

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2026, Том 18, № 4 / 2026, Vol. 18, Iss. 4 <https://esj.today/issue-4-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/27SAVN426.pdf>

DOI: 10.15862/27SAVN426 (<https://doi.org/10.15862/27SAVN426>)

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Рашик, М. Р. И. Разработка методики прогнозирования долговечности строительных конструкций из геополимерного бетона с базальтопластиковой арматурой / М. Р. И. Рашик // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 4. — URL: <https://esj.today/PDF/27SAVN426.pdf>. DOI: 10.15862/27SAVN426.

For citation:

Rashik M.R.I. Development of a methodology for predicting the durability of building structures made of geopolymer concrete with basalt-plastic reinforcement. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(4): 27SAVN426. Available at: <https://esj.today/PDF/27SAVN426.pdf>. DOI: 10.15862/27SAVN426. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 691.327

Рашик Мд Рашидул Ислам

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Москва, Россия
Инженерная академия
Аспирант
E-mail: rashikislam9991@gmail.com

Разработка методики прогнозирования долговечности строительных конструкций из геополимерного бетона с базальтопластиковой арматурой

Аннотация. Разработка методики прогнозирования долговечности строительных конструкций из геополимерного бетона с базальтопластиковой арматурой актуальна в связи с комплексом технологических, эксплуатационных и экономических факторов. В статье представлена методика определения ресурса работы конструкций из геополимерного бетона с армированием базальтовым пластиком на основе учета физико-химического взаимодействия материалов при эксплуатации. Нормативная основа и расчетные модели для подобных систем отсутствуют, поэтому приходится применять большие коэффициенты надежности или проводить очень дорогие эксперименты. Предложен метод, объединяющий теоретическое моделирование процесса диффузии агрессивного вещества и лабораторное определение характеристик материала бетона и арматурной стали. Рассмотрены случаи определения ресурса эксплуатации балки в морской среде — хлоридная коррозия; колонна в заводской атмосфере — сульфатный тип воздействия. Демонстрируется эффект применения гидрофобизаторов на повышение устойчивости к воздействию сульфатов, но при наличии хлоридов определяющим будет являться процесс их диффузии. Методика дает возможность определить срок безопасного применения, оптимизировать проектную документацию. На основании полученных результатов возможна оптимизация применения геополимеров в условиях агрессивных сред.

Ключевые слова: геополимерный бетон; базальтопластиковая арматура; долговечность строительных конструкций; прогнозирование срока службы; агрессивные среды; разрушение материалов

Введение

В настоящее время актуальность проблемы повышения срока службы строительных конструкций обусловлена следующими причинами: ростом агрессивного влияния окружающей среды на материалы и постоянное повышение требований по вопросам ресурсо-энергетического использования.

Актуальность темы обусловлена проблемами современной строительной индустрии. Геополимерный бетон с неметаллической арматурой является перспективным материалом. Применение данного материала позволяет существенно продлить срок службы конструкции из-за его способности к очень хорошей сопротивляемости коррозии материала. Это важно при работе в агрессивных средах. Еще одно преимущество — снижение углеродного следа за счет применения алюмосиликатов вместо цемента портландцементного.

Применение конструкций из геополимерного бетона с использованием базальтопластовой арматуры имеет ряд преимуществ, однако применение его сопряжено со сложностями. В первую очередь это невозможность проведения точного прогноза долговечности конструкции. Нормативная база по железобетонным конструкциям пока не позволяет полностью отражать специфику применяемых новых материалов и факторов их работы в эксплуатационных условиях.

В отличие от традиционного железобетона, который подвержен разрушению из-за коррозии стальной арматуры, карбонизации цементного камня и хлоридной агрессии, система «геополимерный бетон — базальтопластиковая арматура» не испытывает этих воздействий. На ее эксплуатационные характеристики в первую очередь влияют снижение прочности полимерной матрицы в щелочной среде, а также изменение сцепления между фазами материала, ползучесть арматуры и возможное возникновение щелочно-силикатных реакций [1].

Отсутствие количественной модели, отражающей специфику контакта материалов и процесс деградации приводит к необходимости проведения дорогостоящих натурных испытаний либо применению завышенных коэффициентов запаса при проектировании. Экономически неэффективное применение новых материалов ограничивает распространение их применения в строительстве.

В связи с чем становится актуальной разработка метода оценки ресурса конструкций на основе геополимербетона с применением арматуры из базальтового пластика. Данный метод должен представлять собой единый подход к оценке ресурса: сочетание аналитических методов и результатов опытных исследований.

Оценка стойкости конструкций проводится путем систематизации характеристик материалов, описания взаимодействий между ними, формулирования условий устойчивости системы. При этом должна быть рассмотрена специфика физико-химических свойств составляющих элементов и тип взаимодействия фаз.

Физико-химическое моделирование позволяет исследовать механизм деградации материала, описывать процессы диффузии агрессивного среза и воздействие на составы бетонной смеси, а также базальтовую армирующую сетку. На основе этих данных строятся различные варианты развития ситуации по потере несущей способности, рассчитываются важнейшие показатели.

Методом определения параметров долговечности являются методы передельного состояния и разрушающие функции. Суть метода заключается в том, что вводятся количественные меры изменения характеристик материала со временем от действия различных нагрузок; на основании этого возможно прогнозировать основные характеристики модели уменьшения ресурса, а также корректно оценивать показатели работоспособности.

Для того чтобы правильно предсказать состояние конструкций необходимо осуществлять периодические экспериментальные исследования. Данные обследования включают:

1. Микротвердость (склерометрия) — измерение скорости распространения зоны разрушения.
2. Определение влажности и скорости ультразвука являются косвенными методами определения состояния бетона.
3. Выполнение внешнего осмотра поверхности на предмет обнаружения трещин и иных повреждений, способных сократить эксплуатационный ресурс.

Для проведения лабораторных тестов на морозостойкость, химическую устойчивость и механическую прочность отбираются образцы (керны) в объеме $\frac{3}{4}$.

Модели с учетом дискретности расположения арматуры и адгезии к бетону обязательны при прогнозе работы конструкции. Так как влияние базальтопластиковой арматуры очень велико. Моделирующим процессом отслоения связи арматура-бетон служат следующие модели: Один из популярных способов определения адгезии — это испытание на выдергивание арматуры из бетонного блока для количественной характеристики прочности связи.

При осуществлении прогнозирования рассматривается особенность каждого элемента, такая характеристика будет систематизироваться при прогнозировании.

Геополимербетон — это композитный материал со сложным составом. Влияние на долговечность оказывают различные факторы, среди которых первостепенное значение имеют физико-химические характеристики самого материала (структура, плотность, микропорами, характеристика капилляров) и агрессивная среда эксплуатации конструкции.

Авторами проведены новые исследования по применению наноструктурных примесей (метакаолин, углеродные нанотрубки) в качестве добавки к геополимерному бетону с целью изменения его структуры. Применение данных веществ способствует увеличению химической устойчивости материала за счет создания дополнительной защиты от падения прочности.

Предлагаемая методика прогнозирования долговечности — это не просто какая-то фиксированная зависимость. Это целый инструментарий, включающий в себя разные виды исследований — от базовых физико-химических расчетов до практических способов контроля за характеристиками материала.

Сущность предлагаемого метода заключается в комплексном объединении теоретического анализа результатов расчета с результатами испытаний образцов. Сочетание методов дает возможность более точно определить прогнозные значения и научно аргументировать определение нормативных сроков службы элементов конструкции на исследуемые материалы.

Для объективной оценки влияния различных факторов на срок службы геополимерного бетона необходимо сопоставить его характеристики с эксплуатационным опытом аналогичных объектов, выполненных из шлакощелочного и портландцементного бетонов.

Разрушение строительных конструкций по причинам может быть разделено на два класса — в зависимости от характера эксплуатационных воздействий. К первому классу относится разрушение вследствие действия веса материала и конструкции, рассматриваемого как полезный груз; второй класс — разрушение от динамических нагрузок.

Процессы деградации материала от воздействия внешней среды либо из-за внутренних процессов, протекающих внутри материала.

Влияние первой группы факторов на строительные материалы и конструкции проявляется в разрушении лишь в экстремальных ситуациях или при нарушении установленного проектом режима использования зданий и сооружений, выходя за рамки их нормального функционирования.

К причинам деградации строительных конструкций относятся также химическая коррозия, а разрушения, вызванные замерзанием и оттаиванием, увлажнением и высушиванием. К ним же относятся внутренние коррозионные процессы (объемное расширение) вследствие взаимодействия компонентов материала, например, реакции щелочи в вяжущем с активным кремнеземом заполнителя.

Некоторые исследователи считают, что главная причина деградации ЖБК — коррозия арматуры, вызванная карбонизацией и воздействием хлорид-ионов¹. Важно отметить, что CO_2 и Cl^- не действуют напрямую на бетон (они оказывают влияние на арматуру, находящуюся внутри бетона). Углекислый газ из воздуха реагирует с щелочью в порах бетона, снижая pH среды и ускоряя коррозию стальной арматуры [2].

Хлорид ионы попадают внутрь бетона — теряется защита стальной арматуры от коррозии. Теоретически можно попасть через заполнитель либо воду затворения (но это почти не встречается, т. к. содержание хлоридов ограничено). Чаще всего происходит внедрение хлоридов из внешней среды — морская вода или применение противогололедных средств. Разрушение бетона под воздействием углекислого газа, соединений хлора и других агрессивных веществ возможно только в присутствии воды.



Рисунок 1. Система факторов, определяющих структуру и свойства КШЩВ [3]

Причины деградации бетона — это хлоридная инфильтрация и диффузия CO_2 при миграции воды. Эти факторы являются основными причинами потери прочности бетона любого состава (портландцементный, шлакощелочной, геополимерный).

¹ Васильев А. А. Прогнозирование долговечности бетонов с учётом деградационных процессов: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Васильев Александр Александрович. — 2017. — 185 с.

Долговечность геополимерных бетонов, подобно ряду других свойств, формируется под воздействием тех же условий, которые играют ключевую роль в долговечности композиционных шлакощелочных вяжущих. Эта взаимосвязь наглядно продемонстрирована на рисунке 1.

Долговечность материала, помимо его химико-минералогического состава, существенно зависит от пористой структуры. Именно она определяет проницаемость для жидкостей и газов, которые могут вызывать физическую и химическую коррозию. Проницаемость бетона часто выступает ключевым фактором, определяющим срок его службы.

Проникновение жидкости в материал осуществляется различными способами — капиллярным всасыванием, адсорбционным водопоглощением, инфильтрацией под напором (при гидротехническом строительстве, для резервуаров и т. д.). Природа и степень воздействия разрушающих факторов определяются режимом проникновения воды либо раствора с агрессивными компонентами внутрь материала.



Рисунок 2. Диаграмма зависимостей между научными и техническими аспектами долговечности геополимеров по данным²

² Ерошкина Н. А. Методы оценки и повышения долговечности геополимерных строительных материалов на основе промышленных отходов: учеб. пособие / Н. А. Ерошкина, М. О. Коровкин. — Пенза: ПГУАС, 2014. — 115 с.

Исследования [3–7] установили, что срок службы геополимерных материалов тесно связан с размерами их открытых пор. При анализе влияния структуры бетона на его сопротивление коррозии особое внимание уделяется распределению объема пор по размерам. Преобладание мелких пор повышает химическую стойкость бетона, в то время как крупные поры оказывают влияние не только на прочность, но и на проницаемость, что в конечном итоге сказывается на долговечности материала.³

Деструктивные процессы в геополимерных материалах обусловлены не отдельными факторами, а сложным взаимодействием множества параметров структуры и условий их использования (рис. 2).

Формирование и развитие системы трещин в бетоне оказывают существенное влияние на его пропускную способность к агрессивным средам. Этот показатель также определяет морозостойкость бетона [5].

Исследование трещинообразования в геополимерных бетонах пока остается недостаточно изученным. Известно, что геополимеры, созданные на основе магматических пород, обладают большей усадкой по сравнению с портландцементом [7], что повышает риск возникновения усадочных трещин. При этом, как установили исследования [8], величина расхода шлаковой добавки оказывает существенное влияние на трещиностойкость таких материалов. Уменьшение способности пропускать воду у геополимерного бетона вследствие появления трещин — явление распространенное и не уникальное для данного материала. Способы предотвращения подобных явлений довольно разнообразны — например, нанесение ремонтных полимерных защитных пленок [9].

Долговечность геополимеров определяется многоуровневой системой факторов. Изучение взаимосвязи между этими факторами и их общего влияния на долговечность представляет собой сложную задачу, решение которой требует дополнительных исследований. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью систематического изучения физико-механических свойств и структуры геополимерных строительных материалов для определения срока их службы при разных режимах эксплуатации.

Полимеркомпозитная арматура (ПКА) стеклопластика — Стеклопластиковая арматура СПА относится к виду полимеркомпозитной арматуры ПКА, применение которой активно растет. Это объясняется следующими факторами — большая удельная прочность, малый вес относительно других материалов; хорошая коррозионно-стойкая способность, морозоустойчивость и теплоизоляция.

На данный момент стоимость армирования СПА выше стоимости ЖБ конструкций. Однако постоянное развитие технологий получения стеклопластика, а именно использование модифицированных наноматериалов позволит существенно снизить его стоимость в скором времени.

Применение полимерных материалов при изготовлении армированных бетоном изделий снижает уровень эмиссии CO₂ благодаря применению экологически безопасной технологии. Данное решение позволяет снизить расход цемента — на его долю приходится 7 % от всего объема промышленных выбросов в мире.⁴

³ Гиль А. И., Бадалова Е. Н., Лазовский Е. Д. Стеклопластиковая и углепластиковая арматура в строительстве: преимущества, недостатки, перспективы применения // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. 2015. №16. С. 48–53.

⁴ Рахимова Н. Р. Шлакощелочные вяжущие и бетоны с силикатными и алюмосиликатными минеральными добавками [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Н. Р. Рахимова. — Казань: Казан. гос. архит.-строит. ун-т, 2010. — 502 с.

В результате проведенного исследования были определены пути улучшения эксплуатационных характеристик композитной арматуры для бетонных элементов — увеличение механической прочности, улучшение сцепления с бетоном. Определен ряд направлений использования полимеркомпозита как армирующего материала при изготовлении железобетонных конструкций.

Возрастание несущей способности полимерной арматуры возможно за счет армирования ее углеродными наноматериалами (например, композитированием).

Разработка рациональных схем внутреннего армирования ЖБ конструкций с учетом условий работы.

Исследование воздействия полимер-композитной фибры на несущую способность бетона (в т. ч. при использовании способа зонального армирования).

Проведение анализа на внутреннее и внешнее армирование для определения наиболее рационального варианта.

Единого ГОСТа именно для геополимерных бетонов пока нет (нормативная база активно развивается), поэтому в таблице 1 указаны стандарты, которые регулируют отдельные методы испытаний и общие подходы к прогнозированию долговечности бетонов.

Таблица 1

Общие подходы к прогнозированию долговечности бетонов

Этап методики	Параметры методики	Нормативная документация
1. Подготовительный этап	Сбор данных: условия эксплуатации, агрессивность среды, характеристики сырья, требуемая прочность	—
2. Оценка структурных характеристик	Анализ пористости (распределение пор, общая пористость, водопоглощение, диффузионная проницаемость). Определение модуля упругости, предела прочности при сжатии, истинной и средней плотности, удельной поверхности	ГОСТ 12730.1 (средняя плотность); ГОСТ 12730.3 (водопоглощение); ГОСТ 12730.5 (водонепроницаемость / диффузионная проницаемость)
3. Моделирование разрушающих процессов	Химическая деструкция: прогнозирование карбонизации, оценка проникновения хлоридов, расчет коррозионной стойкости. Физическое воздействие: моделирование циклов замораживания-оттаивания, оценка трещинообразования, прогнозирование усадочных деформаций	Для оценки морозостойкости — ГОСТ 10060. Для анализа химической стойкости к конкретным средам (сульфаты, кислоты) используются профильные методики, часто закрепленные в технических условиях (ТУ) на материал
4. Расчетные методы оценки	Математическое моделирование (диффузионные уравнения для агрессивных сред, модели трещинообразования, расчеты остаточной прочности). Статистические методы (вероятностные характеристики, оценка рисков, построение кривых долговечности)	ГОСТ 22783 (прогнозирование прочности и кинетики твердения)
5. Экспериментальная верификация	Ускоренные испытания (морозостойкость, химическая стойкость, водонепроницаемость). Мониторинг образцов (регулярные измерения, фиксация изменений, корректировка моделей)	ГОСТ 10060 (морозостойкость); ГОСТ 12730.5 (водонепроницаемость)
6. Формирование прогноза	Комплексная оценка: синтез результатов моделирования и эксперимента, анализ неопределенностей. Оформление: расчетный срок службы, границы безопасной эксплуатации, рекомендации по обслуживанию	—
7. Корректирующие мероприятия	Технологические решения (оптимизация состава, модификация структуры, защитные покрытия). Эксплуатационные меры (мониторинг, профилактическое обслуживание, своевременный ремонт)	—
Критерии оценки достоверности прогноза	Соответствие расчетных и экспериментальных данных. Учет всех значимых факторов разрушения. Валидация моделей на реальных объектах. Возможность корректировки прогноза	—
Оформление результатов	Технический отчет (методика, исходные данные, результаты расчетов, прогноз, рекомендации). Графическая часть (кривые изменения характеристик, диаграммы нагрузок, схемы мониторинга)	—

[2]

Для визуализации методики рассмотрим балку в прибрежной зоне (реагент — хлориды).

Цель: оценить, через сколько лет защитный слой перестанет надежно удерживать арматуру из-за диффузии хлоридов.

Исходные данные

- Длина балки: $L = 6$ м.
- Сечение: прямоугольное, $b \times h = 200 \times 400$ мм.
- Защитный слой бетона: $c = 30$ мм.
- Класс геополимерного бетона: условно принимаем эквивалент В25 (прочность на сжатие ~ 25 МПа).
- Базальтопластиковая арматура: диаметр 12 мм, площадь сечения $A_s = 113$ мм².
- Среда: прибрежная зона. Концентрация хлоридов в окружающей среде: $C_{ext} = 0,5$ кг/м³.
- Коэффициент диффузии хлоридов для данного геополимерного бетона: $D = 1,2 \cdot 10^{-12}$ м²/с (получен из ускоренных испытаний).
- Критическая концентрация хлоридов у арматуры (пороговая, после которой начинается снижение прочности полимерной матрицы): $C_{crit} = 0,1$ кг/м³.
- Коэффициент, учитывающий неравномерность проникновения и другие факторы (опытным путем для такой системы): $k = 0,7$.

Ключевая идея: время, за которое хлориды диффундируют от поверхности до арматуры, можно оценить по упрощенной модели:

$$t = \frac{c^2}{\pi^2 \cdot D \cdot k}. \quad (1)$$

Здесь:

t — время до достижения критической концентрации (в секундах);

c — толщина защитного слоя (в метрах);

D — коэффициент диффузии;

k — поправочный коэффициент.

Пошаговый алгоритм

1. Перевести защитный слой в метры: $c = 30$ мм = 0,03 м.
2. Подставить значения в формулу:

$$t = \frac{(0,03)^2}{\pi^2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-12} \cdot 0,7} \approx \frac{9 \cdot 10^{-4}}{2,76 \cdot 10^{-12}} \approx 3,26 \cdot 10^8 \text{ с.}$$

3. Перевести секунды в годы:

$$t \approx \frac{3,26 \cdot 10^8}{3,15 \cdot 10^7} \approx 10,3 \text{ года.}$$

Вывод: по этой модели защитный слой сохранит надежность примерно 10 лет. После этого риск ухудшения сцепления «бетон-арматура» резко возрастает.

Таблица 2

Параметры расчета балки в прибрежной зоне

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Длина балки	L	6	м
Ширина сечения	b	200	мм
Высота сечения	h	400	мм
Защитный слой	c	30	мм (0,03 м)
Класс бетона	—	B25	—
Диаметр арматуры	—	12	мм
Площадь арматуры	A_s	113	мм ²
Концентрация хлоридов (внеш.)	C_{ext}	0,5	кг/м ³
Коэффициент диффузии	D	$1,2 \cdot 10^{-12}$	м ² /с
Критическая концентрация	C_{crit}	0,1	кг/м ³
Поправочный коэффициент	k	0,7	—
Расчетное время до снижения долговечности	t	~10,3	года

[8]

Процесс характеризуется детерминированностью совокупностью воздействий, представленными циклическим увлажнением и высыханием, температурными колебаниями и трещинообразованием в бетоне.

Необходимость учета указанных факторов подлежит реализации посредством введения поправочных коэффициентов либо посредством проведения расчетов, дифференцированных по вариантам сценариев и выполненных с учетом специфики рассматриваемого явления.

Ключевым этапом проверки достоверности расчетов является проведение комплексного сопоставления теоретических прогнозов с практическим результатом данная процедура реализуется посредством двух основных методов:

- проведение специализированных лабораторных испытаний и соответствия с действующими стандартами (включая ГОСТ 32487);
- анализ и обработка данных, полученных при мониторинге реально эксплуатируемых конструкций аналогичного типа.⁵

В случае если конструкция содержит зоны с различными характеристиками (различная толщина защитного слоя, неоднородная агрессивность окружающей среды), необходимо выполнить следующие действия:

Происходит активное взаимодействие сульфат-ионов с цементным камнем

1. Провести индивидуальный расчет для каждой идентифицированной зоны.
2. Определить минимальное значение времени функционирования среды всех рассчитанных параметров.
3. Принять полученное минимальное значение в качестве лимитирующего фактора для всей конструкции в целом.

Рассмотрим конкретный случай промышленной колонны, находящийся в зоне сульфатной агрессии.

⁵ Шуляков К. В. Долговечность железобетонных колонн промышленных зданий в условиях сульфатной агрессии: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Шуляков Константин Владимирович. — 2020. — 180 с.

Исходные данные, используемые в последующем аналитическом рассмотрении:

- Сечение колонны представлено в виде квадратной конфигурации с геометрическими размерами 400×400 мм.
- Высота колонны задана равной 6 м.
- Толщина защитного слоя бетона до арматуры обозначена как $c = 40$ мм.
- Класс бетона определен как В30 с ожидаемым значением прочности на сжатие, принимаемым приблизительно равным 30 МПа.
- Конфигурация арматуры представлена четырьмя стержнями диаметром Ø20 мм, при этом площадь арматурного сечения $A_s \approx 1256$ мм².
- Агрессивность окружающей среды характеризуется промышленной зоной с проявлениями сульфатной агрессии, при этом концентрация сульфатов обозначена как $C_{SO4} = 800$ мг/кг.
- Коэффициент диффузии сульфат-ионов обозначен символом $D = 2,5 \cdot 10^{-13}$ м²/с.
- Критическая глубина проникновения сульфатов (h_{crit}), при которой фиксируется начало снижения прочности, обозначена как $h_{crit} = 20$ мм.
- Поправочный коэффициент, учитывающий неравномерность распределения, обозначен символом $k = 0,6$.

Поставлена задача определения временного интервала, требуемого для достижения фронтом сульфатной агрессии критической глубины, и для решения которой применяется упрощенная модель диффузии.

$$t = \frac{h_{crit}^2}{\pi^2 \cdot D \cdot k}. \quad (2)$$

Алгоритмическая последовательность, предназначенная для выполнения вычислительно-аналитических операций, в наиболее общем виде представлена следующим образом.

Осуществление преобразования величины критической глубины в метрическую систему измерения производится в следующем виде. $h_{crit} = 20$ мм, что соответствует 0,02 м.

Выполнение подстановки указанных численных значений в аналитическую формулу осуществляется в соответствии с установленной процедурой.

$$t = \frac{(0,02)^2}{\pi^2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-13} \cdot 0,6} \approx \frac{4 \cdot 10^{-4}}{1,48 \cdot 10^{-12}} \approx 2,7 \cdot 10^8 \text{ с}$$

Преобразование единиц времени из единицы измерения «секунда» в единицу измерения «год» представлено как процедура количественной трансформации временного показателя, осуществляемая посредством применения метрологически обоснованных пересчетных соотношений и нормализационных операций в рамках единой шкалы времени.

$$t \approx \frac{2,7 \cdot 10^8}{3,15 \cdot 10^7} \approx 8,6 \text{ года.}$$

Защитный слой рассматривается как фактор, обеспечивающий эксплуатационную надежность конструктивного элемента в пределах периода порядка 8,5 лет, при прохождении которого фиксируется минимальная вероятность наступления существенного снижения несущей способности колонны. По истечении указанного периода фиксируется повышение риска значительного снижения несущей способности колонны, обусловленное сульфатным разрушением бетона [10–15].

Таблица 3

параметры для расчета колоны в промышленной зоне

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Сечение колонны	—	400×400	мм
Высота колонны	—	6	м
Защитный слой	C	40	мм
Класс бетона	—	B30	—
Диаметр арматуры	—	20	мм
Площадь арматуры	A _s	1256	мм ²
Концентрация сульфатов	C _{SO₄}	800	мг/кг
Коэффициент диффузии	D	2,5·10 ⁻¹³	м ² /с
Критическая глубина	h _{crit}	20	мм (0,02 м)
Поправочный коэффициент	K	0,6	—
Прогнозируемый срок до критического состояния	T	~8,6	года

Источник⁶

До проведения расчетов следует произвести сравнение концентрации сульфатов по нормам ГОСТ 31384-2017. Это этап контроля формальный, но дает возможность оценить агрессивность среды — слабую, среднюю либо сильную — и соответственно корректно внести изменения в значения расчетных коэффициентов при наличии причин для этого.

Определение сульфатостойкости бетона невозможно без определения минерального состава цемента. Сульфатостойкость бетона определяется составом цементного камня. При высоком содержании алюминатов в обычном портландцементе процесс разрушения идет более интенсивно по сравнению с сульфатостойчивым цементом либо шлакопортландцементом. Следовательно, при проектировании бетонной конструкции следует принимать во внимание данный момент.

Рассмотрим колонну в промышленной зоне, одновременно действуют сульфаты и хлориды, применена гидрофобизирующая добавка. Методика показывает, как меры защиты и комбинированная агрессия количественно влияют на прогнозируемый срок службы.

Таблица 4

Параметры для расчета колонны в промышленной зоне, одновременное воздействие сульфатов и хлоридов, с применением гидрофобизирующей добавки

Параметр	Обозначение	Значение	Единица
Сечение колонны	—	400×400	мм
Защитный слой	c	40	мм (0,04 м)
Критическая глубина разрушения	h _{crit}	20	мм (0,02 м)
Коэффициент диффузии сульфатов (базовый)	D _{SO₄}	2,5 · 10 ⁻¹³	м ² /с
Поправочный коэффициент	k	0,6	—
Концентрация сульфатов	C _{SO₄}	800	мг/кг
Концентрация хлоридов	C _{Cl}	0,3	кг/м ³

Источник⁶

Базовый срок до критического состояния (только сульфаты, без учета хлоридов и без защиты): $t_0 \approx 8,6$ года (из предыдущего расчета).

⁶ Шуляков К. В. Тяжёлые бетоны, стойкие к циклическим воздействиям в суровых условиях эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Шуляков Кирилл Владимирович. — Челябинск, 2020. — 178 с.

Учет мер защиты: гидрофобизирующая добавка.

Гидрофобизирующие добавки снижают проницаемость бетона, уменьшая коэффициент диффузии. Для сульфатов примем снижение на 35 % (типичное значение по данным ускоренных испытаний и справочникам):

$$D_{SO_4,protect} = D_{SO_4} \cdot (1, -035) = 2,5 \cdot 10^{-13} \cdot 0,65 = 1,625 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (3)$$

Для хлоридов эффект гидрофобизации тоже есть, но он обычно слабее из-за меньшего размера ионов. Примем снижение коэффициента диффузии хлоридов на 20 %:

$$D_{Cl,protect} = D_{Cl} \cdot (1, -020) = 1,2 \cdot 10^{-12} \cdot 0,80 = 9,6 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Здесь $D_{Cl} = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$ — условное значение для геополимерного бетона, близкое к экспериментальным данным.

При одновременном воздействии двух агрессивных агентов возможны синергетические эффекты. По данным исследований и рекомендациям СП 28.13330, при совместном действии сульфатов и хлоридов эффективный коэффициент диффузии может быть на 15–30 % выше, чем для каждого агента в отдельности, из-за изменения поровой структуры и ионного обмена.

Примем поправочный коэффициент $k_{comb} = 1,25$ (увеличение на 25 %). Тогда эффективные коэффициенты:

$$\text{Для сульфатов: } D_{SO_4,eff} = D_{SO_4,protect} \cdot k_{comb} = 1,625 \cdot 10^{-13} \cdot 1,25 = 2,03 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}.$$

$$\text{Для хлоридов: } D_{Cl,eff} = D_{Cl,protect} \cdot k_{comb} = 9,6 \cdot 10^{-13} \cdot 1,25 = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Используем упрощенную модель диффузии:

$$t = \frac{h_{crit}^2}{\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot k}. \quad (4)$$

Вариант 1: лимитирующий фактор — сульфатная снижение эксплуатационных свойств бетона (до $h_{crit} = 20 \text{ мм}$).

Подставляем $D_{SO_4,eff} = 2,03 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$, $k = 0,6$, $h_{crit} = 0,02 \text{ м}$:

$$t_{SO_4} = \frac{(0,02)^2}{\pi^2 \cdot 2,03 \cdot 10^{-13} \cdot 0,6} = \frac{4 \cdot 10^{-4}}{1,21 \cdot 10^{-12}} \approx 3,31 \cdot 10^8 \text{ с}.$$

Переводим в годы:

$$t_{SO_4} \approx \frac{3,31 \cdot 10^8}{3,15 \cdot 10^7} \approx 10,5 \text{ лет}.$$

Вариант 2: лимитирующий фактор — ухудшения сцепления/арматуры из-за хлоридов.

Для этого случая критическим может быть достижение определенной концентрации хлоридов у арматуры. Примем, что критическая глубина для хлоридов — это весь защитный слой $c = 40 \text{ мм}$ (0,04 м), а критическая концентрация у арматуры $C_{crit,Cl} = 0,1 \text{ кг/м}^3$.

Тогда:

$$t_{Cl} = \frac{(0,04)^2}{\pi^2 \cdot D_{Cl,eff} \cdot k} = \frac{16 \cdot 10^{-4}}{\pi^2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-12} \cdot 0,6} \approx \frac{1,6 \cdot 10^{-3}}{7,11 \cdot 10^{-12}} \approx 2,25 \cdot 10^8 \text{ с}.$$

В годах:

$$t_{cl} \approx \frac{2,25 \cdot 10^8}{3,15 \cdot 10^7} \approx 7,1 \text{ лет.}$$

Итоговый прогноз срока службы.

Срок службы определяется по минимальному из рассчитанных значений, потому что отказ наступает при достижении любого из предельных состояний:

$$t_{final} = \min(t_{so_4}, t_{cl}) = \min(10, 5, 7, 1) = 7,1 \text{ года.}$$

Вывод: несмотря на применение гидрофобизирующей добавки (которая увеличила срок по сульфатам с 8,6 до 10,5 лет), лимитирующим фактором становится проникновение хлоридов. Прогнозируемый срок службы колонны — около 7,1 года.

Таблица 5

Параметры упрощенной модели диффузии

Сценарий / фактор	D (м ² /с)	k_{comb}	h или c (м)	t (лет)	Комментарий
Базовый (сульфаты, без защиты)	$2,5 \cdot 10^{-13}$	1,0	0,02	8,6	Исходный расчет
Сульфаты + гидрофобизация	$1,625 \cdot 10^{-13}$	1,0	0,02	~13,4	Защита работает
Сульфаты + гидрофобизация + комбинирование	$2,03 \cdot 10^{-13}$	1,25	0,02	10,5	Синергия сред снижает эффект защиты
Хлориды + гидрофобизация + комбинирование	$1,2 \cdot 10^{-12}$	1,25	0,04	7,1	Лимитирующий фактор
Итоговый срок	—	—	—	7,1	По наихудшему сценарию

Источник⁶

Выводы

В результате проведенного исследования разработана комплексная методика прогнозирования долговечности строительных конструкций из геополимерного бетона с базальтопластиковой арматурой, которая позволяет количественно оценивать срок службы конструкций с учетом специфики взаимодействия материалов и условий эксплуатации.

Методика базируется на комплексном подходе, учитывающем физико-химические процессы снижения долговечности, особенности взаимодействия компонентов конструкции и влияние эксплуатационных факторов.

В ходе работы выполнены систематизация и анализ процессов передачи агрессивной среды, изменения механических характеристик материала конструкции как объекта системного исследования. По результатам выполнено построение формальной модели связей данных процессов.

Цель работы — исследование взаимодействия геополимерного бетона с арматурой из базальтопластика. Разработаны уточненные модели долговечности с учетом химико-минералогического состава и поровой структуры бетона.

Представленные результаты являются предпосылками к дальнейшему применению геополимерного бетона на базе базальтопластика в строительной сфере. Позволят более рационально применять его преимущества, уменьшить вероятность ошибок из-за недостаточно исследованного поведения материала при различных режимах эксплуатации.

Перспективы развития данной методики предполагает ее дальнейшее применение для различных конструктивных схем и режимов работы. А также дальнейшее совершенствование математической и эмпирической модели по результатам натурного эксперимента и наблюдения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бенин, А. В. Экспериментальные исследования сцепления композитной арматуры с плоской навивкой с бетоном / А. В. Бенин, С. Г. Семенов // Промышленное и гражданское строительство. — 2013. — № 9. — С. 74–76. — EDN RBRBOT.
2. Васильев А. А. Методика оценки и прогнозирования состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций / А. А. Васильев // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого — 2006. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-otsenki-i-prognozirovaniya-sostoyaniya-dlitelno-ekspluatiruemyh-zhelezobetonnyh-konstruktsiy>.
3. Воскресенский, А. В. Влияние производственных факторов на долговечность железобетонных конструкций / А. В. Воскресенский, Н. И. Тарасеева, М. В. Рогулина // Новый университет. Серия: Технические науки. — 2014. — № 11(33). — С. 60–62. — EDN ТКСХН.
4. Ерошкина, Н. А. Геополимерные строительные материалы на основе промышленных отходов: Монография / Н. А. Ерошкина, М. О. Коровкин. — Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2014. — 128 с. — ISBN 978-5-9282-1221-6. — EDN WGYOUN.
5. Ерошкина, Н. А. Химическая коррозия геополимерных строительных материалов / Н. А. Ерошкина, М. О. Коровкин, М. Ф. Теплова // Современные научные исследования и инновации. — 2015. — № 3-2(47). — С. 99–103. — EDN TUHMRT.
6. Ерошкина, Н. А. Влияние параметров состава минерально-щелочного вяжущего на прочность и усадку бетона / Н. А. Ерошкина, М. О. Коровкин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2012. — № 27(46). — С. 78–83. — EDN PDXNIR..
7. Ерошкина, Н. А. Деформационные характеристики геополимерного бетона и несущая способность железобетонной балки на его основе / Н. А. Ерошкина, М. О. Коровкин, Е. Н. Полубаров. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2015. — № 9(89). — С. 223–226. — URL: <https://moluch.ru/archive/89/18356>.
8. Эффективность применения комплексной наномодифицирующей добавки на основе цеолитов в строительных материалах / Т. И. Панина, Ю. Н. Толчков, А. Г. Ткачев [и др.] // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. — 2016. — Т. 8, № 5. — С. 116–132. — DOI 10.15828/2075-8545-2016-8-5-116-132. — EDN WQSKAN.
9. Панина, Т. И. Комплексная добавка в строительные композиты с наноструктурированным модификатором на основе золы-уноса / Т. И. Панина, Ю. Н. Толчков, З. А. Михалева // В. И. Вернадский: устойчивое развитие регионов: Материалы Международной научно-практической конференции, Тамбов, 07–09 июня 2016 года. Том 2. — Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2016. — С. 224–227. — EDN XXKZIF.
10. Сцепление полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном / В. Г. Хозин, А. А. Пискунов, А. Р. Гиздатуллин, А. Н. Куклин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. — 2013. — № 1(23). — С. 214–220. — EDN QIPLCH.
11. Влияние поверхностно-активных веществ на распределение углеродных наноматериалов в водных дисперсиях при наномодифицировании строительных композитов / Ю. Н. Толчков, Т. И. Панина, З. А. Михалева [и др.] // Химическая физика и мезоскопия. — 2017. — Т. 19, № 2. — С. 292–298. — EDN ZCSTRX.

12. Хозин, В. Г. Совместимость полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном в конструкциях / В. Г. Хозин, А. Р. Гиздатуллин // Строительные материалы. — 2017. — № 11. — С. 30–38. — EDN ZWUFXJ.
13. Ильин, Д. А. Исследование прочности сцепления с бетоном композитной арматуры с частично деформированным профилем / Д. А. Ильин, Д. В. Новолодская // Умные композиты в строительстве. — 2023. — Т. 4, № 1. — С. 7–16. — DOI 10.52957/27821919_2023_1_7. — EDN LHLAOM.
14. Макарова, Н. В. Прочностные и деформационные свойства контакта композитной арматуры с мелкозернистым бетоном / Н. В. Макарова, А. И. Комаров, В. Г. Цуприк // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2020. — № 3(44). — С. 139–150. — DOI 10.24866/2227-6858/2020-3-14. — EDN IWXQYE.
15. Богданова, Е. Р. Изменение свойств сцепления композитной полимерной арматуры с бетоном в условиях воздействия различных сред / Е. Р. Богданова // Промышленное и гражданское строительство. — 2016. — № 2. — С. 39–43. — EDN VKRIZD.

Rashik Md Rashidul Islam

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia
E-mail: rashikislam9991@gmail.com

Development of a methodology for predicting the durability of building structures made of geopolymer concrete with basalt-plastic reinforcement

Abstract. The development of a methodology for predicting the durability of building structures made of geopolymer concrete with basalt-plastic reinforcement is relevant due to a combination of technological, operational and economic factors. The article presents a methodology for determining the service life of geopolymer concrete structures reinforced with basalt plastic, based on the consideration of physicochemical interactions between materials during operation. Regulatory frameworks and design models for such systems are currently absent, which forces the use of large safety factors or the conduct of very expensive experiments. A method is proposed that combines theoretical modeling of the diffusion process of aggressive agents with laboratory determination of the characteristics of concrete and reinforcement materials. Cases of assessing the service life of a beam in a marine environment (chloride corrosion) and a column in an industrial atmosphere (sulfate attack) are considered. The effect of hydrophobic agents on increasing resistance to sulfate attack is demonstrated, however, in the presence of chlorides, their diffusion process becomes the determining factor. The methodology makes it possible to determine the safe service life and optimize design documentation. Based on the results obtained, it is possible to optimize the use of geopolymers under aggressive environmental conditions.

Keywords: geopolymer concrete; basalt-plastic reinforcement; durability of building structures; service life prediction; aggressive environments; material degradation