



Research Article

Received: August 13, 2025

Accepted: September 28, 2025

Published: November 9, 2025

ISSN 2304-6295

Cyber-physical modeling and prediction of self-healing processes dynamics in bioconcrete

Kirsanova, Tatiana Aleksandrovna¹  Chistyakov, Vladimir Anatolievich²  Beskopylny, Alexey Nikolaevich³  Aramova, Olga Yurievna⁴  Alliluyeva, Ekaterina Vladislavovna⁵  Bahari, Abbas⁶  

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation;
89094001052@mail.ru

² Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Southern Federal University", Rostov-on-Don, Russian Federation; vladimirchi@yandex.ru

³ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation; besk-an@yandex.ru

⁴ Laboratory of Paleogeography of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation; aramova@sfedu.ru

⁵ University of Baghdad, Baghdad, Iraq; somebody5@something.edu

⁶ University of Zanjan, Zanjan, Iran; ir/members/bahari

Correspondence: * email 89094001052@mail.ru; contact phone [+79094001052](tel:+79094001052)

Keywords:

Self-healing concrete; Building materials; Self-healing building materials; Building materials of the future; Self-healing mathematical modeling; Regenerative processes in bio-concrete; Organic bio-concrete, Bioengineering in construction; Cyberphysical system

Abstract:

The phenomenon of self-healing concrete is based on the processes of functioning and regeneration of bacteria, and the production of calcite as a result of their vital activity. At the same time, the peculiarities of calcite production by bacteria, their regeneration rate and quantitative characteristics have not been studied at the present stage. A problematic scientific issue is also a type of bacteria with a high rate of calcite production and, accordingly, the ability to heal microcracks. This article presents the cybernetic foundations of modeling self-healing processes in bio-concrete. The concept of creating smart self-healing materials based on the reaction-diffusion equations is proposed. The article substantiates the consideration of bacterial colonies in concrete as a distributed computing network that processes damage information, and presents basic mathematical models describing the dynamics of the bacterial population (reaction-diffusion equation), resource consumption, and kinetics of crack healing. The central element of the proposed approach is the concept of a cyberphysical system (CFS) that integrates sensor monitoring data on environmental parameters (humidity, temperature, pH) with a hybrid predictive model combining physico-chemical equations and a neural network add-on to assess and optimize recovery rates. Feedback modeling and the application of the principles of Proportional-Integral-Derivative control to biological processes suggest the potential for adaptive control of material properties, although the practical implementation of such a system remains a difficult task.

1 Introduction

В современной науке, на стыке биологии, информатики и теории сложных систем, формируется одна из наиболее передовых и междисциплинарных концепций — «жизнь как вычисление», предлагающая рассматривать биологические процессы, от клеточного деления до

Kirsanova, T.; Chistyakov, V.; Beskopylny, A.; Aramova, O.; Alliluyeva, E.

Cyber-physical modeling and prediction of self-healing processes dynamics in bioconcrete; 2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 119 Article No 11902. doi: 10.4123/CUBS.119.2

экосистемного гомеостаза, как формы распределённой информационной обработки, где организмы выступают в роли биокомпьютеров, считывающих данные из генетической памяти и окружающей среды для выполнения целевых программ роста и адаптации. Данный подход возник в ответ на вызовы, связанные с необходимостью преодоления ограничений традиционных редукционистских моделей, неспособных адекватно описать целенаправленное и адаптивное поведение сложных систем. В перспективе концепция «жизнь как вычисление» позволяет по-новому взглянуть на ряд новых направлений материаловедения, связанным с введением живых организмов в состав строительных материалов. Одно из «горячих» направлений в современном материаловедении основано на феномене восстановления микротрещин в бетоне за счет метаболизма вводимых в его состав бактерий. Сложность протекающих при этом процессов весьма велика и их моделирование традиционными методами бесперспективно. С точки зрения рассматриваемой нами концепции, интеграция микроорганизмов в бетонную матрицу трансформирует пассивную среду в активную вычислительную сеть, способную к диагностике, оценке степени повреждения и целенаправленному запуску репарационных процессов, что кардинально повышает долговечность и эффективность при экономии ресурсов. Такой подход позволяет осуществлять высокоуровневое абстрактное моделирование, фокусируясь на системных закономерностях и опуская избыточные детали, что проясняет ключевые причинно-следственные связи и общие принципы организации системы.

Однако задача практической реализации такой системы, исключительно сложна и требует принципиально новых теоретических оснований, в связи с чем настоящая статья представляет собой лишь предварительный набросок будущей теории, намечающий возможные пути её разработки и интеграции знаний из столь разнородных дисциплин.

Таким образом, темой исследования являются кибернетические основы работы самовосстанавливающегося бетона, как строительного материала, способный к восстановлению свойств при помощи микроорганизмов.

Как известно, в бетоне образуются трещины разной ширины [1], [2]. Попадание агрессивных химических веществ (хлоридов, сульфатов и кислот) приводит к разрушению бетона [3], [4] и преждевременной коррозии стальной арматуры [5], что снижает долговечность строительных конструкций [6], [7]. Использование в строительстве самовосстанавливающегося бетона приводит к увеличению эксплуатационного срока службы строительных конструкций [8]. В состав самовосстанавливающихся бетонных смесей со свойствами автогенного восстановления входят органические компоненты и микроорганизмы, способные вступать в реакцию с компонентами цементного состава и заполнять трещины [9], [10]. В данном исследовании, в качестве первого шага к кибернетическому описанию биобетона, проводится сопоставительный анализ процессов, возникающих в бетонной смеси в ходе самовосстановления, и вычислительных процессов, обеспечивающих моделирование данного явления.

В роли процессоров выступают клетки. Как и процессоры в компьютере, клетки выполняют определенные программы (метаболизм, регенерация или сигнальная передача) [11]. Разные клетки обладают своим набором функций, обрабатывающих информацию и реагирующих на внешние и внутренние воздействия [12]. Протекающие при этом процессы, управляемые в главных чертах метаболическими сетями, реализуются и интерпретируются в границах, задаваемых генетическим кодом.

Алгоритмы выполнения процессов в компьютере подобны генетическому коду, записанному в ДНК микроорганизмов, входящих в состав самовосстанавливающегося бетона. Алгоритмами выполнения вычислительных процессов определяется то, как программа будет обрабатывать данные [13]. В генетическом коде заложены функции организма, способные обуславливать химические и физические свойства микроорганизма [14].

Бактерии в составе самовосстанавливающегося цемента реагируют на изменения химического состава окружающей среды [15]. Реакция бактерий, возникающая в ответ на изменение химического состава окружающей среды сопоставима с обратной связью и адаптацией в вычислительном процессе [16]. Обратная связь позволяет определять и корректировать параметры функционирования системы. [15]. Адаптация представляет собой способность системы изменяться при влиянии внешних условий так, чтобы цель функционирования была достигнута [16]. Обратная связь и адаптация в вычислительном процессе отражает то, как организмы улучшают свои биохимические функции в ответ на разнообразные изменения [17], [18]. Таким образом, математическая аналогия между адаптацией микроорганизмов и вычислительной обратной связью позволяет формализовать описание реакции бактерий, используемых в составе

Kirsanova, T.; Chistyakov, V.; Beskopylny, A.; Aramova, O.; Alliluyeva, E.

Cyber-physical modeling and prediction of self-healing processes dynamics in bioconcrete;

2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 119 Article No 11902. doi: 10.4123/CUBS.119.2

самовосстанавливающегося бетона, на изменения химического состава окружающей среды [17], [18].

В природе каждый элемент биологической системы рибосомы, биомембранные и ферменты бактерий взаимодействуют между собой [19], [20], формируя сложные сети, способные к самоорганизации и восстановлению. На основе математической аналогии с этими биологическими процессами можно описывать и прогнозировать восстановление эксплуатационных характеристик бетона [21], [22].

Для управления процессом восстановления трещин необходимо фиксировать текущие параметры среды, прогнозировать динамику восстановления и управлять условиями, ускоряющими процесс восстановления.

В данной работе предлагается разработка киберфизической системы (КФС), объединяющей сенсорный мониторинг ключевых параметров бетона с прогнозной моделью на основе машинного обучения. Система позволит прогнозировать срок полного восстановления и просчитать практически выгодные условия внешнего воздействия (температуры, увлажнения) для ускорения восстановления.

Для достижения цели исследования необходимо решить ряд поставленных задач:

1. Анализировать механизмы самовосстановления бетона и сравнивать их с кибернетическими системами.
2. Разработать математическое моделирование с целью изучения динамики бактерий и процессов репарации.
3. Оценить обратную связь в системе, влияющей на самовосстановление и адаптацию бетона к внешним условиям.
4. Представить разработанную киберфизическую систему, объединяющую сенсорный мониторинг параметров самовосстанавливающегося бетона с прогнозной моделью на основе машинного обучения.

2 Bio-concrete as a cybernetic system: innovations in building materials

Введение бактерий в строительные материалы создает композитную смесь, где матрица бетона сочетается с активными микроорганизмами, такими как бактерии *Bacillus subtilis* и грибы *Trichoderma reesei*. Использование кибернетического подхода к анализу самовосстанавливающегося бетона дает возможность наглядно описать функционирование его компонентов.

Самовосстанавливающийся бетон представляет собой сочетание пассивного строительного материала и активного "вычислительного" модуля. Бетонная матрица обеспечивает несущую способность и долговечность конструкции. Введенные живые организмы активно взаимодействуют с окружающей средой, реагируя на изменения и запускают процессы восстановления.

Активность бактерий изменяется в зависимости от условий среды (влажность, pH, наличие питательных веществ), в которой они находятся (например, образование трещин и проникновение влаги в структуру бетона). При воздействии определенных факторов бактерии запускают биохимические реакции, в результате которых образуются карбонат кальция и другие минералы, способствующие укреплению структуры бетона. Реакция подобна алгоритмам обнаружения и исправления ошибок в вычислительных системах.

Бактериальные клетки функционируют как отдельные элементы, не требующие централизованного управления. Механизм, при котором микроорганизмы регулируют активность популяции [23]. Микроорганизмы адаптируют свои метаболические способности и активируют определенные функции в зависимости от её состояния называют «quorum sensing» [24]. Принцип механизма схож с принципом «swarm intelligence» в робототехнике. Этот принцип заключается в том, что множество простых элементов взаимодействуют между собой для достижения сложной задачи [25].

Микроорганизмы, добавленные в бетон, при взаимодействии со средой формируют биоминеральные отложения и остаточные продукты метаболизма, которые отражают предшествующие повреждения материала и условия его эксплуатации. Таким образом состав и интенсивность метаболических процессов изменяются под влиянием условий эксплуатации, подобно работе машинного обучения.

В процессах самовосстановления бетона участвует вода и питательные вещества из окружающей среды. Вода и питательные вещества позволяют процессам самовосстановления активироваться без внешних вмешательств. Главной отличительной чертой самовосстанавливающегося бетона является его способность к самовосстановлению. Самовосстановление сравнимо с самокоррекцией кода в компьютерах.

Скорость reparации может варьироваться в зависимости от уровня влажности и других факторов окружающей среды. Таким образом, материал динамически подстраивается под условия эксплуатации. Данная адаптивность подобна поведению сложных систем, которые меняют свои характеристики в зависимости от окружающей среды.

С позиции кибернетики, самовосстанавливающийся бетон рассматривается как материал с встроенным биокомпьютером, в котором живые компоненты исполняют роль процессоров, обрабатывающих информацию о повреждениях и инициирующих регенеративные процессы, превращая его из пассивного строительного материала в активную, саморегулируемую систему, соответствующую принципам автономных вычислений и адаптивных сетей. Аналогия, проведенная между процессами, происходящими в ходе самовосстановления в бетоне и кибернетической системой позволяет наглядно представить обоснование для создания умных материалов.

1. Математическое моделирование самовосстанавливающегося бетона позволит описать динамику роста или гибели бактерий. Модель позволит понять взаимодействие микроскопических организмов в бетоне и их поведение в зависимости от состояния окружающей среды.

2. Процесс reparации даст возможность анализировать стратегии восстановления микротрещин и повреждений, обеспечивая совершенствование регенеративных процессов.

3. Моделирование обратной связи позволит оценить, как информация о текущем состоянии материала влияет на скорость самовосстановления.

4. Реализация киберфизической системы для самовосстанавливающегося бетона позволит вывести технологию самовосстановления бетона на уровень «умного бетона» с адаптивным управлением процессом заращивания. Киберфизическая система позволит снизить эксплуатационные затраты и повысить долговечность.

3 Bacterial growth and activation model

3.1 Mathematical description of the effect of bacteria on the properties of concrete

Плотность популяции бактерий $N(x, t)$ в бетоне зависит от следующих факторов:

1. Локализация повреждения. Параметр (x) указывает на место трещины в бетоне.
2. Доступность ресурсов. Влажность $\omega(x, t)$, питательные вещества $C(x, t)$.

При достаточной влажности скорость размножения увеличивается. Напротив, в условиях дефицита влаги скорость смертности бактерий возрастает.

Структура клеток бактерий (особенно мёртвых) способствует дополнительному заполнению пор и микротрещин на ранних стадиях твердения. Поверхность бактериальных клеток с отрицательно заряженными функциональными группами связывает ионы кальция, алюминия, кремния и серы, способствуя образованию гидратов цемента ($C-S-H$, портландит, этtringит и др.) и уплотнению структуры. Это обеспечивает центры кристаллизации гидратов цемента и для живых, и для мёртвых клеток, хотя живая клеточная поверхность обеспечивает больше доступных центров связывания за счёт более высокой плотности отрицательного заряда [26]. Таблица 1 коротко описывает гипотезы повышения прочности строительных материалов.

Table 1 – Hypotheses of Strength Enhancement of Building Materials
Таблица 1 - Гипотезы повышения прочности строительных материалов

Механизм	Суть	Условия	Сильные стороны	Ограничения
Микробиологическое осаждение карбоната кальция	Бактерии выделяют ионы (через метаболизм), что вызывает осаждение	Нужны живые клетки, питательные вещества и условия для метаболизма	Обеспечивает самозалечивание трещин, заполнение пустот	В цементе малый шанс выживания бактерий; при отсутствии питательных

	CaCO ₃ (кальцита) в порах цемента			веществ процесс не идёт
Ограниченные волокна (эффект частиц)	Клетки (особенно мёртвые) работают как микроволокна в структуре	Возможен при любой форме введения клеток	Простая физическая модель, объясняет раннее упрочнение	Объём клеток очень мал по сравнению с матрицей; эффект быстро снижается
Нуклеационные центры	Поверхность клеток (отрицательно заряженные группы) связывает Ca ²⁺ , Si, Al, S и способствует росту гидратов (C-S-H, CH, AFt и др.)	Обеспечивает центры кристаллизации гидратов цемента и для живых, и для мёртвых клеток; особенно эффективно при высоком заряде клеточной стенки	Уплотнение структуры, увеличение гидратации, более высокая прочность	Прирост гидратов небольшой, механизм ещё недостаточно изучен

Для описания динамики популяции бактерий в бетоне используется обобщенное уравнение реакции-диффузии (1):

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D_N \nabla^2 N - rN(1 - \frac{N}{K}) + \alpha\omega(x, t)N - \beta N \quad (1)$$

где N - концентрация бактерий

$rN(1 - \frac{N}{K})$ - логистический рост, $\alpha\omega(x, t)N$ - активация водой, βN - смертность,

D_N - коэффициент диффузии бактерий в порах бетона, описывающий скорость их перемещения.

r - скорость размножения бактерий, определяющая, как быстро они могут увеличивать свою численность.

K - ёмкость среды, максимальная возможная плотность бактерий, которую может выдержать бетон.

α - чувствительность бактерий к влаге/

β - коэффициент гибели бактерий в сухих условиях.

Использование логистической модели роста позволяет учитывать ограничения на рост популяции бактерий и позволяет описывать сбалансированное взаимодействие между размножением и ограничениями окружающей среды.

Модель позволяет прогнозировать поведение самовосстанавливющегося бетона и оптимизировать состав смеси для повышения долговечности. Понимание взаимодействия бактерий с окружающей средой и их роль в процессе самовосстановления открывает возможности для разработки строительных конструкций с увеличенным сроком эксплуатации. Разработанная модель позволяет прогнозировать процесс самовосстановления бетона в зависимости от влияния различных факторов, что дает возможность инженерам и строителям принимать обоснованные решения, улучшая характеристики строительных материалов.

Бактерии в бетоне представляют собой пример взаимодействия микробиологии и строительства. Бактериальные метаболические процессы могут способствовать минерализации трещин и повышению долговечности бетона. Понимание динамики популяции бактерий и их взаимодействия с окружающей средой способствует повышению долговечности.

3.2 Mathematical modeling of concrete

Строительные материалы требуют совершенствования в подходах для увеличения долговечности. Одним из перспективных направлений является математическое моделирование,

которое направлено на использование биохимических процессов микроорганизмов для улучшения характеристик самовосстановливающегося бетона.

Для описания динамики взаимодействия органического процесса предложены следующие уравнения, которые описывают взаимодействие бактерий с влагой и питательными веществами. Уравнения (2) и (3) моделируют распределение ресурсов и их потребление бактериями.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_C \nabla^2 C - \gamma NC, \quad (2)$$

где γNC - потребление бактериями,

C - концентрация питательных веществ,

N - плотность бактерий,

γ - концентрация влаги,

D_C - коэффициент диффузии.

$$\phi_{t+1} - \phi_t - \eta \nabla L(\phi), \quad (3)$$

где $\delta N \omega$ - испарение/поглощение, $S(x, t)$ - внешний источник (дождь),

D_ω - коэффициент диффузии влаги,

∇ - скорость взаимодействия бактерий с влагой.

Уравнения демонстрируют бактериальное функционирование в виде распределенного вычислительного, в котором:

$N(x, t)$ действует как программа ремонта, активируемая изменениями (ω, C),

∇^2 - используется как оператор, аналогичный процессам распределённых вычислений в сети систем.

Каждое звено сети влияет на работу всего механизма.

Понимание и моделирование природных процессов дает возможность разработать строительные материалы. Эти материалы обладают механизмами биоминерализации и способствуют восстановлению трещин и могут продлить срок службы сооружений и сократить затраты на их техническое обслуживание.

4 Models of self-healing of building materials

4.1 Mathematical modeling of concrete

Модернизация строительных материалов включает использование природных процессов для минимизации повреждений и продления срока службы конструкций. Самовосстановление бетона является одним из примеров данных методов, представляющее локальную минимизацию повреждения $\phi(x, t)$.

Процесс заживления трещин описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -kN(x, t)\phi + \sigma(x, t), \quad (4)$$

где $kN(x, t)\phi$ - скорость репарации, $\sigma(x, t)$ - механическая нагрузка,

k — эффективность бактерий в осаждении карбоната кальция ($CaCO_3$).

Уравнение 4 показывает, как биологические и физические факторы взаимодействуют при восстановлении материала.

Модель самовосстановления аналогична алгоритмам градиентного спуска, используемым в машинном обучении (уравнение 5):

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{j \in N(i)} D_{ij} (N_j - N_i) + r_i N_i \left(1 - \frac{N_i}{K_i}\right), \quad (5)$$

где $L(\phi) - \frac{1}{2} \phi^2$ - функция потерь,

Здесь $N(x,t)$ играет роль learning rate η , адаптируясь к повреждению. Такая модель демонстрирует потенциал в интеграции биологических принципов в строительные технологии, позволяя создавать материалы, которые демонстрируют процессы самовосстановления на уровне микроструктуры благодаря активным компонентам.

4.2 Bio-concrete as a closed control system

Самовосстанавливающийся бетон представлен замкнутой системой управлений, где основными компонентами являются:

1. Даталог: $y(t) - \phi(x,t)$, отображающий размер трещины.
2. Управляющее воздействие: $v(t) - N(x,t)$, представляющее плотность бактерий, применяемых для заживления.
3. $\phi \rightarrow 0$, то есть полное устранение трещин.

4.3 Using the PID controller

Бактерии в бетоне можно моделировать как контроллер, который реагирует на изменения в структуре. Их деятельность аппроксимируется уравнением 5:

$$N(t) - K_p \phi(t) + K_i \int_0^t \phi(\tau) d\tau + K_d \frac{d\phi}{dt}, \quad (6)$$

где K_p - пропорциональный отклик, активирующий процессы заживления при обнаружении трещин.

K_i - интегральная компенсация, способствующая долгосрочному устранению повреждений.

K_d - дифференциальный компонент, предотвращающий рост трещин за счет предвидения изменений.

Физическая интерпретация:

K_p - скорость выделения карбоната кальция $CaCO_3$ при появлении трещин.

K_i - аккумуляция веществ для долговременной защиты и восстановления.

K_d - реакция на быстрые изменения и скорость распространения трещин.

Применение кибернетического подхода в самовосстанавливающихся строительных материалах позволяет создать математическую модель, учитывающую динамические изменения при возникновении структурных повреждений. Описание динамики восстановления бетона с использованием ПИД-регуляторов открывает возможность для улучшения процессов восстановления и увеличения долговечности строительных конструкций.

4.4 Network properties of Bio-concrete as an analogue of distributed computing,

Если бетон представить в виде сложной распределённой системы, то для описания взаимодействия колоний бактерий используется представление в виде графа, что позволяет анализировать взаимодействие компонентов. Рассмотрим систему с точки зрения теории графов:

Граф: $G = (V, E)$, где:

вершины (V): колонии бактерий.

ребра (E): каналы химической коммуникации (quorum sensing).

Эта модель позволяет описывать взаимодействие бактерий внутри бетона и их влияние на процесс заживления трещин.

Главной задачей диффузионной модели на графе является описание процесса распространения ресурсов и сигналов между колониями бактерий. Для этого используется дифференциальное уравнение 6:

$$\frac{dN_i}{dt} - \sum_{j \in N(i)} D_{ij} (N_j - N_i) + r_i N_i \left(1 - \frac{N_i}{K_i}\right), \quad (7)$$

где $N(i)$ – соседи i -й колонии.

Система может быть formalизована по аналогии с нейронной сетью или клеточным автоматом, где:

1. Каждая колония – это нейрон.

Kirsanova, T.; Chistyakov, V.; Beskopylny, A.; Aramova, O.; Alliluyeva, E.

Cyber-physical modeling and prediction of self-healing processes dynamics in bioconcrete; 2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 119 Article No 11902. doi: 10.4123/CUBS.119.2

2. Диффузия ресурсов несет функцию передачи сигналов.
3. Репарационные процессы могут быть описаны через механизм оптимизации, аналогичный обучению нейронной сети.

Используя подходы из теории графов и нейронных сетей, появляется возможность улучшить прогнозирование и моделирование процессов самовосстановления бетона. Такой подход создает большую эффективность в восстановлении.

5 Concept of a cyberphysical system

Конструкции из бетона под влиянием нагрузок растрескиваются, что снижает долговечность и требует регулярного обслуживания. Для управления процессами восстановления структуры бетона необходимо учитывать параметры среды, прогнозировать динамику восстановления и управлять условиями, ускоряющими процесс.

Разработка киберфизической системы (КФС), объединяющей сенсорный мониторинг ключевых параметров бетона с прогнозной моделью на основе машинного обучения, позволит оценивать сроки восстановления и прогнозировать эффективность процесса и оптимизировать внешние воздействия (температуру, увлажнение) для ускорения процессов минерализации и закрытия трещин (рисунок 1).

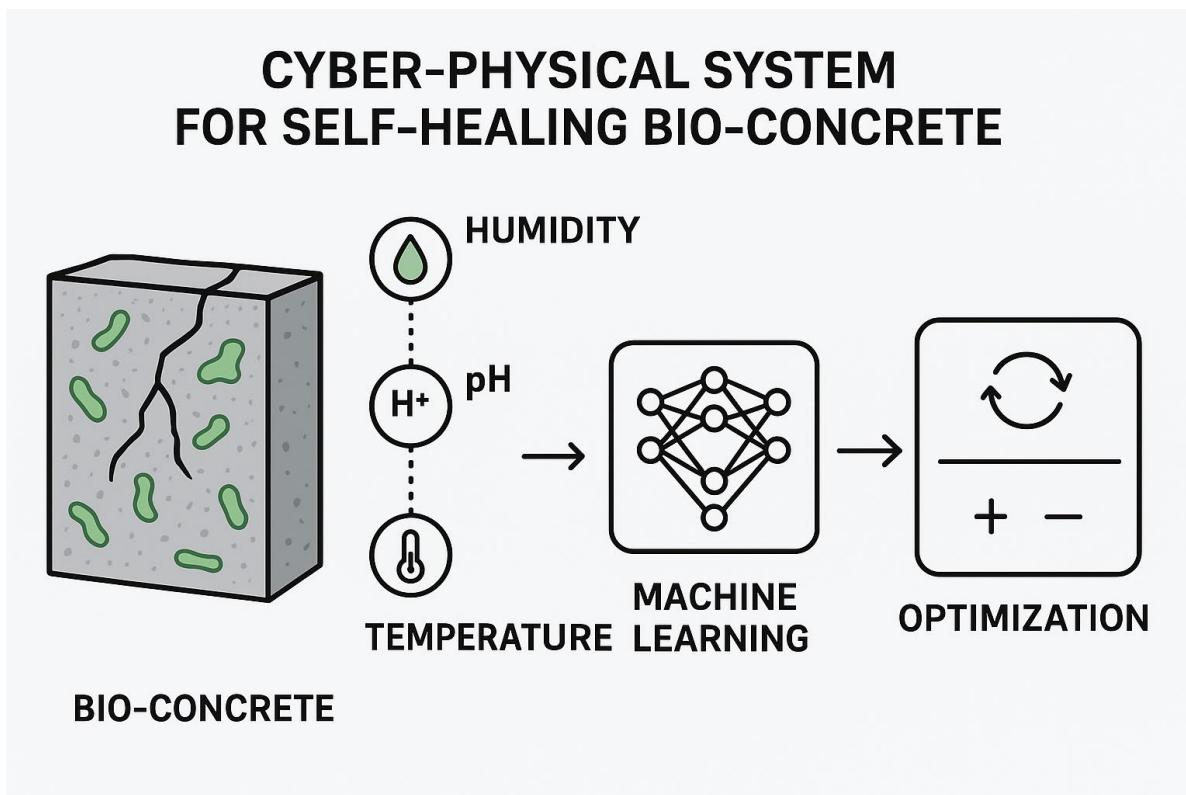


Fig. 1 – Cyber-physical system for self-healing bio-concrete

Рис. 1 - Киберфизическая система для самовосстанавливющегося бетона

Image by the author of the article

В основу системы положена интеграция сенсорных элементов, измеряющих влажность, pH и температуру непосредственно внутри бетонной структуры. Эти параметры критичны для протекания химико-физических процессов восстановления; влажность обеспечивает необходимую среду для реакции гидратации и активности бактерий (в случае биологического самоисцеления), уровень кислотно-щелочного баланса отражает химическую активность среды и способствует контролю за процессом карбонизации и коррозии, температура влияет на скорость химических реакций и биологических процессов.

Данные с сенсоров поступают в реальном времени в вычислительный блок, обеспечивая непрерывный мониторинг состояния материала.

Основой аналитической части системы является гибридная модель, включающая:

1. физико-химическую компоненту, описывающую кинетику реакций гидратации и микроструктурные изменения, основанную на уравнениях диффузии, гидратации и химического равновесия.
2. нейросетевую надстройку, обученную на исторических данных о процессах самовосстановления. Надстройка учитывает сложные нелинейные зависимости и влияние внешних факторов.

Сочетание физико-химической компоненты и нейросетевой надстройки позволяет повысить точность прогноза и создаёт возможность для корректировки условий эксплуатации (рисунок 2).

Predictive Model for Cyber-Physical System of Bio-Concrete

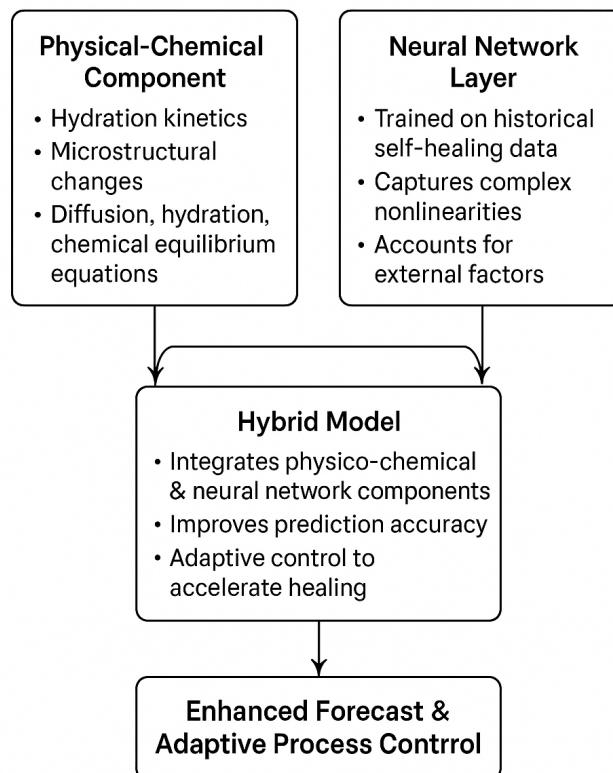


Fig. 2 – Predictive model for cyber-physical system of bio-concrete

Рис. 2 – Структура киберфизической модели для самовосстанавливающегося бетона

Image by the author of the article

Киберфизическая модель для самовосстанавливающегося бетона не ограничена оценкой срока полного заживления трещины. На основе данных, полученных после применения киберфизической модели, для самовосстанавливающегося бетона появляется возможность выработать рекомендации по регулированию температуры и увлажнения бетона для увеличения скорости восстановления.

На основе прогноза киберфизической системы для самовосстанавливающегося бетона автоматически формируются управляющие сигналы для систем увлажнения и подогрева бетонных конструкций, реализуя концепцию «умного бетона» с динамическим контролем среды.

Гибридный метод расчёта даёт возможность использовать физико-химическую модель в сочетании с нейросетевой надстройкой и обеспечить баланс между возможностями бетона к восстановлению и его адаптации к окружающим условиям.

Расчётный алгоритм включает несколько этапов (рисунок 3).

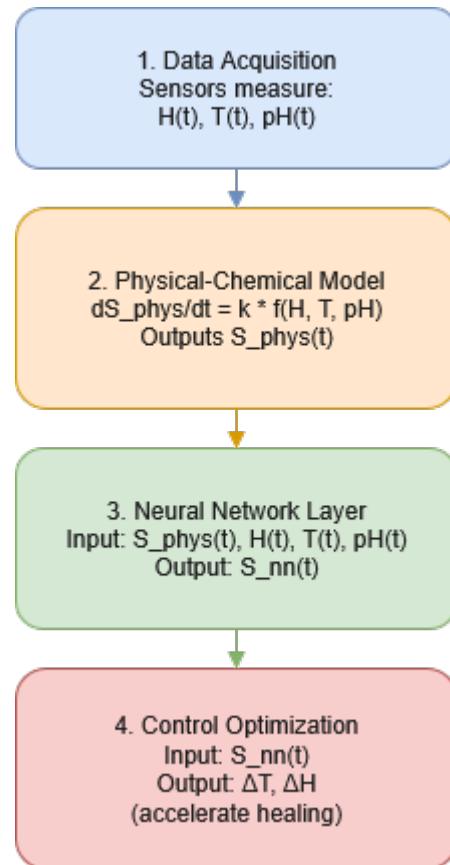


Fig. 3 – The stages of the computational algorithm of the cyberphysical model for biobet

Рис. 3 – Этапы расчетного алгоритма киберфизической модели для самовосстанавливающегося бетона

Image by the author of the article

Рисунок 3 показывает 4 последовательных этапа расчетного алгоритма киберфизической модели:

1. Сбор данных заключается в непрерывном мониторинге влажности $H(t)$, температуры $T(t)$ и кислотно-щелочного баланса $pH(t)$.
2. На следующем этапе происходит вычисление скорости гидратации и степени закрытия трещины $S_{Phys}(t)$ на основе уравнения (8):

$$\frac{dS_{Phys}}{dt} = k f(H(t), T(t), pH(t)) \quad (8)$$

где k является константой скорости реакции, а функция f учитывает зависимости от параметров среды.

3. Следующим этапом является обработка в многослойной нейронной сети, принимающей на вход результаты физической модели и параметры окружающей среды, и выдающей скорректированное значение степени восстановления $S_{nn}(t)$.
4. На завершающем этапе по результатам прогноза формируются рекомендации по управляющим воздействиям ΔT , ΔH , с учетом технологических ограничений.

Реализация предложенной киберфизической системы для самовосстанавливающегося бетона позволит создать предпосылки для реализации концепции интеллектуального мониторинга и адаптивного управления процессами восстановления бетона. Киберфизическая система позволит снизить эксплуатационные затраты и повысить долговечность.

6 Conclusions

Изучение процессов самовосстановления в бетоне при помощи аналогии с математическим моделированием и кибернетическим подходом позволило решить ряд поставленных задач:

1. Проанализированы механизмы самовосстановления бетона и проведено их сравнение с принципами функционирования кибернетических систем.
2. Предложена математическая модель с целью изучения динамики бактериальных популяций и процессов восстановления структуры.
3. Оценено влияние обратной связи между состоянием материала и активностью микроорганизмов.
4. Представлена киберфизическая система, объединяющая сенсорный мониторинг параметров бетона с прогнозной моделью на основе машинного обучения.

В предложенном подходе бетон рассматривается как объект, в котором динамика физических и биохимических процессов жизнедеятельности бактерий описывается уравнениями реакции-диффузии и системами обратной связи. Такой подход позволяет оценивать влияние внешних факторов и прогнозировать динамику восстановления структуры.

Использование моделей с обратной связью и алгоритмов машинного обучения позволяет описывать сложные нелинейные зависимости между параметрами среды и процессами восстановления, создавая основу для автоматизированного регулирования условий, оптимизирующих процессы восстановления и повышающих долговечность материала.

Реализация предложенной киберфизической системы создаёт предпосылки для внедрения технологий самовосстанавливющегося бетона с автоматизированным мониторингом и управлением на основе данных, что способствует снижению эксплуатационных затрат и увеличению срока службы конструкций.

Будущие исследования авторы связывают с верификацией предложенных моделей и экспериментальной оценки коэффициентов, входящих в уравнения реакции-диффузии.

7 Fundings

This research was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 24-44-20012, <https://rscf.ru/en/project/24-44-20012/>.

References

- 1 Vijay, K. and Murmu, M. (2022) Application of Artificial Neural Networks for Prediction of Microbial Concrete Compressive Strength. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, **7**. <https://doi.org/10.1007/s41024-021-00140-3>.
- 2 De Belie, N., Van Tittelboom, K., Sánchez Moreno, M., Ferrara, L. and Gruyaert, E. (2022) Self-Healing Concrete Research in the European Projects SARCOS and SMARTINCS. *RILEM Bookseries*, **34**, 303–307. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76465-4_27.
- 3 Amenta, M., Papaioannou, S., Kilikoglou, V. and Karatasios, I. (2022) Morphological and Chemical Characterization of Self-Healing Products in MgO Concrete. *RILEM Bookseries*, **34**, 335–348. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76465-4_30.
- 4 Zhang, L. and Deng, S. (2022) Analysis of the Effect of Self-Repairing Concrete Under Sulfate Erosion Considering the Rectangular Simulation Algorithm. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, **84**, 218–225. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5857-0_26.
- 5 Wang, X., Chen, Z., Ren, J., Chen, S. and Xing, F. (2022) Object Status Identification of X-Ray CT Images of Microcapsule-Based Self-Healing Mortar. *Cement and Concrete Composites*, **125**. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104294>.
- 6 Zhang, J. (2022) Recent Advance of MgO Expansive Agent in Cement and Concrete. *Journal of Building Engineering*, **45**. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103633>.
- 7 Huynh, N.N.T., Imamoto, K.-I., Kiyohara, C., Huyen, N.P.H. and Son, N.K. (2022) Mechanism Analysis and Improvement of Bacterial Bio-Mineralization for Self-Healing Concrete Using *Bacillus Subtilis Natto* Immobilized in Lightweight Aggregate. *Lecture Notes in Civil Engineering*, **203**, 763–771. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7160-9_77.
- 8 Priyom, S.N., Islam, M.M., Islam, M.S. and Shumi, W. (2022) Microbial Technology—A Sustainable Alternative to Improve Concrete Quality. *Lecture Notes in Civil Engineering*, **184**, 275–

Kirsanova, T.; Chistyakov, V.; Beskopylny, A.; Aramova, O.; Alliluyeva, E.

Cyber-physical modeling and prediction of self-healing processes dynamics in bioconcrete; 2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 119 Article No 11902. doi: 10.4123/CUBS.119.2

286. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5547-0_27.
- 9 Dai, Z., Tsangouri, E., Van Tittelboom, K., Zhu, X. and Gilabert, F.A. (2022) Understanding Fracture Mechanisms via Validated Virtual Tests of Encapsulation-Based Self-Healing Concrete Beams. *Materials and Design*, **213**. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110299>.
- 10 Sun, J., Kong, K.H., Lye, C.Q. and Quek, S.T. (2022) Effect of Ground Granulated Blast Furnace Slag on Cement Hydration and Autogenous Healing of Concrete. *Construction and Building Materials*, **315**. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125365>.
- 11 Riad, I.M., Elshami, A.A. and Elshikh, M.M.Y. (2022) Influence of Concentration and Proportion Prepared Bacteria on Properties of Self-Healing Concrete in Sulfate Environment. *Innovative Infrastructure Solutions*, **7**. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00670-2>.
- 12 Kanwal, M., Khushnood, R.A., Khaliq, W., Wattoo, A.G. and Shahid, T. (2022) Synthesis of Pyrolytic Carbonized Bagasse to Immobilize *Bacillus Subtilis*; Application in Healing Micro-Cracks and Fracture Properties of Concrete. *Cement and Concrete Composites*, **126**. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104334>.
- 13 Sonmez, M. and Erşan, Y.Ç. (2022) Production and Compatibility Assessment of Denitrifying Biogranules Tailored for Self-Healing Concrete Applications. *Cement and Concrete Composites*, **126**. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104344>.
- 14 de Souza Oliveira, A., Toledo Filho, R.D., de Moraes Rego Fairbairn, E., de Oliveira, L.F.C. and da Fonseca Martins Gomes, O. (2022) Microstructural Characterization of Self-Healing Products in Cementitious Systems Containing Crystalline Admixture in the Short- and Long-Term. *Cement and Concrete Composites*, **126**. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104369>.
- 15 Rossi, E., Roy, R., Copuroglu, O. and Jonkers, H.M. (2022) Influence of Self-Healing Induced by Polylactic-Acid and Alkanoates-Derivates Precursors on Transport Properties and Chloride Penetration Resistance of Sound and Cracked Mortar Specimens. *Construction and Building Materials*, **319**. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126081>.
- 16 Liu, K., Xu, P., Wang, F., You, L., Zhang, X. and Fu, C. (2022) Assessment of Automatic Induction Self-Healing Treatment Applied to Steel Deck Asphalt Pavement. *Automation in Construction*, **133**, 104011. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104011>.
- 17 Vijay, K. and Murmu, M. (2022) Evaluating Durability Parameters of Concrete Containing Bacteria and Basalt Fiber. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, **7**. <https://doi.org/10.1007/s41024-021-00138-x>.
- 18 Xu, S., Liu, X., Tabaković, A. and Schlangen, E. (2021) The Prospect of Microwave Heating: Towards a Faster and Deeper Crack Healing in Asphalt Pavement. *Processes*, **9**. <https://doi.org/10.3390/pr9030507>.
- 19 Park, B. and Choi, Y.C. (2021) Effect of Healing Products on the Self-Healing Performance of Cementitious Materials with Crystalline Admixtures. *Construction and Building Materials*, **270**. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121389>.
- 20 Tittelboom, K. V., Belleghem, B. V., Heede, P.V.D., Putten, J.V.D., Callens, R., Stappen, J. V., Deprez, M., Cnudde, V. and Belie, N.D. (2021) Manual Application versus Autonomous Release of Water Repellent Agent to Prevent Reinforcement Corrosion in Cracked Concrete. *Processes*, **9**. <https://doi.org/10.3390/pr9122101>.
- 21 Luhar, S., Luhar, I. and Shaikh, F.U.A. (2021) Review on Performance Evaluation of Autonomous Healing of Geopolymer Composites. *Infrastructures*, **6**. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6070094>.
- 22 Ilyaei, S., Sourki, R. and Akbari, Y.H.A. (2021) Capsule-Based Healing Systems in Composite Materials: A Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, **46**, 491–531. <https://doi.org/10.1080/10408436.2020.1852912>.
- 23 Beskopylny, A.N.; Shcherban', E.M.; Stel'makh, S.A.; Shilov, A.A.; Chernil'nik, A.; El'shaeva, D.; Chistyakov, V.A. (2024) Analysis of the Current State of Research on Bio-Healing Concrete (Bioconcrete). *Materials*, **17**.
- 24 Miller, M.B. and Bassler, B.L. (2001) Quorum Sensing in Bacteria. *Annual Review of Microbiology*, **55**, 165–199. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.55.1.165>.
- 25 Keller, L. and Surette, M.G. (2006) Communication in Bacteria: An Ecological and Evolutionary Perspective. *Nature Reviews Microbiology*, **4**, 249–258. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1383>.
- 26 Skevi, L., Reeksting, B.J., Hoffmann, T.D., Gebhard, S. and Paine, K. (2021) Incorporation of Bacteria in Concrete: The Case against MICP as a Means for Strength Improvement. *Cement and Concrete Composites*, **120**. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104056>.

