БИОБЕТОН С ЭФФЕКТОМ САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ: МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ, ПОДБОР СОСТАВА И РАСЧЁТ ЗАЛЕЧИВАНИЯ ТРЕЩИН

Дадабаева Нелюфар Умаровна
Ташкентский государственный транспортный университет
nelyufardadabayeva@gmail.com

Annotatsiya. *Mazkur maqolada o‘z-o‘zini tiklash xususiyatiga ega biobetonning ishlash mexanizmi, tarkibini tanlash va yoriqlarni bitish jarayonini hisoblash usuli ko‘rib chiqilgan. Bolomey Skramtayev formulasi asosida B25 sinfdagi nazorat va bakteriyali beton tarkiblari hisoblangan. Kalsiy laktatning mikrobiologik oksidlanishi va portlanditning ikkilamchi karbonlanishi stexiometriyasi asosida hosil bo‘ladigan kalsiy karbonat miqdorini hamda eni 0,1–0,4 mm bo‘lgan yoriqlarni yopish chuqurligini baholash modeli taklif etilgan. Natijalar biobetonni O‘zbekistonning issiq va quruq iqlimi hamda sho‘rlangan gruntlari sharoitida gidrotexnik, yer osti va poydevor konstruksiyalarida qo‘llash istiqbollarini ko‘rsatadi.*

Kalit so‘zlar: *biobeton, o‘z-o‘zini tiklovchi beton, mikrobiologik kalsit cho‘ktirish, Bacillus bakteriyalari, kalsiy laktat, beton tarkibini hisoblash, yoriqlar.*

Аннотация. *В статье рассмотрены механизм действия самовосстанавливающегося биобетона, подбор его состава и методика расчёта залечивания трещин. По формуле Боломея Скрамтаева рассчитаны составы контрольного и бактериального бетона класса B25. На основе стехиометрии микробиологического окисления лактата кальция с учётом вторичной карбонизации портландита предложена модель оценки количества образующегося карбоната кальция и глубины герметизации трещин шириной 0,1–0,4 мм. Результаты показывают перспективность применения биобетона в гидротехнических, подземных и фундаментных конструкциях в условиях жаркого сухого климата и засоленных грунтов Узбекистана.*

Ключевые слова: *биобетон, самовосстанавливающийся бетон, микробиологическое осаждение кальцита, бактерии Bacillus, лактат кальция, подбор состава бетона, трещины.*

Abstract. *The paper considers the mechanism of self-healing bioconcrete, the design of its mix and a method for calculating crack healing. Using the Bolomey–Skramtaev formula, control and bacteria-based concrete mixes of class B25 are designed. Based on the stoichiometry of microbial oxidation of calcium lactate, including secondary carbonation of portlandite, a model is proposed for estimating the amount of precipitated calcium carbonate and the sealing depth of cracks 0.1–0.4 mm wide. The results indicate the potential of bioconcrete for hydraulic, underground and foundation structures in the hot, dry climate and saline soils of Uzbekistan.*

Keywords: *bioconcrete, self-healing concrete, microbially induced calcite precipitation, Bacillus bacteria, calcium lactate, concrete mix design, cracks.*

Введение. Бетон и железобетон остаются основными конструкционными материалами современного строительства, а производство портландцемента даёт значительную долю антропогенных выбросов CO_2. Вместе с тем бетон хрупкий материал с низкой прочностью на растяжение, поэтому образование трещин в нём практически неизбежно. Трещины возникают вследствие усадки, температурных деформаций, силовых воздействий и неравномерных осадок основания. Даже мелкие трещины шириной 0,1–0,3 мм резко повышают проницаемость бетона для воды, хлоридов, сульфатов и углекислого газа, что ускоряет карбонизацию защитного слоя и коррозию арматуры. Нормы проектирования ограничивают ширину раскрытия трещин: по СП 63.13330.2018 из условия сохранности арматуры предельная ширина продолжительного раскрытия составляет 0,3 мм, непродолжительного 0,4 мм [12]. Традиционный ремонт трещин (инъецирование эпоксидными и полиуретановыми составами, торкретирование) требует доступа к конструкции, остановки эксплуатации и значительных затрат, а для подземных и гидротехнических сооружений зачастую технически затруднён. Для Республики Узбекистан проблема долговечности бетона особенно актуальна. Резко континентальный климат с большими суточными и сезонными перепадами температур, высокая солнечная радиация, засоленные грунты и грунтовые воды в низовьях Амударьи (Республика Каракалпакстан, Хорезмская и Бухарская области), а также протяжённая сеть ирригационных каналов и гидротехнических

сооружений создают условия для интенсивного трещинообразования и коррозионного разрушения бетона. На фоне масштабной строительной программы повышение долговечности конструкций без увеличения затрат на их обслуживание является важной научно-технической задачей.

Одним из перспективных направлений её решения является биобетон самовосстанавливающийся бетон, в состав которого вводятся споры алкалифильных бактерий и питательный субстрат. При появлении трещины и проникновении в неё воды бактерии активируются и осаждают карбонат кальция, закупоривая трещину. Концепция развита в работах Х. Йонкерса и соавторов (Делфтский технический университет) [1, 2], группы Н. Де Бели (Гентский университет) [3, 5] и других исследователей [6–8]. Однако в большинстве публикаций основное внимание уделяется микробиологическим аспектам, тогда как инженерные методики подбора состава и количественной оценки залечивающей способности представлены недостаточно.

Цель настоящей работы обобщить механизм действия биобетона и предложить инженерную последовательность расчёта, включающую подбор состава бетона с биодобавкой и оценку количества карбоната кальция, достаточного для герметизации трещин заданной ширины.

1. Механизм биологического самовосстановления

В основе работы биобетона лежит микробиологически индуцированное осаждение карбоната кальция (МИОК, англ. MICP microbially induced calcium carbonate precipitation) [4]. Различают два основных пути этого процесса.

Первый путь уреолиз, осуществляемый, например, бактериями *Sporosarcina pasteurii* и *Lysinibacillus sphaericus*. Фермент уреаза разлагает мочевину с образованием карбонат-ионов, которые связываются с ионами кальция:

$$CO(NH_2)_2 + 2H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + CO_3^{2-}, \quad (1)$$

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3\downarrow. \quad (2)$$

Уреолитический путь обеспечивает высокую скорость осаждения, однако сопровождается выделением аммония, неблагоприятного с экологической точки зрения и для долговечности бетона; кроме того, он требует введения дополнительного растворимого источника кальция [3, 4].

Второй путь метаболическое окисление органических солей кальция алкалифильными спорообразующими бактериями рода *Bacillus* (*B.*

pseudofirmus, B. cohnii и др.). Наиболее изученным субстратом является лактат кальция [1, 2]:

$$Ca(C_3H_5O_3)_2 + 6O_2 \rightarrow CaCO_3 + 5CO_2 + 5H_2O. \quad (3)$$

Образующийся углекислый газ дополнительно реагирует с портландитом цементного камня, давая вторичный карбонат кальция [1]:

$$5CO_2 + 5Ca(OH)_2 \rightarrow 5CaCO_3 + 5H_2O. \quad (4)$$

Таким образом, из одного моля лактата кальция теоретически может быть получено до шести молей $CaCO_3$. Кроме того, бактерии потребляют кислород, что замедляет коррозию арматуры в зоне трещины. Важное преимущество спорообразующих бактерий состоит в том, что споры сохраняют жизнеспособность в высокощелочной среде бетона (pH 12,5–13) и находятся в состоянии покоя; активация происходит только при поступлении в трещину воды и кислорода [1, 6].

2. Компоненты биобетона

Биобетон включает обычные компоненты тяжёлого бетона и биологическую добавку, состоящую из бактерий, питательного субстрата и носителя. Основные варианты компонентов обобщены в таблице 1.

Таблица 1

Основные компоненты биобетона

Компонент	Варианты	Назначение
Бактерии	*B. pseudofirmus, B. cohnii* (неуреолитические); *S. pasteurii, L. sphaericus* (уреолитические)	Осаждение $CaCO_3$; устойчивость спор к щелочной среде
Питательный субстрат	Лактат кальция; мочевина + соль кальция; дрожжевой экстракт в малых дозах	Источник углерода и кальция
Носитель спор	Керамзитовый песок, диатомит, микрокапсулы, гидрогели	Сохранение жизнеспособности спор
Матрица	ЦЕМ I 42,5; кварцевый песок; щебень 5–20 мм	Прочность; портландит для реакции (4)

Прямое введение спор в бетонную смесь приводит к постепенной потере их жизнеспособности по мере уплотнения структуры цементного камня, поэтому в современных разработках применяются пористые носители или капсулы [1, 5]. Органические добавки, в том числе лактат кальция, могут влиять на сроки схватывания и прочность бетона [6], что учитывается при подборе состава. Для железобетона не следует применять

в качестве источника кальция хлорид кальция, поскольку хлорид-ионы провоцируют коррозию арматуры.

3. Подбор состава контрольного бетона

Расчёт выполнен для тяжёлого бетона класса В25 по прочности на сжатие (марка по удобоукладываемости П2, осадка конуса 5–9 см) методом абсолютных объёмов с использованием формулы Боломея–Скрамтаева [9, 10]. Исходные данные приведены в таблице 2.

Таблица 2

Исходные данные для расчёта

Показатель	Обозначение	Значение
Класс бетона по прочности	B	B25 (25 МПа)
Коэффициент вариации прочности	v	0,135
Активность цемента ЦЕМ I 42,5	$R_ц$	42,5 МПа
Коэффициент качества заполнителей (рядовые)	A	0,60
Истинная плотность цемента	$\rho_ц$	3,10 кг/л
Истинная плотность щебня	$\rho_щ$	2,65 кг/л
Насыпная плотность щебня	$\rho_{н.щ}$	1,45 кг/л
Истинная плотность песка	$\rho_п$	2,63 кг/л
Водопотребность смеси (щебень до 20 мм, П2)	В	200 л/м^3

Шаг 1. Требуемая средняя прочность бетона при коэффициенте вариации v = 0,135 и обеспеченности 95 % (t = 1,64):

$$R_б = B/(1 - t\cdot v) = 25/(1 - 1{,}64\cdot 0{,}135) = 25/0{,}779 = 32{,}1 \text{ МПа}. \quad (5)$$

Шаг 2. Цементно-водное отношение по формуле Боломея–Скрамтаева (при Ц/В ≤ 2,5):

$$R_б = A\cdot R_ц\cdot(Ц/В - 0{,}5), \quad (6)$$

откуда

$$Ц/В = R_б/(A\cdot R_ц) + 0{,}5 = 32{,}1/(0{,}60\cdot 42{,}5) + 0{,}5 = 1{,}76;\ В/Ц = 0{,}57. \quad (7)$$

Шаг 3. Расход цемента при водопотребности В = 200 л/м^3:

$$Ц = В\cdot(Ц/В) = 200\cdot 1{,}76 = 352 \text{ кг/м}^3. \quad (8)$$

Шаг 4. Пустотность щебня:

$$V_п = 1 - \rho_{н.щ}/\rho_щ = 1 - 1{,}45/2{,}65 = 0{,}453. \quad (9)$$

Шаг 5. Расход щебня при коэффициенте раздвижки зёрен α = 1,38, принятом по справочным таблицам [9] для Ц ≈ 350 кг/м^3 и В/Ц ≈ 0,6:

$$Щ = 1000/(\alpha\cdot V_п/\rho_{н.щ} + 1/\rho_щ) = 1000/(0{,}431 + 0{,}377) = 1237 \text{ кг/м}^3. \quad (10)$$

Шаг 6. Расход песка по методу абсолютных объёмов:

$$П = [1000 − (Ц/\rho_ц + В + Щ/\rho_щ)]\cdot\rho_п = [1000 − 780{,}3]\cdot 2{,}63 = 578 \text{ кг/м}^3. \quad (11)$$

Здесь $Ц/\rho_ц$ = 113,5 л, $Щ/\rho_щ$ = 466,8 л. Расчётная плотность бетонной смеси составляет 352 + 200 + 1237 + 578 = 2367 кг/м^3, доля песка в смеси заполнителей r = 578/(578 + 1237) = 0,32, что находится в обычно рекомендуемых пределах.

4. Подбор состава биобетона

При переходе к биобетону в состав вводятся: носитель спор керамзитовый песок фракции 1–4 мм, предварительно пропитанный суспензией спор и замещающий 20 % объёма кварцевого песка; питательный субстрат лактат кальция в количестве 3 % от массы цемента. Носитель вводится в водонасыщенном состоянии, чтобы он не отбирал воду затворения. Для учёта возможного снижения прочности из-за пористого носителя и органической добавки вводится понижающий коэффициент $k_б$ = 0,95, значение которого подлежит уточнению по результатам испытаний по ГОСТ 10180-2012 [11].

Скорректированная требуемая прочность, цементно-водное отношение и расходы цемента и лактата кальция:

$$R_б' = R_б/k_б = 32{,}1/0{,}95 = 33{,}8 \text{ МПа}, \quad (12)$$

$$Ц/В = 33{,}8/(0{,}60\cdot 42{,}5) + 0{,}5 = 1{,}83;\ \ В/Ц = 0{,}55, \quad (13)$$

$$Ц = 200\cdot 1{,}83 = 365 \text{ кг/м}^3, \quad (14)$$

$$Л = 0{,}03\cdot Ц = 0{,}03\cdot 365 = 11{,}0 \text{ кг/м}^3. \quad (15)$$

Расход щебня принимается равным контрольному (1237 кг/м^3). Объём, остающийся на мелкий заполнитель, с учётом абсолютного объёма лактата кальция (плотность ≈ 1,5 кг/л, $V_л$ ≈ 7,3 л):

$$V_{мз} = 1000 − (117{,}7 + 200 + 466{,}8 + 7{,}3) = 208{,}2 \text{ л}. \quad (16)$$

Из этого объёма 80 % приходится на кварцевый песок, 20 % — на керамзитовый носитель (плотность зёрен принята 1,10 кг/л):

$$П = 0{,}8\cdot 208{,}2\cdot 2{,}63 = 438 \text{ кг/м}^3;\ \ К = 0{,}2\cdot 208{,}2\cdot 1{,}10 = 46 \text{ кг/м}^3. \quad (17)$$

Количество спор назначается исходя из концентрации порядка 10^5 клеток/мл воды затворения, применявшейся в ряде исследований [7]: N = 200 000 мл·10^5 клеток/мл = $2\cdot 10^{10}$ клеток на 1 м^3 бетона. На практике споры вводятся в составе носителя, пропитанного суспензией соответствующей концентрации. Результаты расчёта сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Составы контрольного бетона и биобетона класса B25 на 1 м^3

Компонент	Контрольный бетон	Биобетон
Цемент ЦЕМ I 42,5, кг	352	365
Вода, л	200	200
Щебень 5–20 мм, кг	1237	1237
Кварцевый песок, кг	578	438
Керамзитовый песок 1–4 мм (носитель), кг	-	46
Лактат кальция, кг	-	11,0
Споры *Bacillus*, клеток	-	$\approx 2\cdot10^{10}$
В/Ц	0,57	0,55
Плотность смеси, кг/м^3	2367	2297

5. Расчёт залечивающей способности

Для инженерной оценки предлагается следующая модель. Рассматривается трещина шириной w, длиной L и требуемой глубиной герметизации h_s. Объём карбоната кальция, необходимый для закупорки устья трещины:

$$V_{тр} = w\cdot L\cdot h_s. \quad (18)$$

В образовании карбоната участвует лишь субстрат, находящийся в прилегающей к трещине зоне шириной b по обе стороны от её плоскости и глубиной d. Масса лактата в этой зоне:

$$m_л = Л\cdot(2b\cdot L\cdot d). \quad (19)$$

Масса образующегося карбоната кальция с учётом стехиометрии реакций (3)–(4) и коэффициента использования субстрата η:

$$m_{CaCO3} = \eta\cdot n\cdot(M_{CaCO3}/M_л)\cdot m_л, \quad (20)$$

где M_{CaCO3} = 100,09 г/моль и $M_л$ = 218,2 г/моль - молярные массы карбоната кальция и безводного лактата кальция; n - число молей $CaCO_3$ на моль лактата (n = 1 - только реакция (3); n = 6 - с учётом вторичной карбонизации портландита по реакции (4)). При n = 1 выход составляет 0,459 кг, при n = 6 - 2,752 кг $CaCO_3$ на 1 кг лактата. Достижимая глубина герметизации трещины:

$$h_s = m_{CaCO3}/(\rho_к\cdot w\cdot L), \quad (21)$$

где $\rho_к$ = 2,71 г/см^3 - плотность кальцита.

Пример. Для биобетона по таблице 3 (Л = 11,0 кг/м^3) примем L = 1 м, d = 20 мм, b = 5 мм, η = 0,3. Объём расчётной зоны $2\cdot0{,}005\cdot1\cdot0{,}02 = 2\cdot10^{-4}$ м^3, масса лактата в зоне $m_л = 11{,}0\cdot2\cdot10^{-4} = 2{,}2\cdot10^{-3}$ кг = 2,2 г. Масса $CaCO_3$ при

n = 6: m = 0,3·2,752·2,2 = 1,82 г, что соответствует объёму 1,82/2,71 = 0,67 см^3 = 670 мм^3. Для трещины шириной w = 0,3 мм глубина герметизации составит h_s = 670/(0,3·1000) = 2,2 мм. Без учёта вторичной карбонизации (n = 1) эта величина снижается до 0,37 мм. Результаты для других значений ширины трещин приведены в таблице 4.

Таблица 4

Расчётная глубина герметизации трещин h_s, мм (Л = 11,0 кг/м^3, η = 0,3)

Ширина трещины w, мм	n = 1 (V = 112 мм^3)	n = 6 (V = 670 мм^3)
0,1	1,12	6,70
0,2	0,56	3,35
0,3	0,37	2,23
0,4	0,28	1,68

Результаты показывают, что образование $CaCO_3$ только по реакции (3) обеспечивает лишь поверхностное перекрытие трещины, тогда как с учётом вторичной карбонизации портландита достигается герметизация устья трещин шириной 0,2–0,4 мм на глубину 1,7–3,4 мм, что достаточно для существенного снижения водопроницаемости. Это согласуется с экспериментальными данными [2], по которым в образцах с бактериями залечивались трещины шириной до 0,46 мм, тогда как в контрольных образцах лишь до 0,18 мм.

Обращая формулы (19)–(21), можно назначить требуемый расход субстрата по заданным w и h_s:

$$Л = \rho_к \cdot w \cdot h_s / [\eta \cdot n \cdot (M_{CaCO3}/M_л) \cdot 2b \cdot d]. \quad (22)$$

Например, для герметизации трещин шириной 0,4 мм на глубину 3 мм потребуется Л ≈ 19,7 кг/м^3 (около 5,4 % от массы цемента), что уже может заметно сказаться на прочности. Следовательно, дозировку субстрата целесообразно назначать исходя из допустимой ширины раскрытия трещин конкретной конструкции. Предложенная модель является оценочной: параметры η и b зависят от влажностного режима, диффузии субстрата и возраста бетона и подлежат экспериментальной калибровке.

6. Оценка эффективности самовосстановления

Эффективность залечивания оценивается по трём группам показателей — степени закрытия трещины по ширине (оптическая микроскопия), снижению водопроницаемости и восстановлению прочности:

$$\eta_w = (1 - w_t/w_0)\cdot 100\ \%, \quad (23)$$

$$\eta_k = (1 - k_t/k_0)\cdot 100\ \%, \quad (24)$$

$$\eta_R = (R_t - R_п)/(R_0 - R_п)\cdot 100\ \%, \quad (25)$$

где w_0, w_t — начальная и текущая ширина трещины; k_0, k_t - коэффициент водопроницаемости до и после залечивания; R_0, $R_п$, R_t - прочность исходного, повреждённого и залеченного образца. Природа продуктов залечивания подтверждается методами растровой электронной микроскопии и рентгенофазового анализа, прочность определяется по ГОСТ 10180-2012 [11].

7. Перспективы применения в условиях Узбекистана

Поскольку активация бактерий требует воды, наибольший эффект биобетон даёт в конструкциях с периодическим или постоянным увлажнением: облицовке ирригационных каналов, гидротехнических сооружениях, фундаментах и подземных частях зданий, резервуарах, опорах мостов. В надземных элементах, быстро высыхающих в жарком сухом климате, процесс залечивания протекает лишь в периоды увлажнения. Закупорка трещин карбонатом кальция снижает проникание сульфатов и хлоридов из засоленных грунтов, что особенно важно для низовьев Амударьи. Начальная стоимость биобетона выше обычного за счёт спор, субстрата и носителя, поэтому экономически оправдано его адресное применение в ответственных и труднодоступных для ремонта зонах, где затраты окупаются сокращением расходов на ремонт в течение жизненного цикла.

Заключение. По результатам работы можно сделать следующие выводы.

1. Для бетона наиболее предпочтителен неуреолитический механизм самовосстановления на основе окисления лактата кальция бактериями рода *Bacillus*: он не сопровождается выделением аммония, а вторичная карбонизация портландита увеличивает теоретический выход $CaCO_3$ до шести молей на моль субстрата.

2. Предложена последовательность подбора состава биобетона на основе формулы Боломея–Скрамтаева с понижающим коэффициентом $k_б$. Для класса В25 получен состав: цемент 365 кг/м^3, В/Ц = 0,55, лактат кальция 11,0 кг/м^3, керамзитовый носитель спор 46 кг/м^3 (20 % объёма песка).

3. Разработана модель оценки глубины герметизации трещин, согласно которой для трещин шириной 0,3 мм достигается герметизация устья на

глубину около 2,2 мм; обращённая формула (22) позволяет назначать дозировку субстрата по допустимой ширине раскрытия трещин.

4. Дальнейшие исследования должны быть направлены на экспериментальную калибровку параметров $k_б$, η и b на местных материалах и в климатических условиях Узбекистана.

Список использованной литературы

1. Jonkers H.M., Thijssen A., Muyzer G., Copuroglu O., Schlangen E. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete // Ecological Engineering. – 2010. – Vol. 36, № 2. – P. 230–235.

2. Wiktor V., Jonkers H.M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete // Cement and Concrete Composites. – 2011. – Vol. 33, № 7. – P. 763–770.

3. Van Tittelboom K., De Belie N., De Muynck W., Verstraete W. Use of bacteria to repair cracks in concrete // Cement and Concrete Research. – 2010. – Vol. 40, № 1. – P. 157–166.

4. De Muynck W., De Belie N., Verstraete W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review // Ecological Engineering. – 2010. – Vol. 36, № 2. – P. 118–136.

5. Wang J.Y., Soens H., Verstraete W., De Belie N. Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores // Cement and Concrete Research. – 2014. – Vol. 56. – P. 139–152.

6. Seifan M., Samani A.K., Berenjian A. Bioconcrete: next generation of self-healing concrete // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2016. – Vol. 100, № 6. – P. 2591–2602.

7. Achal V., Mukherjee A., Reddy M.S. Microbial concrete: way to enhance the durability of building structures // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2011. – Vol. 23, № 6. – P. 730–734.

8. Ramachandran S.K., Ramakrishnan V., Bang S.S. Remediation of concrete using micro-organisms // ACI Materials Journal. – 2001. – Vol. 98, № 1. – P. 3–9.

9. Баженов Ю.М. Технология бетона. – М.: Изд-во АСВ, 2011.

10. ГОСТ 27006-2019. Бетоны. Правила подбора состава. – М.: Стандартинформ, 2019.

11. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Стандартинформ, 2013.

12. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2019.