошаговая методика практического проектирования таких плит.

Ключевые слова: монолитная плита перекрытия, пустотообразователи прямоугольной формы, несъёмная опалубка, метод конечных элементов, ЛИРА-САПР, приведённая жёсткость, двутавровое сечение.

Optimization of the design of a monolithic floor slab with rectangular void formers

Starygina Irina Dmitrievna, master's student
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (St. Petersburg)

The article presents the results of a comparative analysis of five methods for calculating a monolithic reinforced concrete floor slab with rectangular void formers (500×500×100 mm, spacing 200 mm, slab thickness 200 mm). The study was performed in LIRA-SAPR 2022 using the finite element method as well as according to the standard formulas of SP 63.13330.2018. It was found that the equivalent plate-shell model with reduced stiffness and inertial characteristics gives results closest to the accurate volumetric model (deflection difference ~30 %) while being an order of magnitude simpler. Simplified methods (reduced cross-section height, niche modeling) lead to overestimation of deflections by 5–6 times and are not recommended. The manual calculation according to SP predictably yields conservative values. A step-by-step practical design methodology for such slabs is developed.

Keywords: monolithic floor slab, rectangular void formers, permanent formwork, finite element method, LIRA-SAPR, reduced stiffness, I-section.

Введение

Современное строительство предъявляет повышенные требования к экономичности и энергоэффективности зданий. Одним из перспективных способов снижения материалоёмкости монолитных железобетонных перекрытий является использование несъёмной опалубки в виде пусто-

тообразователей — полых корпусов из переработанного пластика (обычно формы усечённой пирамиды). Такие элементы позволяют удалить из плиты бетон, который не участвует в работе на сжатие, без снижения несущей способности. Согласно данным производителей и нормативным документам (СТО 35546020.001–2022 [1]), применение пустотообразователей даёт следующие преимущества:

- снижение собственного веса плиты до 30 %;
- экономия арматуры (особенно верхней зоны) до 40 %;
- уменьшение нагрузки на колонны, стены и фундаменты (до 10 % по арматуре в вертикальных элементах);
- увеличение допустимых пролётов и свободы планировки (отсутствие балок и капителей);
- повышение сейсмостойкости здания за счёт уменьшения массы.

Однако расчёт таких плит до сих пор остаётся нетривиальной задачей.

Действующий [2] рекомендует проектировать плиты с пустотообразователями аналогично полнотелым плоским плитам, используя приведение к двутавровому сечению. При этом не учитывается совместная работа пластического пустотообразователя с бетоном, не оценивается напряжённо-деформированное состояние в зонах концентрации пустот, а также не регламентируется использование программных комплексов.

Цель работы — разработка и верификация оптимальной расчётной модели монолитной плиты с прямоугольными пустотообразователями, которая обеспечивала бы достаточную точность (погрешность не более 30–40 % по сравнению с детальными объёмными моделями) при минимальных затратах времени на моделирование и обработку результатов.

Объект исследования — плита перекрытия с геометрическими параметрами:

- габаритные размеры в плане: $L_x = 2,1$ м, $L_y = 2,1$ м;
- полная толщина плиты: $H = 200$ мм;
- пустотообразователь: прямоугольный размером $a \times b \times h_{\text{пуст}} = 500 \times 500 \times 100$ мм;
- шаг пустот: $S_x = S_y = 200$ мм;

- количество пустотообразователей: $n = 9$ шт. (3×3);
- бетон: класс В25 ($R_b = 14,5$ МПа, $R_{bt} = 1,05$ МПа, $E_b = 30000$ МПа, $\rho_0 = 2500$ кг/м³);
- арматура: класс А500С ($R_s = 435$ МПа, $E_s = 200000$ МПа), диаметр 10 мм, шаг 200 мм в обоих направлениях.

Граничные условия — шарнирное опирание по контуру (запрещены перемещения по вертикали и горизонтали на четырёх гранях).

Работа выполнялась в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2022». Дополнительно проведён ручной проверочный расчёт по формулам [2].

Конструктивные особенности плит с пустотообразователями

Пустотообразователь (рис. 1) представляет собой полый корпус в форме усечённой пирамиды, открытой со стороны большего основания.

На верхней стороне имеются крестообразные выступы (средства фиксации), а на нижней — конусные опорные ножки высотой от 0 до 10 см (чаще 5–6 см). Опорные ножки служат для создания защитного слоя нижней арматуры и передачи нагрузки от пустотообразователя на нижний слой бетона. По периметру предусмотрены рёбра жёсткости и отверстия для соединения муфтами.

Соединительные муфты обеспечивают проектное состояние между пустотообразователями в свету и жёсткость при укладке бетона. Технология производства плит перекрытия с пустотообразователями предусматривает двухслойное бетонирование.

Пустотообразователи рекомендуется размещать равномерно по площади пролёта, исключая зоны действия

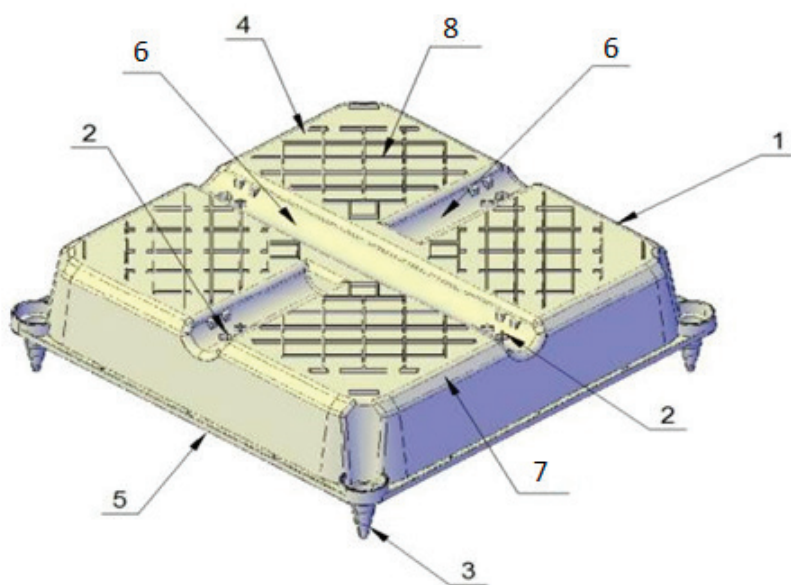


Рис. 1. Общий вид пустотообразователя одиночной формы. 1 — полый корпус; 2 — средство фиксации;

3 — опорные ножки; 4 — ребро жесткости, подкрепляющие верхнюю сторону; 5 — ребро жесткости, опоясывающее нижнюю поверхность корпуса; 6 — желоб; 7 — зона сопряжения верхней и боковых сторон; 8 — шероховатости в виде полос

больших поперечных сил — это места опирания вертикальных конструкций и краевые участки плиты.

Эти конструктивные особенности необходимо учитывать при создании расчётной модели: пустоты не должны попадать в приопорные зоны, а модель должна отражать снижение как веса, так и изгибной жёсткости, но не завышать его.

Описание рассмотренных методов расчёта

В рамках статьи рассмотрены пять различных подходов к расчёту одной и той же плиты. Ниже дано их краткое описание.

1. Вариант № 1 — объёмные конечные элементы (размер 50×50×50 мм)

Создана трёхмерная модель плиты из объёмных конечных элементов (параллелепипедов) с размером ребра 50 мм. Арматура задана стержневыми элементами диаметром 10 мм, расположенными в двух направлениях с шагом 200 мм. Общее число объёмных КЭ достигает ~530 тыс., что делает модель очень ресурсоёмкой.

Результатом расчёта являются поля напряжений: σ_x , σ_y , σ_z (главные нормальные напряжения) и τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz} (касательные). Для перехода к привычным инженерным усилиям (M , Q) используются формулы, основанные на сопротивлении материалов.

2. Вариант № 2 — эквивалентная пластина (оболочка) с приведёнными характеристиками

Модель построена с использованием плоских оболочечных конечных элементов. Толщина оболочки принята равной полной высоте плиты $H = 200$ мм. Учёт пустот выполняется путём снижения изгибной жёсткости и объёмного веса материала. Модель выдаёт непосредственно M_x , M_y , Q_x , Q_y , прогибы.

3. Вариант № 3 — сплошная плита с приведённой высотой сечения

Основан на идее снижения толщины плиты пропорционально уменьшению объёма бетона. Высота приведённого сечения находится из равенства объёмов.

Плита моделируется также оболочечными элементами, но материал имеет стандартные характеристики. Пустоты никак не моделируются. Этот метод крайне прост, но игнорирует тот факт, что пустоты занимают только среднюю часть сечения (нейтральную зону) и не снижают момент инерции так сильно, как уменьшение всей высоты.

4. Вариант № 4 — моделирование пустот как «ниш» в ПК «Сапфир»

Специальный инструмент «Ниша» в ПК «Сапфир» позволяет задать локальное уменьшение толщины оболочки на выбранных участках. В данном случае на площадях 500×500 мм (в проекции пустотообразователей) толщина плиты уменьшена с 200 мм до 50 мм (имитация сквозного отверстия). Такая модель также очень проста в создании, но физически не соответствует работе пустот, так как в реальности пустотообразователь не создаёт сквозного проёма, а лишь замещает часть бетона полостью с пластиковыми стенками.

5. Вариант № 5 — ручной расчёт по [2]

Выполнен двумя способами:

- как для сплошной плиты с приведённой высотой 150 мм (аналогично варианту № 3, но аналитически).
- как для плиты с двутавровым сечением: ширина полка $b_f = 700$ мм (по осям пустот), ширина ребра $b = 200$ мм, высота полки $h_f = 50$ мм, полная высота 200 мм.

Результаты расчётов и их анализ

Все модели были рассчитаны в ПК «ЛИРА-САПР 2022» при одинаковых нагрузках и граничных условиях. Сравнительная таблица основных параметров приведена ниже. Значения для варианта № 5 (ручной расчёт) даны по двутавровому сечению (как более корректному).

Результаты сравнительного анализа для каждой комбинации нагружения представлены в табл. 1.

Анализ вертикальных перемещений (прогибов)

В варианте № 1 прогиб составляет 0,0143 мм, что объясняется высокой жёсткостью объёмной.

Таблица 1. Результаты сравнительного анализа для каждого варианта моделирования плиты

Сравн. хар-ка	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3	Вариант № 4	Вариант № 5
Вертикальные перемещения	0,0143 мм	0,0191 мм	0,0721 мм	0,0869 мм	0,55 мм
Усилие M_x	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$ (т·м)/м	$\pm 0,068$ (т·м)/м	0,194 (т·м)/м –0,063 (т·м)/м	0,275 (т·м)/м –0,105 (т·м)/м	2,56 (т·м)/м –2,56 (т·м)/м
Усилие M_y	$6 \cdot 10^{-5}$ (т·м)/м $-7 \cdot 10^{-5}$ (т·м)/м	0,014 (т·м)/м –0,023 (т·м)/м	0,199 (т·м)/м –0,036 (т·м)/м	0,422 (т·м)/м –0,652 (т·м)/м	2,39 (т·м)/м –2,39 (т·м)/м
Усилие M_{xy}	-	$\pm 0,028$ (т·м)/м	0,192 (т·м)/м –0,188 (т·м)/м	$\pm 0,196$ (т·м)/м	-
Усилие Q_x	$\pm 0,016$ т/м	$\pm 2,18$ т/м	8,09 т/м –7,12 т/м	3,11 т/м –2,92 т/м	$\pm 53,29$ т/м
Усилие Q_y	$\pm 0,012$ т/м	3,89 т/м –3,87 т/м	6,36 т/м –6,63 т/м	3,3 т/м –3,26 т/м	$\pm 50,24$ т/м

Вариант № 2 даёт прогиб 0,0191 мм — на 34 % больше, чем № 1, что можно считать хорошей сходимостью.

Вариант № 3 ($h=150$ мм) даёт прогиб 0,0721 мм — в 5 раз выше варианта № 2.

Вариант № 4 (ниши) — ещё выше, 0,0869 мм в 4,5 раза выше варианта № 2.

Вариант № 5 даёт прогиб 0,55 мм — на порядок больше, так как учитывается реальная трещиностойкость и длительное действие нагрузок. Однако прогиб 0,55 мм при пролёте 2100 мм составляет $L/3800$, что значительно меньше предельного ($L/200$), поэтому по деформациям конструкция заведомо проходит.

Анализ изгибающих моментов M_x и M_y

В варианте № 1 моменты очень малы (0,023 т·м), что связано с тем, что объёмная модель в рамках линейного расчёта «не видит» изгиба в полной мере из-за очень мелкой сетки и отсутствия учёта нелинейности. Этот результат не следует использовать для проектирования.

Вариант № 2 даёт умеренные моменты: $M_x = \pm 0,068$ т·м/м, $M_y = 0,014$ –0,023 т·м/м.

Вариант № 3 сильно завышает M_x (0,194 т·м, то есть в 8 раз выше, чем M_x в варианте № 2) и M_y (0,199 т·м, в 14 раз выше). Причина — неправильный учёт снижения жёсткости.

Вариант № 4 даёт ещё большее завышение, особенно по M_y (до 0,422 т·м, что в 30 раз выше варианта № 2). Это объясняется локальным ослаблением до 50 мм.

Вариант № 5 (ручной расчёт) даёт моменты 2,56 и 2,39 т·м — на два порядка выше, потому что он рассчитывает балку пролётом 2,1 м, а не плиту со всех сторон. Тем не менее, эти моменты являются предельными по прочности и показывают, что запас прочности реальной плиты очень высок.

Анализ поперечных сил Q_x , Q_y

Здесь также видно, что вариант № 2 даёт умеренные значения ($Q_{x\max} = 2,18$ т, $Q_{y\max} = 3,89$ т). Вариант № 3 завышает их до 8,09 т (в 3,7 раза), вариант № 4 — до 3,3 т (ближе к варианту № 2, но по M_x и M_y сильно искажён). Вариант № 5 даёт огромные поперечные силы (50 т), что связано с балочной схемой.

Общий характер распределения усилий

Во всех расчётах качественная картина одинакова: в приопорных зонах (по краям плиты) верхняя зона работает на растяжение, нижняя — на сжатие; в центральной пролётной зоне — наоборот (верх сжат, низ растянут). Зоны максимальных прогибов — центр.

Вывод по вариантам:

– Вариант № 1 — эталон по точности, но непригоден для рутинного проектирования.

– Вариант № 2 — оптимальный, сочетает достаточную точность и простоту.

– Варианты № 3 и № 4 — дают недопустимые погрешности, не рекомендуются.

– Вариант № 5 — слишком консервативен (завышение в 10–100 раз), может использоваться только как проверочный или для предварительных расчётов.

Таким образом, в качестве базовой методики для практического применения выбран **Вариант № 2**.

Разработанная методика расчёта

Ниже приведен пошаговый алгоритм, который может быть реализован в любом программном комплексе, поддерживающим расчёт пластинчатых элементов.

Шаг 1. Сбор исходных данных

Необходимо знать:

- геометрические размеры плиты в плане: L_x , L_y ;
- полную толщину плиты: H ;
- размеры одного пустотообразователя: a (вдоль оси X), b (вдоль оси Y), $h_{\text{пуст}}$ (высота пустоты);
- шаг пустот: S_x , S_y ;
- количество пустот: n ;
- класс бетона: нормативное значение начального модуля упругости E_0 и плотность ρ_0 ;
- нагрузки.

Шаг 2. Выбор расчётной полосы

Для вычисления приведённого модуля упругости выделяется полоса шириной, равной шагу пустот в направлении, для которого определяется жёсткость.

Если пустоты квадратные и шаг одинаков, то можно принять $B_{\text{расч}} = S_x = S_y$.

Шаг 3. Вычисление приведённого модуля упругости

Момент инерции сплошного сечения полосы:

$$I_{\text{спл}} = B_{\text{расч}} \cdot H^3 / 12.$$

Момент инерции пустоты в пределах полосы:

$I_{\text{пуст}} = b \cdot h_{\text{пуст}}^3 / 12$ (где b — размер пустоты поперёк направления изгиба).

Коэффициент снижения изгибной жёсткости:

$$\alpha_1 = I_{\text{пуст}} / I_{\text{спл}}.$$

Приведённый модуль упругости материала оболочки:

$$E_{\text{ред}} = E_0 \cdot (1 - \alpha_1).$$

Если шаг пустот разный по осям X и Y , вычисляются α_{1x} и α_{1y} , и в модели задаётся ортотропный материал с модулями $E_x = E_0 \cdot (1 - \alpha_{1x})$, $E_y = E_0 \cdot (1 - \alpha_{1y})$. Коэффициент Пуассона принимается одинаковым (0,2).

Шаг 4. Вычисление приведённой плотности

Полный объём плиты: $V_{\text{полн}} = L_x \cdot L_y \cdot H$.

Объём всех пустот: $V_{\text{пустот}} = n \cdot a \cdot b \cdot h_{\text{пуст}}$.

Объём бетона: $V_{\text{бет}} = V_{\text{полн}} - V_{\text{пустот}}$.

Коэффициент заполнения: $\alpha_v = V_{\text{бет}} / V_{\text{полн}}$.

Приведённая плотность: $\rho_{\text{ред}} = \rho_0 \cdot \alpha_v$.

Шаг 5. Построение конечно-элементной модели в ПК

- Тип конечных элементов — оболочка (пластина) с четырьмя или тремя узлами.
- Толщина оболочки назначается равной H (полной высоте плиты).
- Создаётся новый материал «Эквивалентный бетон» с характеристиками:
 $E = E_{\text{ред}}$, $\nu = 0,2$, $\rho = \rho_{\text{ред}}$.
- Нагрузки: собственный вес задаётся через $\rho_{\text{ред}}$, остальные — как распределённые по площади.

Шаг 6. Выполнение расчёта

Проводится статический линейный расчёт (учёт нелинейности не обязателен, так как приведённые характеристики уже дают приемлемую точность для определения усилий). Результаты — поля прогибов, изгибающих моментов M_x , M_y , крутящих моментов M_{xy} , поперечных сил Q_x , Q_y .

Шаг 7. Проверка приопорных и краевых зон

Согласно конструктивным требованиям, в зонах, где Q_x или Q_y превышают 30–40 % от предельных, следует предусмотреть сплошной бетон (без пустот) и усиленное поперечное армирование. В предложенной методике эти зоны выявляются автоматически по эпюрам Q .

Литература:

1. СТО 35546020.001–2022 Конструкции бетонные и железобетонные сборно-монолитные. Правила проектирования. — М.: ОАО «РЖД», 2022. — 127 с.
2. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52–01–2003. — М.: Минстрой, 2018. — 148 с.
3. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. — М.: ОАО «НИЦ «Строительство», 2017. — 104 с.
4. Флимонова Е. С. Анализ рекомендуемой методики расчета для монолитных плит перекрытия с различными типами пустотообразователей по системе Sobiax // Строительство и архитектура. — 2023. — № 2. — С. 18–25.
5. Егоров П. И., Тереза Е. А. Анализ расчета монолитной плиты перекрытия с пустотообразователями прямоугольной формы // Ученые заметки ТОГУ. — 2016. — № 4. — С. 186–191.
6. Мохова А. В. Преимущества использования несъемной опалубки (пустотообразователи и соединительные муфты) при проектировании и строительстве зданий и сооружений // Актуальные вопросы техники, науки, технологии. — Брянск, 2023. — С. 696–702.
7. Абаев З. К., Базоев А. Р., Есенов З. К. Методика проектирования монолитной многпустотной плиты с использованием ПК ЛИРА-САПР // Современные научно-технические и социально-гуманитарные исследования. — Владикавказ, 2021. — С. 10–14.
8. Шаленный В. Т., Акимов С. Ф., Павлов К. Н. Совершенствование технологии устройства монолитных и сборно-монолитных железобетонных перекрытий с применением пустотообразователей // Инновационное развитие строительства и архитектуры. — Симферополь, 2023. — С. 259–265.
9. Карпов Р. Е., Бочкарева Т. М. Исследование характера работы облегченной фундаментной плиты с применением пустотообразователей // Современные технологии в строительстве. — Пермь, 2023. — Т.1. — С. 45–49.
10. Джамуев Б. К. Влияния несъемных пустотообразователей на прочность защемленных по контуру монолитных железобетонных плит перекрытия // Строительство и реконструкция. — 2024. — № 2(112). — С. 3–15.

Заключение

В результате выполнения диссертационного исследования были решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ существующих конструктивных решений и методов расчёта монолитных плит перекрытия с пустотообразователями. Установлено, что нормативный подход (как к сплошной плите) не учитывает совместную работу элементов, а объёмные конечно-элементные модели слишком трудоёмки для повседневного проектирования.
2. Разработана и протестирована методика расчёта на основе моделирования плиты эквивалентной пластинной-оболочкой с приведёнными модулем упругости ($E_{\text{ред}}$) и плотностью ($\rho_{\text{ред}}$). Для рассматриваемой плиты с пустотообразователями $500 \times 500 \times 100$ мм, шаг 200 мм, $H=200$ мм: $E_{\text{ред}} = 27300$ МПа, $\rho_{\text{ред}} = 1,9$ т/м³.
3. Проведён сопоставительный расчёт пяти вариантов моделирования (объёмные КЭ, эквивалентная пластина, приведённая высота, ниши, ручной расчёт). Показано, что варианты № 3 и № 4 дают завышение прогибов в 5–6 раз, моментов — до 30 раз, а ручной расчёт по балочной схеме завышает усилия на порядок. Наилучшее соотношение точности и трудоёмкости обеспечивает вариант № 2.
4. Разработана пошаговая инженерная методика, включающая сбор данных, вычисление приведённых характеристик, создание конечно-элементной модели и подбор армирования. Методика опубликована в виде алгоритма.

Практическая применимость физически-линейного расчёта при оценке прогрессирующего обрушения на примере локального удаления колонны

Черданцева Анастасия Андреевна, студент магистратуры
Дальневосточный федеральный университет (г. Владивосток)

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, локальный отказ опоры, вторичная система, физически-линейный расчет.

Задачи предупреждения прогрессирующего обрушения требуют проверки, сможет ли несущая система сохранить целостность при локальном повреждении и перераспределить усилия по альтернативным путям. В инженерной практике это выполняют по логике: модифицируют расчётную схему, задают аварийное (особое) сочетание нагрузок, выполняют физически-линейный расчёт и проверяют несущую способность по нормативным значениям прочности. Такой порядок изложен в профильной литературе и применяется для экспресс-оценки альтернативных путей передачи нагрузки [4].

Термины и порядок проверки аварийной ситуации даны в ГОСТ 27751–2014 и СП 385.1325800.2018. Для нагрузок и сочетаний принят подход СП 20.13330 [2]: в «особой» ситуации учитываются постоянные и длительные составляющие, кратковременные воздействия из сочетания исключаются.

В исследовании сопоставлены две модели железобетонной системы перекрытия в составе регулярного каркаса: А — исходная (с колонной) и В — модифицированная (с удалением одной колонны на нижнем уровне). Геометрия, сетка, граничные условия и набор нагрузок в обеих схемах идентичны, различается — наличие опоры. Расчёты выполнены в физически-линейной постановке. Проверки несущей способности ведутся по нормативным значениями прочности, как предписано для аварийной ситуации.

Сравнение проводилось по трём наблюдаемым показателям в зоне удаления опоры: изгибающий момент в плите M_x , вертикальные перемещения w и требуемая площадь нижней арматуры по оси y (распределение требуемой арматуры $A_{s,y}$). Ниже приведены результаты, полученные при одинаковом сочетании нагрузок для обеих схем.

Изгибающие моменты. По распределению M_x положительный максимум возрастает с $4,17 \text{ т} \cdot \text{м/м}$ на $4,27 \text{ т} \cdot \text{м/м}$, т. е. около $+2,4 \%$. При сравнении экстремумов по модулю необходимо учитывать и отрицательную зону у контура: $|M_x|_{\max}$ достигает $9,15 \text{ т} \cdot \text{м/м}$, что превышает положительные значения по величине и подтверждается шкалой на Рис. 2.

Прогибы. Максимальный прогиб w в зоне удаления вырос с $8,66 \text{ мм}$ до $38,6 \text{ мм}$ примерно на выявлены 346% ($\Delta w = +29,94 \text{ мм}$). Форма прогиба закономерна: деформация локализована над удалённой опорой, с плавным затуханием к закреплениям. Рост объясняется потерей местной вертикальной жёсткости.

Требуемая нижняя арматура $A_{s,y}$. В обеих схемах достигается один и тот же верхний порог шкалы $A_{s,y \max}$. Отличается распределение: при удалении колонны зона $10,1\text{--}12,7 \text{ см}^2/\text{м}$ заметно расширяется и вытягивается в узкую продольную полосу, пересекающую место удаления вдоль пролётов. В исходной схеме арматура распределена более равномерно: преобладают уровни $5,66\text{--}7,69 \text{ см}^2/\text{м}$, с локальными участками $10,1\text{--}12,7 \text{ см}^2/\text{м}$ в серединах пролётов.

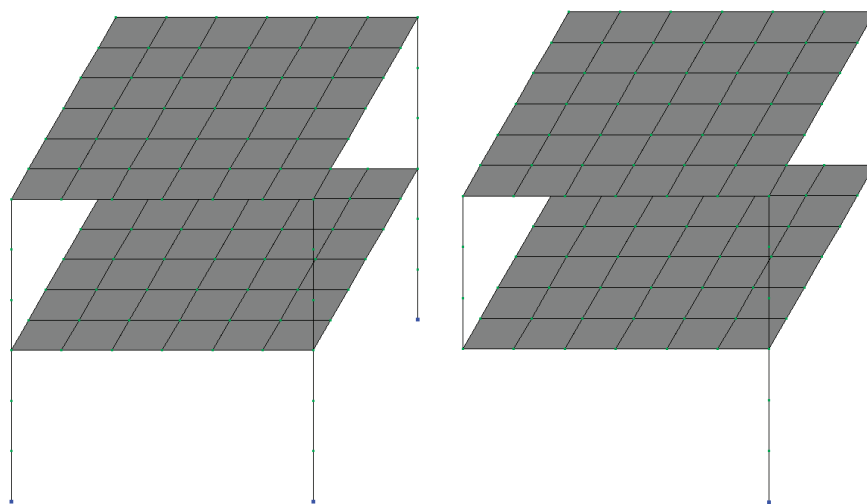


Рис 1. Система А и В

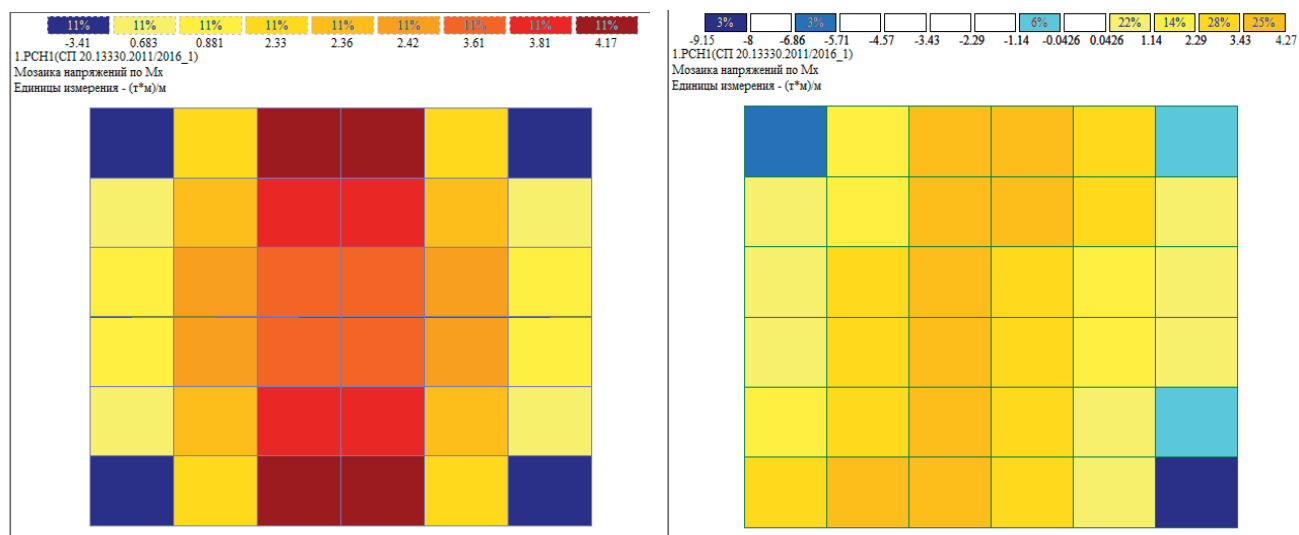


Рис. 2. Распределение изгибающих моментов в плите (Варианты А и В)

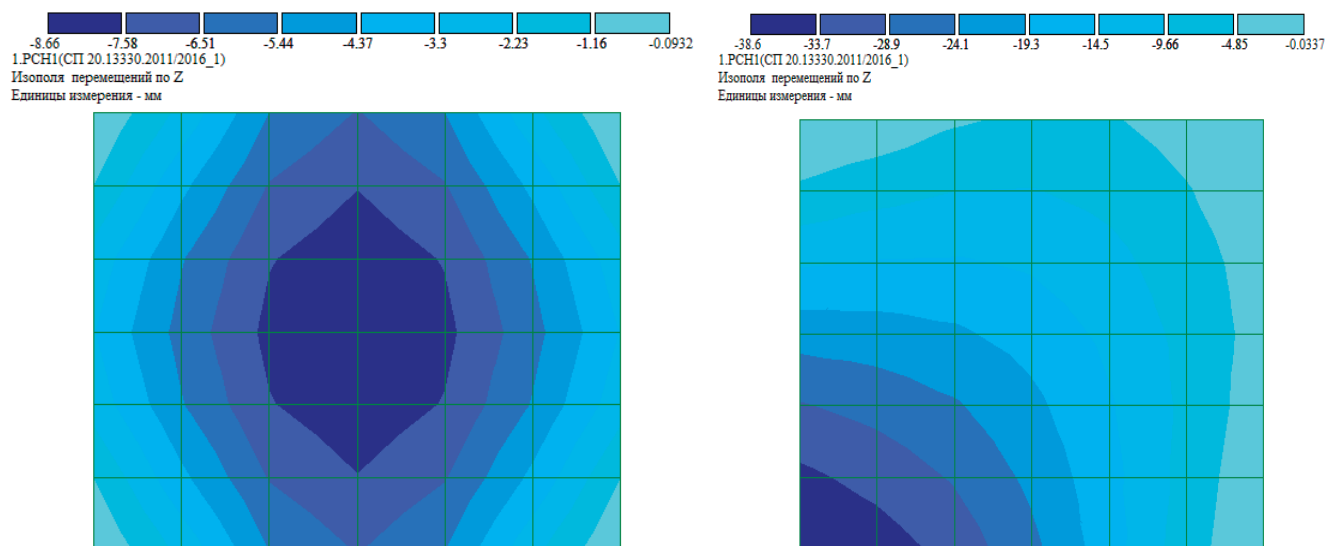


Рис. 3. Распределение вертикальных перемещений (Варианты А и В)

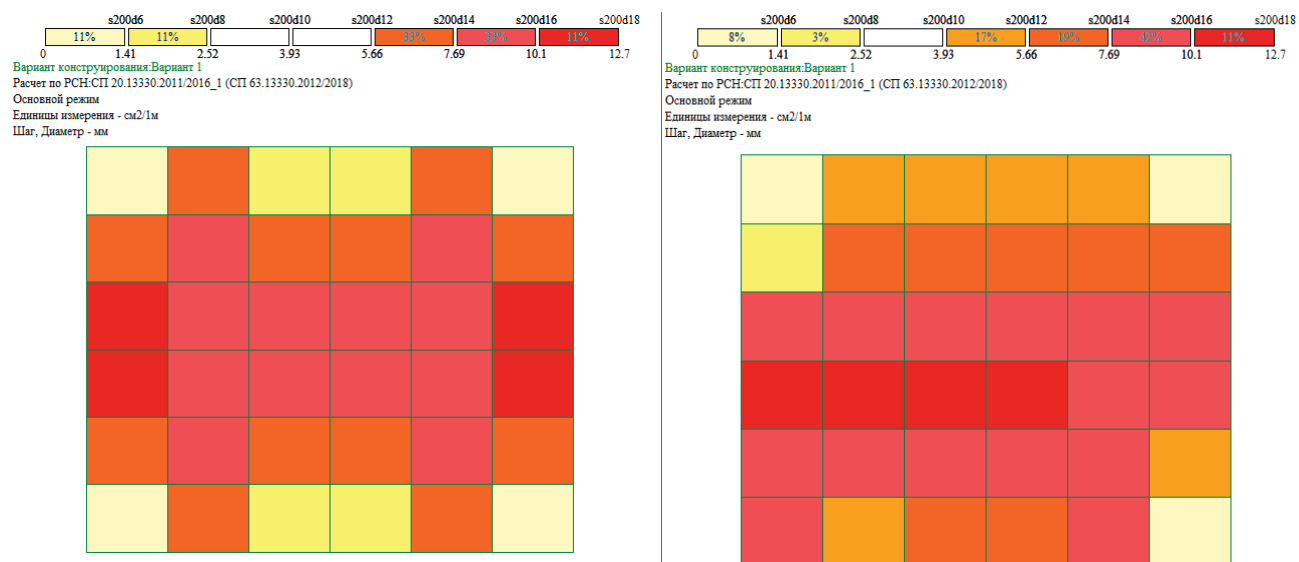


Рис. 4. Распределение требуемой нижней арматуры (Варианты А и В)

Верхняя плита при удалении колонны принимает часть перераспределённой нагрузки изгибом в обоих направлениях. По M_x в верхней плите фиксируется рост положительного экстремума с $4,27 \text{ т} \cdot \text{м/м}$ до $4,39 \text{ т} \cdot \text{м/м}$, при этом максимум расположен над местом удаления и переходит в соседние ячейки. По модулю крайние отрицательные значения достигают $|M_x| = 5,18 \text{ т} \cdot \text{м/м}$. Требуемая нижняя арматура верхней плиты при тех же сочетаниях возрастает с $A_{s,y} = 10,1 \text{ см}^2/\text{м}$ до $12,7 \text{ см}^2/\text{м}$ (увеличение порядка 26 %). Повышенные значения сосредоточены в продольной полосе, пересекающей место удалённой опоры, с затуханием.

В оставшихся колоннах первого этажа по эпюрам изгибающих моментов фиксируется закономерный рост усилий. Составляющая по оси y : $|M_y|_{\max}$ увеличивается с $6,28 \text{ т} \cdot \text{м}$ до $9,22 \text{ т} \cdot \text{м}$, что соответствует приросту около 47 %. Составляющая по оси z : $|M_z|_{\max}$ возрастает с $4,90 \text{ т} \cdot \text{м}$ до $16,36 \text{ т} \cdot \text{м}$, прирост порядка 234 %. Наибольшие значения приходятся на верхние участки стоек на уровне сопряжения. По результатам подбора продольной арматуры требуемая суммарная площадь в наиболее нагруженной колонне возрастает с $8,04 \text{ см}^2$ до $14,76 \text{ см}^2$ (около +84 %); максимум также располагается в верхних сечениях соседних с удалённой опорой стоек.

Вертикальные перемещения узлов верха колонн растут синхронно с прогибом плиты (с $8,66 \text{ мм}$ до $34,5 \text{ мм}$). В пределах принятой физически-линейной постановки признаки потери несущей способности колонн по изгибу сжатием не выявлены.

Полученная картина соответствует инженерной модели альтернативного пути. Удаление опоры нарушает исходную статическую схему, нагрузка перераспределяется, и плита начинает работать на изгиб в двух направлениях. Наличие соседних опор обеспечивает непрерывный путь передачи усилий. Это подтверждается ростом M_x и прогибов W в зоне удаления опоры и локальным увеличением требуемой $A_{s,y}$ при сохранении работоспособности смежных участков. При проверке по нормативным значениям прочности материалов и при особом сочетании воздействий альтернативный путь сформирован. Признаков потери несущей способности в затронутых элементах не выявлено.

Кроме того, стоит заметить, что физически-линейная постановка даёт корректную первую оценку для аварийной ситуации, но не описывает развитие динамики процесса. Для граничных случаев целесообразны углублённые проверки: уточнение по нелинейной модели и сопоставление с конструктивными требованиями разделов СП 385 [3].

Литература:

1. ГОСТ 27751–2014. Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения. — М.: Изд-во стандартов, 2014. — 28 с.
2. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. — М.: Минстрой России, 2016. — 95 с.
3. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. — М.: Стандартинформ, 2018. — 36 с.
4. Перельмутер А. В. В расчётах сооружений на прогрессирующее обрушение // Вестник МГСУ. — 2008. — № 1. — С. 119–128.
5. Fedorova N. V., Savin S. Y. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage — an analytical review // Building and Reconstruction. — 2021. — P. 76–108.

Исследование напряженно-деформированного состояния стальной двутавровой балки в зоне анкеровки преднапряжённой затяжки

Чернега Илья Сергеевич, студент магистратуры

Научный руководитель: Михаськин Владимир Владимирович, Доцент

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

В работе рассматривается конструктивная система, состоящая из стальной двутавровой балки, усиленной угловыми элементами и затяжкой. Для выполнения исследования будут использоваться программы Tekla Structures, CSI Sap2000. Tekla используется для демонстрации конструкций, Sap 2000 для расчетов.

Ключевые слова: преднапряжение, затяжка, анкеровка.

Цель исследования: Анализ зависимости напряженно-деформированного состояния зоны анкеровки стальной двутавровой балки в условиях преднапряжения и выявление закономерностей работы в них.

Задачи исследования:

- Вычислить максимальное значение пренапряжения.
- Расположить эффективно ребра жесткости.
- Провести анализ напряженно-деформированного состояния

Объект исследования: Стальная двутавровая балка.

Предмет исследования: напряженно-деформированное состояние зоны анкеровки.

1. Общие данные

В качестве расчетной схемы принята шарнирно-опертая балка двутаврового сечения (рис. 1), усиленная предварительно напряженной затяжкой, выполненной из арматурного стержня. Двутавровую балку выберем из С255, сечения 25Б2, длиной 6 метров. Для обеспечения устойчивости стенки сделаны вертикальные металлические ребра из стали С255 в зонах анкерования (рис. 2, 3). Оптимальное положение ребер будет подобрано согласно расчету и анализу усилий конструкции. Крепление затяжки осуществляется через уголок, который усилен вертикальными ребрами, все материалы из стали С255.

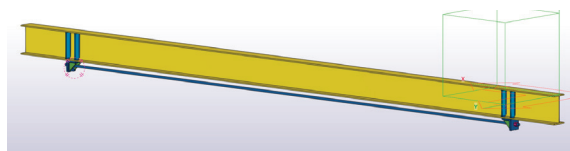


Рис. 1. Общий вид конструктивной схемы

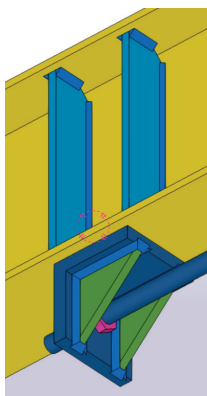


Рис. 2. Узел анкерования 1

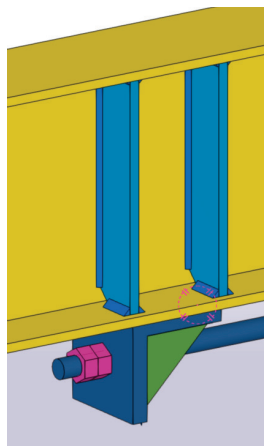


Рис. 3. Узел анкерования 2

Один из вариантов элемента затяжки представляет собой гладкий стержень с резьбой на обоих концах для крепления гайками. Согласно ГОСТ 5781–82, допускается изготовление гладкого профиля для стали классов А-II (А300),

A-III (A400), A-IV (A600) и A-V (A800) по требованию потребителя. В настоящем исследовании принят стержень диаметром 20 мм из стали класса A600.

Материал стальной двутавровой балки сталь С255. Предел текучести равен 255 МПа и соответствующий коэффициент надежности $\gamma_m = 1,05$.

Предельное напряжения, достигаемые в конструкции равны $255 \text{ МПа} / 1,05 \approx 242,8 \text{ МПа}$.

Конструкция включает:

- Основную балку сечением 25Б2, $l=6 \text{ м}$.
- Усиливающие элементы: уголки $100 \times 30 \text{ мм}$.
- Элементы преднапряжения: затяжка $\varnothing 20 \text{ мм}$.
- Ребра жесткости толщиной 10 мм.
- Материал всех элементов — сталь марки 255С ($\sigma_y = 255 \text{ МПа}$, $E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$).

2.1 Методология исследования и методика расчета

2.1.1 Общая информация

Для комплексного анализа НДС конструктивной схемы использован метод конечных элементов (МКЭ), который представляет собой универсальный численный метод решения краевых задач, описываемых дифференциальными уравнениями. Основная идея метода заключается в разделении объекта на конечное множество подобластей простой геометрии (конечных элементов), что позволяет свести исходную задачу к решению системы алгебраических уравнений. Данный подход обеспечивает возможность определения напряженно-деформированного состояния, температурных полей и других физических величин в объектах со сложной конфигурацией. Расчетная схема создавалась в программном комплексе SAP2000, позволяющий:

- Учитывать геометрическую нелинейность конструкции.
- Моделировать контактные взаимодействия элементов.
- Анализировать распределение напряжений в сложных узлах.
- Наличие российских норм.
- Легкое построение расчетной схемы.
- Автоматический подсчет грузовой площади.

Для численного моделирования рассматриваемой конструкции применяется расчетная схема на основе пластинчатых конечных элементов (КЭ). Данный подход обеспечивает адекватное описание работы тонкостенных элементов (балки, уголков, затяжки) с учетом их жесткости.

Использование пластинчатых КЭ позволяет:

- Учесть двухосное напряженное состояние конструкции, включая изгиб, кручение и сдвиг.
- Корректно смоделировать распределение напряжений по сечению элементов.
- Обеспечить взаимодействие компонентов системы (балки, уголков, затяжки) через узловые соединения.

Особенности расчетной модели:

- Размер конечного элемента: $10 \times 10 \text{ мм}$ (обеспечивает сходимость результатов).
- Граничные условия: шарнирное закрепление.
- Нагрузка: равномерно-распределенная 4200 кг/м^2 , 8400 кг/м^2 .

Собираем расчетную схему из пластинчатых элементов и соответствующего материала, в соответствии с размерами сечения двутавровой стальной балки 25Б2 (рис. 4, 5, 6).

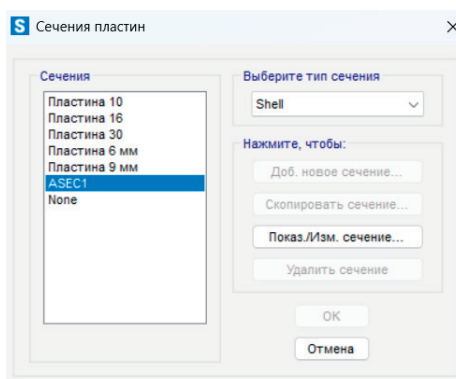


Рис. 4. Сечения пластин

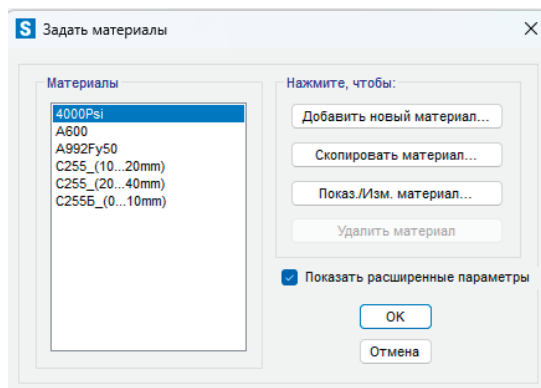


Рис. 5. Материалы расчетной схемы

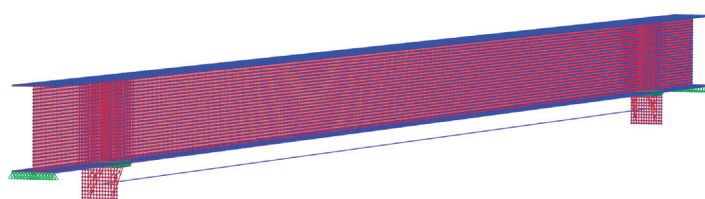


Рис. 6. Общий вид расчетной схемы

Соединение уголка с нижней полкой двутавровой балки реализовано посредством абсолютно жесткой вставки (рис.7), обеспечивающей:

- Кинематическое разделение рабочих плоскостей элементов;
- Исключение взаимного влияния изгибных и мембранных деформаций в узле;
- Передачу усилий без относительных угловых перемещений.

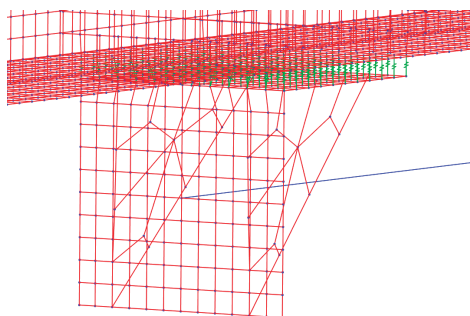


Рис. 7. Соединение уголка с полкой двутавра с помощью жестких вставок

В расчетной модели принята шарнирная схема опирания балки (Рис.8, 9).

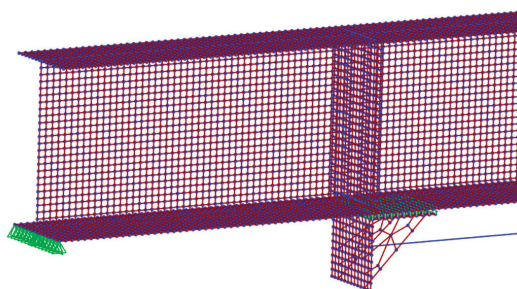


Рис. 8. Вид зоны анкеровки расчетной схемы

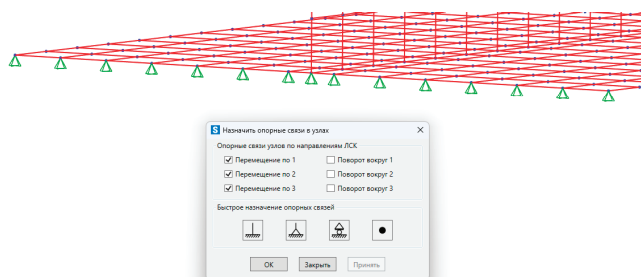


Рис. 9. Шарнирное закрепление балки

Для реализации преднапряженного состояния конструкции в программном комплексе SAP2000 принят следующий подход: величина преднапряжения задается через значение деформации, мм (рис. 10), возникающей в затяжке при приложении к верхней полке двутавровой балки равномерно распределенной нагрузки с различной интенсивностью.

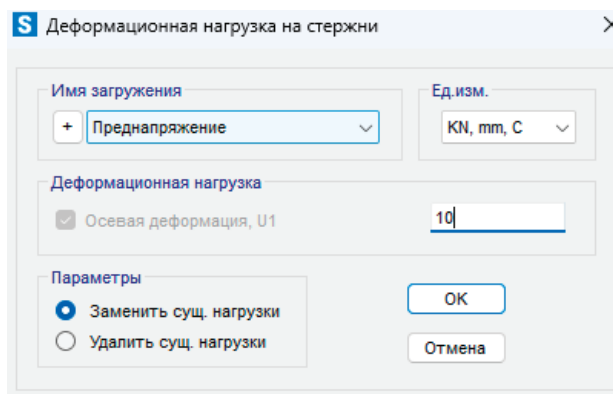


Рис. 10. Задание преднапряжения затяжки

Визуализация процесса создания преднапряжения выполняется посредством графического представления зависимости величины деформации от приложенного усилия. График отражает линейный характер поведения системы при достижении заданного уровня преднапряжения, учитывающий взаимодействие всех элементов конструкции.

2.1.2 Определение преднапряжения затяжки

В соответствии с СП 63.13330.2018 (п. 9.1.1) величина предварительного напряжения арматуры задается удлинением исходя из прочностных характеристик арматурного стержня, а именно:

По усилию: до 80 % от временного сопротивления арматуры (предела ее прочности).

По деформации: величина относительного удлинения, определяемая через расчетное напряжение и модуль упругости стали.

Установление таких пределов является критически важным и обусловлено комплексом инженерных соображений:

1. Компенсация релаксации напряжений. Высоконапряженная сталь склонна к явлению «ползучести» — необратимому снижению напряжения при длительном воздействии. Чем выше начальное натяжение, тем значительнее эти потери.

2. Нивелирование технологических погрешностей. Ограничения закладывают запас на возможные отклонения в процессе производства, такие как перетяжка или неточность измерительной аппаратуры.

3. Учет поведения бетона. При обжатии бетон подвержен длительным деформациям ползучести и усадки, что неизбежно приводит к сокращению усилия в арматуре, и этот фактор должен быть учтен заранее.

Фактическое удлинение арматуры в миллиметрах рассчитывается по формуле:

$$\Delta L = (\sigma_{sp} / E_s) * L, \text{ где:}$$

σ_{sp} — расчетное напряжение в арматуре при натяжении;

E_s — модуль упругости арматуры (принимается $\sim 2.0 * 10^5$ МПа);

L — исходная длина натягиваемого стержня или пучка.

Арматура класса А600 (временное сопротивление $R_m = 600$ МПа) натягивается до напряжения $\sigma_{sp} = 0.8 * 600 = 480$ МПа. Длина стержня 5,5 метров (5500 мм).

1) $\Delta L = (480 / 200\,000) * 4500 = 0.0024 * 4500 = 10,8$ мм.

2) $\Delta L = (480 / 200\,000) * 5000 = 0.0024 * 5000 = 12,0$ мм.

3) $\Delta L = (480 / 200\,000) * 5500 = 0.0024 * 5500 = 13,2$ мм.

При различной длине затяжки размеры допустимых преднапряжений линейно изменяется. Для преднапряжения выберем 10 мм, так как при больших значениях в стенке балки возникают слишком большие концентраторы напряжений.

Такой метод задания преднапряжения позволяет:

- точно контролировать уровень напряженного состояния;
- учитывать реальные условия нагружения конструкции;
- визуализировать процесс формирования преднапряженного состояния системы.

2.2. Определение рационального положения ребра в зоне анкервки стальной двутавровой балки

Для предотвращения потери устойчивости стенки, предусматривается ребро, определим, как наиболее эффективно его расположить. Чтобы удостовериться в необходимости ребра жесткости рассмотрим НДС зоны анкервки при нагрузке 4200 кг/м2 и преднапряжении затяжки на 10 мм и проанализируем схему.

Визуализация результатов анализа выполнена посредством цветовой схемы, отображающей распределение нормальных напряжений (МПа) в элементах конструкции. Применение данного метода позволяет наглядно идентифицировать зоны концентрации напряжений и оценить степень их влияния на несущую способность узла в условиях заданного преднапряженного состояния (рис.11)

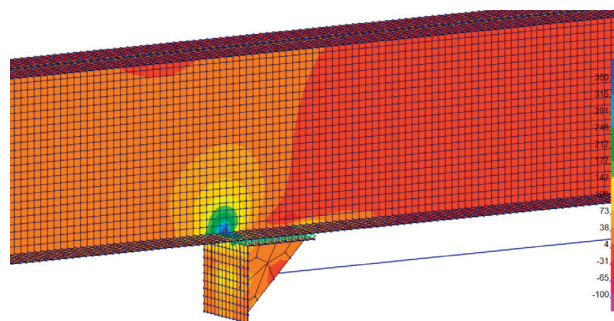


Рис. 11. НДС зоны анкервки без ребер (МПа)

Как мы видим в точке создаются напряжения величиной 350 МПа.

Рассмотрим несколько вариантов постановки ребер жесткости для выявления наиболее эффективной постановки.

- вертикальное положение (ближе к концу балки) (рис.12);
- вертикальное положение (дальше от конца балки) (рис.13);
- наклонное положение (рис.14);
- два ребра вертикальных ребра (рис.15).

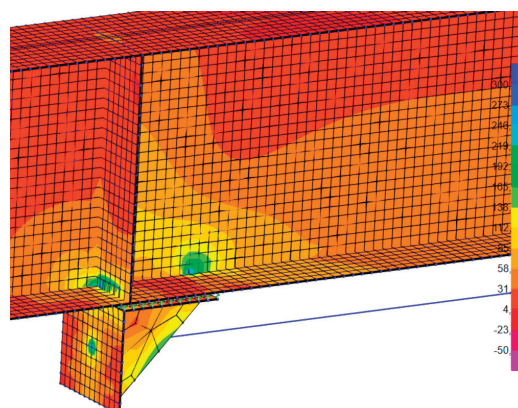


Рис. 12. НДС зоны анкервки с вертикальным положением ребер ближе к концу балки (МПа)

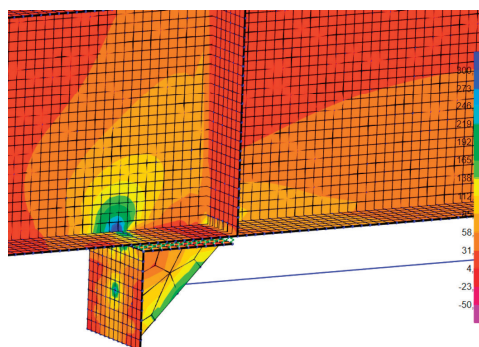


Рис. 13. НДС зоны анкеровки с вертикальным положением ребер дальше от конца балки (МПа)

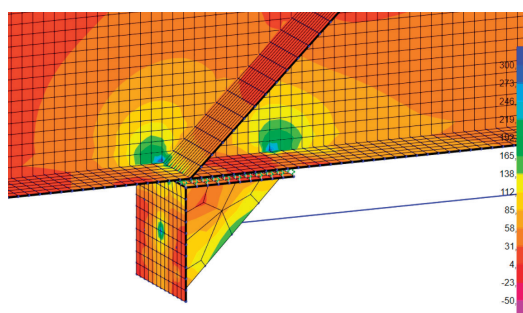


Рис. 14. НДС зоны анкеровки с вертикальным положением ребер дальше от конца балки (МПа)

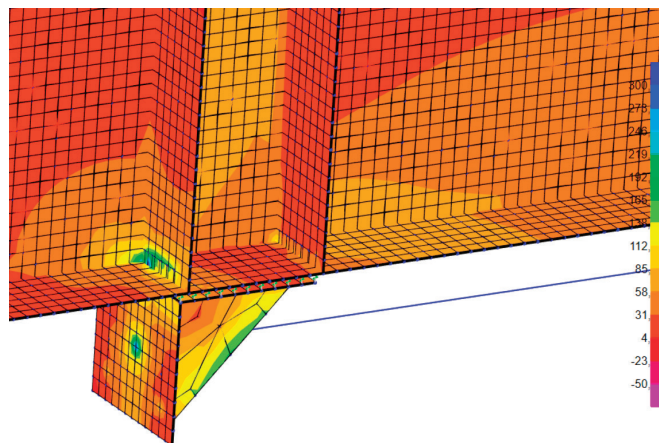


Рис. 15. НДС зоны анкеровки с вертикальным положением двух ребер (МПа)

Анализ напряженного состояния зоны анкеровки стальной двутавровой балки с преднапряженной затяжкой:

При анализе результата НДС в зоне анкеровки учитывается наличие концентраторов напряжений, напряжения стенки и ребра, а также равномерность и эффективность их распределений.

По результатам исследования наиболее эффективное положение ребер является вариант с двумя вертикальными пластинами, что обеспечивает равномерное распределение напряжений и снижение значений концентраторов, а также обеспечение устойчивости стенки.

Без ребер жесткости:

- Максимальные напряжения в зоне анкеровки достигают более 300 МПа.
- Наблюдается концентрация напряжений в зоне сопряжения уголков с полкой.

С двумя вертикальными ребрами жесткости:

- Эффективное перераспределение напряжений.
- Максимальные напряжения в зоне до 219 МПа (концентраторы).
- Равномерное вовлечение ребер жесткости в работу.

2.3. Зависимость напряжений в зоне анкеровки от преднапряжения

Для выявления зависимости возьмём точку (рис. 16) в расчетной схеме и будем варьировать преднапряжения и замерять числовое значение при нагрузке 8400 кг/м².

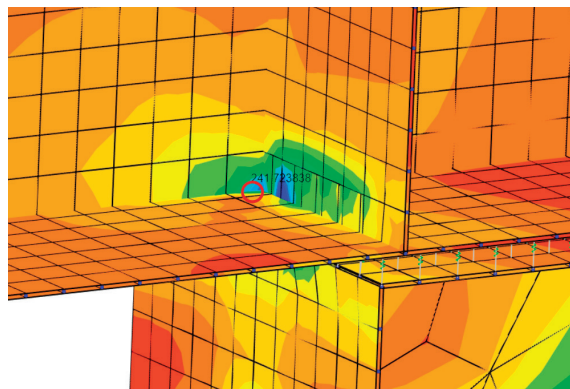


Рис. 16. Точку на пересечении ребра и стенки возьмем отмеченную красным

Значения заносим в Табл.1

Таблица 1. Преднапряжения и напряжений

Преднапряжение (мм)	Значение напряжения (МПа)
0	99,3
1	118,5
2	128,4
3	147,2
4	166,0
5	180,8
6	189,9
7	208,3
8	225,1
9	239,0
10	243,01

График зависимости выглядит следующим образом (рис.17).

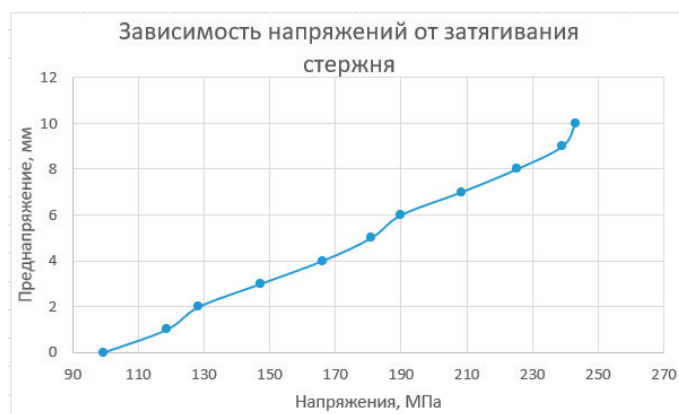


Рис. 17. Зависимость напряжений от затягивания стержня

График имеет прямолинейный характер, так как сталь не вышла на площадку текучести.

Выводы

Результаты анализа:

- Без преднапряжения прогиб балки значителен, что указывает на необходимость применения затяжки.
- Определили предельное значение преднапряжения затяжки.
- При преднапряжении затяжки на 10 мм наблюдается увеличение напряжений в зоне анкеровки, однако они остаются ниже предельных значений в случае варианта с ребрами жесткости, что свидетельствует о запасе прочности.
- Ребра жесткости задействованы равномерно и их применение необходимо, что позволяет перераспределить напряжения в зоне анкеровки балки.
- Наиболее эффективное положение является два вертикальных ребра в местах концентраторов напряжений
- Зависимость напряжений от затягивания стержня носит прямолинейный характер

Проведенная работа демонстрирует корректность выбранных конструктивных решений и эффективность применения преднапряжения для улучшения характеристик балки. Результаты расчетов подтверждают надежность конструкции, но также указывают на возможности для дальнейшей оптимизации.

Литература:

1. Беленя Е. И. Предварительно напряженные металлические несущие конструкции. — А. VI-6785 изд. — Владимир: Типография № 1 Государственного издательства литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. — 325 с.
2. Ференчик П., Тохачек М. Предварительно напряженные стальные конструкции. — А IX-7199 изд. — Москва: Московская типография № 4 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР, 1975. — 424 с.
3. Ю. В. Гайдаров Предварительно напряженные металлические конструкции.. — 1206/Л изд. — Сортавала: Сортвалская книжная типография, 1971. — 146 с.
4. M. Motavalli, E. Ghafoori, M. Shahverdi, J. Michels and C. Czaderski Prestressing systems for strengthening of concrete and metallic structures: recent developments at EMPA, Switzerland // Proceedings of the Eighth International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2016). — 2016. — С. 11.
5. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с Изменениями N 1, 2)». [Электронный ресурс] URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293745/4293745484.pdf> (дата обращения: 10.04.2021)
6. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» — п. 9.1.1 СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. — Москва, 2018.
7. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07
8. Щевцов И. А. Способы создания предварительного напряжения металлических конструкций // Самара: 2007
9. В. А. Кравчук, Е. В. Кравчук Развитие исследования предварительно напряженных строительных металлических конструкций // Public state university. — 2019. — С. 86–92.
10. И. С. Большишшапок Напряженно деформированное состояние предварительно напряженных элементов в металлоконструкциях // СПбГАСУ. — С. 86–92.
11. Б. А. Сперанский Решетчатые металлические предварительно напряженные конструкции. — А- VI-706 изд. — Подольск: Подольская типография, 1970. — 240 с.
12. А. А. Иодчик, В. А. Кравчук Инженерный расчет стальной предварительно напряженной балки // Вестник ТОГУ. — 2013. — № 2. — С. 151–158.
13. А. А. Иодчик, А. А. Чебровский, В. М. Бурцев Экспериментальные исследования стальных двутавровых балок, предварительно напряженных без затяжек // Инженерный вестник Дона. — 2021. — № 7

Исследование влияния стальной фибры на механические свойства и прочность высокопрочного бетона

Чэн Цзюань, студент магистратуры

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

В данной статье на основе эксперимента обобщены и проанализированы результаты исследований влияния типа, содержания и длины стальной фибры на механические свойства высокопрочного фибробетона. Это поможет понять такое влияние и подобрать состав бетона.

Ключевые слова: сталефибробетон, стальная фибра, содержание фибры, механические свойства, прочность на сжатие.

1. Введение

Высокопрочный бетон (включая сверхвысокопрочный, реактивный порошковый и сталефибробетон) обладает высокими механическими свойствами и долговечностью, поэтому широко применяется в мостах и сборных конструкциях [1–2]. Однако ему свойственно хрупкое разрушение. Добавление стальной фибры (тип, содержание, длина) позволяет перевести хрупкое разрушение в пластичное [8] и значительно повысить прочность и вязкость [3–7]. Изучение влияния стальной фибры на прочность при сжатии важно для оптимизации состава бетона и расчёта несущей способности элементов (балок, колонн).

2. Влияние параметров стальной фибры на механические свойства и прочность высокопрочного фибробетона

К параметрам стальной фибры, влияющим на свойства и водонепроницаемость сверхвысокопрочного бетона, относятся тип, содержание и длина. Согласно исследованиям: концевые крючкообразные волокна эффективнее повышают прочность на сжатие, изгиб и сцепление, чем прямые и волнистые [9]; форма и размер волокон слабо влияют на квазистатическое сжатие, но существенно — на изгиб и растяжение [10]; изогнутые волокна показывают лучшие вытяжные характеристики, чем прямые [11]. Общий вывод: форма фибры сильно влияет на вытяжные характеристики, прочность на растяжение и изгиб (волнистые и крючкообразные дают более высокие показатели), но незначительно — на прочность на сжатие из-за различий в площади контакта и трении.

3. Экспериментальное исследование влияния содержания стальной фибры на прочность на сжатие высокопрочного фибробетона

3.1. Экспериментальные материалы

Высокопрочный бетон В80. Состав: цемент ЦЕМ I 42,5Н + микрокремнезём МКУ85 (для плотности и прочности), кварцевый песок 0–2,5 мм (для удобоукладываемости), суперпластификатор МСПАУЭРФЛОУ 6955 (для низкого водоцементного отношения). Стальная фибра: крючкообразная (диаметр 0,3 мм, длина 30 мм, прочность >2800 МПа) в объёмном содержании 0 %, 0,5 %, 0,75 % и 1,5 % — для изучения влияния дозировки фибры на прочность призмочных образцов при сжатии.



Рис. 1. Пластификатор



Рис. 2. Стальная фибра

Основной состав смеси показан в таблице 1 ниже.

Таблица 1. Основной состав смеси

Расход компонентов на 1м3, кг. В/Ц =0,3					
Вид и класс бетона	Цемент	Песок	Пластификатор	Микрокремнезем	Вода
Высокопрочный бетон В80	750	1100	18	150	225

3.2. Методика эксперимента

Изготовление, твердение и испытания по ГОСТ:

Образцы 100×100×400 мм изготовили по ГОСТ, твердели 28 суток в нормальных условиях. Испытания на сжатие провели на прессе 1000 кН. Нагрузку повышали ступенчато (0,5 МПа/с), каждая ступень — 2 мин. На боковые грани наклеили тензодатчики для записи кривых «напряжение–деформация». В каждой группе — по 3 образца, результат — среднее арифметическое. Зафиксирован характер разрушения.

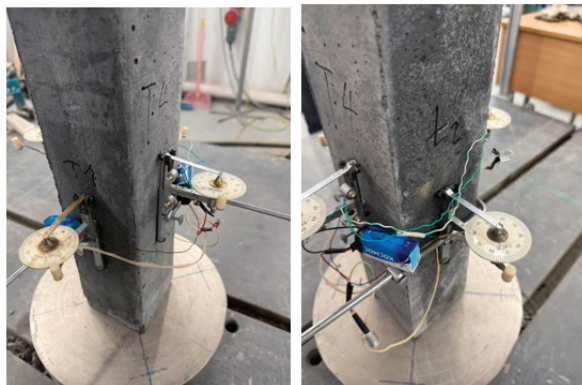


Рис. 3. Призмические образцы в испытании на сжатие

3.3. Результаты экспериментов

При испытаниях на сжатие образцы со стальной фиброй (рис. 4) в основном сохраняли форму, при разрушении издавали лишь тихие хлопки благодаря мостиговому действию фибры. Образцы без фибры (рис. 5) при достижении предела прочности раскалывались с громким хлопком на множество кусков и теряли несущую способность.



Рис. 4. Состояние разрушения призмических образцов со стальной фиброй в процессе испытания на сжатие



Рис. 5. Состояние разрушения призмических образцов без фибры при испытании на сжатие

Прочность четырёх групп испытанных призмических образцов сталефибробетона показана в таблице 2 ниже.

Таблица 2. Результаты испытаний на сжатие призмических образцов В80

Номер образца	Дата замеса	Дата испытания	М/г.	R, МПа	Рсред	Итоговой класс
Призматические образцы 0 % без стальная фибра						
B80–1	14.03.2026	31.03.2026	9471	68,6	70,2	B80
B80–2	14.03.2026	31.03.2026	9113	70,3		
B80–3	14.03.2026	31.03.2026	9079	71,8		
B80; 0,5 % стальная фибра						
B80–1	14.03.2026	31.03.2026	9125	71,9	73,2	B80
B80–2	14.03.2026	31.03.2026	9325	73,3		
B80–3	14.03.2026	31.03.2026	9280	74,5		
B80; 0,75 % стальная фибра						
B80–1	14.03.2026	31.03.2026	9194	79,0	77,3	B80
B80–2	14.03.2026	31.03.2026	9324	77,1		
B80–3	14.03.2026	31.03.2026	9225	75,8		
B80; 1,5 % стальная фибра						
B80–1	14.03.2026	31.03.2026	9147	69,4	70,6	B80
B80–2	14.03.2026	31.03.2026	9189	70,5		
B80–3	14.03.2026	31.03.2026	9225	71,8		

3.4. Анализ результатов экспериментов

Прочность на сжатие: при 0 % фибры — 70,2 МПа; при 0,5 % — 73,2 МПа (+4,3 %); при 0,75 % — максимум 77,3 МПа (+10,1 %); при 1,5 % — снижение до 70,6 МПа (почти как у контрольной группы).

Характер разрушения: контрольный бетон — хрупкий, с громким треском; с добавлением фибры — мультитрещинный, пластичный (наилучший при 0,75 %).

Механизм: умеренное количество фибры перекрывает трещины, повышая прочность и пластичность; избыток (1,5 %) вызывает комкование фибры, снижая плотность и прочность.

4. Заключение

На основе выполненного анализа существующих исследований влияния формы стальной фибры, её содержания и длины на механические свойства и прочность высокопрочного сталефибробетона можно сделать следующие выводы:

1) Форма фибры влияет избирательно: волнистые и крючкообразные волокна (с большей площадью контакта и трением) заметно повышают вытяжные характеристики, прочность на растяжение и изгиб, но почти не влияют на прочность при сжатии.

2) Содержание фибры (в опыте с крючкообразной фиброй): прочность на сжатие максимальна при 0,75 % (77,3 МПа, +10,1 % к контролю). При 1,5 % прочность падает до уровня контрольной группы. Характер разрушения становится пластичным, с множеством трещин.

3) Механизм: умеренное количество фибры перекрывает трещины, повышая прочность и пластичность; избыток (1,5 %) ведёт к комкованию, снижению плотности и потере прочности.

4) Рекомендация для практики: предпочтительна крючкообразная фибра с содержанием $\approx 0,75\%$ — это преодолевает хрупкость бетона, даёт максимальную прочность и избегает перерасхода волокон.

Литература:

1. Шао Сюйдун, Фань Вэй, Хуан Чжэнъюй. Применение сверхвысокопрочного бетона в конструкциях // Журнал гражданского строительства. 2021. Т. 54. № 1. С. 1–13. URL: http://manu36.magtech.com.cn/Jwk_tmgcxb/CN/Y2021/V54/I1/1 (на китайском)
2. Чжэн Цичжэн, Нун Дэцай, Лун Либо и др. Экспериментальное исследование сейсмостойкости сборных железобетонных сдвиговых стен на основе соединений из сверхвысокопрочного цементного композиционного материала // Журнал строительных конструкций. 2022. Т. 52. № 6. С. 1–60. URL: qikan.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=7107031736 (на китайском)

3. Qi J, Wu Z, Ma Z J, et al. Pullout behavior of straight and hooked end steel fibers in UHPC matrix with various embedded angles [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 191: 764–774.
4. Лян Синвэнь, Ху Аосян, Юй Цзин и др. Влияние стальных волокон на изгибные механические свойства сверхвысокопрочного бетона // Журнал композиционных материалов. 2018. Т. 35. № 3. С. 722–731. URL: qikan.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=674896438 (на китайском)
5. Yoo D, Lee J H, Yoon Y S, et al. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites [J]. *Composite Structures*, 2013, 106: 742–753.
6. Лян Юннин, Чэнь Баочунь, Цзи Тао, Хуан Чжибинь, Чжуан Ичжоу. Влияние соотношения песок-связующее, водо-связующего и содержания стальных волокон на свойства RPC // Вестник Университета Фучжоу (естественнонаучная серия). 2011. Т. 39. № 5. С. 748–753. URL: qikan.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=40001358 (на китайском)
7. Ли Синьсин, Чжоу Цюань, Ли Шуйшэн. Исследование влияния стальных волокон на свойства реакционно-порошкового бетона // Строительная технология. 2020. Т. 49. № 14. С. 81–85. URL: qikan.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=7103083026 (на китайском)
8. Чжан Сюэжи, Сунь Вэй, Чжан Цяньцян и др. Анализ механических свойств сверхвысокопрочных цементных материалов, армированных гибридными стальными волокнами // Вестник Юго-Восточного университета (естественнонаучная серия). 2008. Т. 38. № 1. С. 156–161. URL: qikan.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=26479444 (на китайском)
9. Wu Z, Shi C, Khayat K H. Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra high performance concrete Influence of steel fiber content and shape [J]. *Composites*, 2019, 174(1): 107021.
10. Esmaeili J, Andalibi K, Gencel O, et al. Pull-out and bond-slip performance of steel fibers with various ends shapes embedded in polymer-modified concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 271: 121531.
11. Shin H-O, Wkim K, Oh T, et al. Effects of fiber type and specimen thickness on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to uniaxial and biaxial stresses [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2021, 15: e00726.

Молодой ученый

Международный научный журнал

№ 18 (621) / 2026

Выпускающий редактор Г. А. Письменная
Ответственные редакторы Е. И. Осянина, О. А. Шульга, З. А. Огурцова
Художник Е. А. Шишков
Подготовка оригинал-макета П. Я. Бурьянов, М. В. Голубцов, О. В. Майер

За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы.
Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов.
При перепечатке ссылка на журнал обязательна.
Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал размещается и индексируется на портале eLIBRARY.RU, на момент выхода номера в свет журнал не входит в РИНЦ.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-38059 от 11 ноября 2009 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

ISSN-L 2072-0297

ISSN 2077-8295 (Online)

Учредитель и издатель: ООО «Издательство Молодой ученый». 420029, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25.

Номер подписан в печать 13.05.2026. Дата выхода в свет: 20.05.2026.

Формат 60×90/8. Тираж 500 экз. Цена свободная.

Почтовый адрес редакции: 420140, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Юлиуса Фучика, д. 94А, а/я 121.

Фактический адрес редакции: 420029, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25.

E-mail: info@moluch.ru; <https://moluch.ru/>

Отпечатано в типографии издательства «Молодой ученый», 420029, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25.